

**PRODUCCIÓN DE BIOGAS A PARTIR DE LA CODIGESTIÓN DE BIOMASA
RESIDUAL EN UN SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA CON AGITACIÓN A
ESCALA LABORATORIO**

**YESICA DAYANA GIRALDO PIÑEROS
MARIA ALEJANDRA ORTIZ SANCHEZ**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018**

**PRODUCCIÓN DE BIOGAS A PARTIR DE LA CODIGESTIÓN DE BIOMASA
RESIDUAL EN UN SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA CON AGITACIÓN A
ESCALA LABORATORIO**

**YESICA DAYANA GIRALDO PIÑEROS
MARIA ALEJANDRA ORTIZ SANCHEZ**

**Proyecto de investigación para optar el título de:
INGENIERO QUÍMICO**

**Directora
ANDREA LACHE MUÑOZ
Msc.Ingeniera Química**

**Codirectora
Adriana Inés Páez Morales
Microbióloga Industrial**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMERICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018**

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C. Agosto 2018

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

Vicerrector Académico y de Posgrados

DRA. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano general Facultad de Ingenierías

ING. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director de Investigaciones

ING. ARMANDO FERNÁNDEZ

Director del Departamento de Ingeniería Química

ING. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

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

DEDICATORIA

Dedico mi tesis primeramente a Dios por no abandonarme en los momentos difíciles, por ser mi guía durante toda mi carrera y permitirme culminar mis estudios. A mis padres Duber Ortiz y Sandra Sánchez, quienes con su gran esfuerzo no solo pagaron mi carrera si no lograron impulsarme durante ella con su amor y dedicación para ser mejor profesional y mejor persona. A mi hermano Camilo Ortiz por ejercer su estudio a mí lado, ser mí respaldo y ayudarme académicamente. A mi novio Andrés Rodríguez quien no solo fue mi apoyo más grande durante mi carrera, sino que también fue mi compañía incondicional en los momentos más difíciles que pase durante ella. A mi compañera de tesis Yesica Giraldo quien con su esfuerzo y dedicación logro comprenderme y guiarme para la realización del proyecto de tesis y a mis amigos y compañeros que estuvieron junto a mí durante todo mi proceso académico.

María Alejandra Ortiz Sánchez

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado especialmente a mis padres, sin ellos llegar a este punto no hubiera sido posible, gracias por su esfuerzo, su confianza, su ejemplo, por darme la mano en cada tropiezo, por creer en mí más de lo que incluso yo misma lo hice. Este logro es más de ellos que mío. A mis dos hermanas y mi hermanito, por ser parte de la motivación que me ha permitido llegar hasta acá. Al amor de mis días, por su apoyo incondicional, por ayudarme en lo que necesité, por impulsarme siempre a dar lo mejor de mí y darme fortaleza. A los amigos que llegaron a lo largo de la carrera, que me han aportado personal y académicamente. A mi compañera de proyecto, por su esfuerzo y compromiso para llevar a cabo el trabajo. Y a cada una de las personas que contribuyeron al desarrollo del proyecto.

Yesica Dayana Giraldo Piñeros

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestra directora Andrea Lache Muñoz por su compromiso, dedicación, colaboración, por guiarnos y apoyarnos con su conocimiento antes y durante todo el proyecto. A nuestra codirectora Adriana Páez por la orientación y colaboración brindada. Al grupo de investigación Energías Alternativas, por abrirnos las puertas, compartirnos conocimientos e impulsarnos en el interés por el área. A la Fundación Universidad de América por brindarnos los conocimientos y las bases que permitieron ejercer el proyecto, también por prestarnos y por hacer uso de sus instalaciones a lo largo del proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	23
OBJETIVOS	25
1. GENERALIDADES TEÓRICAS	26
1.1 BIOMASA	26
1.1.1 Biomasa residual.	26
1.1.2 Tipos de biomasa residual.	26
1.1.3 Procesos de conversión de la biomasa	27
1.1.4 Estiércol de bovino	28
1.1.5 Poda	28
1.2 DIGESTIÓN ANAEROBIA	29
1.2.1 Etapas del proceso de digestión anaerobia	30
1.2.1.1 Etapa hidrolítica	30
1.2.1.2 Etapa acidogénica	31
1.2.1.3 Etapa acetogénica	31
1.2.1.4 Etapa metanogénica	32
1.2.2 Microorganismos en el proceso de digestión anaerobia	33
1.2.3 Factores que intervienen en el proceso	33
1.2.3.1 Tipo de sustrato y composición	33
1.2.3.2 Temperatura	34
1.2.3.3 pH	35
1.2.3.4 Nutrientes	35
1.2.3.5 Inhibidores	36
1.2.3.5 Agitación	36
1.2.4 Productos finales en el proceso de digestión	39
1.2.5 Codigestión	39
1.3 BIOGÁS	39
1.3.1 Producción de biogás según sustrato	39
1.4 SISTEMAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA	40
1.4.1 Sistemas de digestión sin retención de biomasa	41
1.4.1.1 Sistema de mezcla completa	41
1.4.1.2 Sistema de discontinuo	42
1.4.2 Sistemas de digestión con retención de biomasa	43
1.4.3.1 Sistema de lecho fijo	43
1.4.3.2. Sistema de lecho fluidizado	43
1.4.3.3. Sistema tipo UASB	44
2. METODOLOGÍA	46
2.1 CARACTERIZACIÓN LA BIOMASA RESIDUAL	46
2.1.1 Selección de la biomasa residual	46
2.1.2 Recolección de biomasa residual	47

2.1.3 Acondicionamiento de la biomasa residual	47
2.1.4 Condiciones fisicoquímicas de la biomasa seleccionada	47
2.1.4.1 pH	48
2.1.4.2 Humedad	48
2.2 MONTAJE DE LOS SISTEMA DE DIGESTIÓN	48
2.2.1 Diseño para la construcción del sistema de digestión	48
2.2.2 Modificaciones al diseño base	49
2.2.3 Partes de los sistemas de digestión	50
2.2.3.1 Instrumentos de medición	50
2.2.3.2 Mecanismo de agitación	51
2.2.3.4 Recolección de gas	51
2.2.4 Construcción de los sistemas de digestión	51
2.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN Y FORMULACIÓN DEL SUSTRATO	52
2.3.1 Formulación del sustrato	52
2.3.2 Parámetros fisicoquímicos del sustrato inicial	54
2.3.2.1 Temperatura de sustrato inicial	54
2.3.2.2 Relación C/N	54
2.3.2.3 Sólidos suspendidos totales	55
2.3.2.4 Sólidos totales.	55
2.3.2.5 Demanda química de oxígeno (DQO)	55
2.3.3 Condiciones de operación	55
2.4 PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA	57
2.4.1 Evaluación de la actividad microbiana	57
2.4.2 Perfil temperatura	57
2.4.3 Perfil pH.	58
2.4.4 Parámetros fisicoquímicos del sustrato	58
2.5 COMPARACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LOS SISTEMAS	58
2.5.1 Cromatografía	58
2.5.2 Análisis estadístico	58
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	59
3.1 CARACTERIZACIÓN LA BIOMASA RESIDUAL	59
3.1.1 Selección de la biomasa residual	59
3.1.1.1 Selección del residuo proveniente de la Fundación universidad de América	59
3.1.1.2 Selección del estiércol animal	61
3.1.2.1 Recolección del residuo de poda	62
3.1.2.2 Recolección del estiércol de bovino	63
3.1.3 Acondicionamiento de la biomasa residual	64
3.1.3.1 Acondicionamiento del residuo de poda	64
3.1.4 Condiciones fisicoquímicas de la biomasa seleccionada	64
3.1.4.1 pH	64
3.1.4.2 Humedad	64

3.2 MONTAJE DE LOS SISTEMA DE DIGESTIÓN	65
3.2.1 Ajuste de diseño del sistema de digestión	65
3.2.2 Modificaciones al diseño base	66
3.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN Y FORMULACIÓN DEL SUSTRATO	73
3.3.1 Formulación del sustrato	73
3.3.2 Parámetros fisicoquímicos del sustrato inicial	75
3.3.2.1 Temperatura	75
3.3.2.2 Relación C/N	75
3.3.2.3 Sólidos suspendidos totales y sólidos totales	76
Sólidos suspendidos totales	76
3.3.2.3 Demanda química de oxígeno (DQO)	77
3.3.3 Condiciones de operación	77
3.4 PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA	78
3.4.1 Evaluación de la actividad enzimática microbiana	78
3.4.2 Perfil temperatura	81
3.4.3 Perfil pH	82
3.4.4 Parámetros fisicoquímicos del sustrato	83
3.4.4.1 Sólidos suspendidos totales y sólidos totales	83
3.5 PRODUCCIÓN DE BIOGAS Y EFECTO DE LA AGITACIÓN.	85
3.5.1 Cromatografía	85
3.5.2 Análisis estadístico	87
4. CONCLUSIONES	90
5. RECOMENDACIONES	92
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS	96

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.	28
Tabla 2. Composición del residuo de poda.	29
Tabla 3. Composición química de diversos residuos de origen animal y vegetal (valores promedios, base seca)	34
Tabla 4. Concentración inhibidora de inhibidores comunes	36
Tabla 5. Composición aproximada del biogás	39
Tabla 6. Características y producción de biogás de algunos residuos orgánicos agroindustriales.	40
Tabla 7. Relación entre periodo de fermentación y la temperatura	57
Tabla 8. Dimensiones de los sistemas de digestión base.	65
Tabla 9. Resultados de la relación carbono- nitrógeno del sustrato inicial.	76
Tabla 10. Resultados sólidos suspendidos totales y sólidos totales.	76
Tabla 11. Comparación de sólidos suspendidos totales y sólidos totales en el sustrato.	84
Tabla 12. Comparación de la demanda química de oxígeno del sustrato.	84
Tabla 13. Composición del biogás producido en el sistema de digestión con agitación.	86
Tabla 14. Parámetros en los sistemas de digestión que serán evaluados estadísticamente.	87
Tabla 15. Resultados del ANOVA	89

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Microorganismos que participan en el proceso de fermentación durante las cuatro fases.	33
Cuadro 2. Tipos de sistemas de agitación en el proceso de digestión anaerobia.	37
Cuadro 3. Diseños de los agitadores mecánicos	38
Cuadro 4. Características de la biomasa residual.	60

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Temperatura interna de los sistemas de digestión anaerobia a lo largo del proceso.	81
Gráfico 2. Valor de pH en los sistemas de digestión anaerobia a lo largo del proceso.	82

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Procesos de conversión de la biomasa residual.	27
Figura 2. Esquema del proceso de digestión anaerobia.	30
Figura 3. Reacción química de la etapa acidogénica.	31
Figura 4. Reacción química de la etapa acetogénica.	32
Figura 5. Reacciones químicas de la etapa metanogénica.	32
Figura 6. Tipos de sistemas de digestión anaerobia según la retención de biomasa.	41
Figura 7. Sistema de mezcla completa sin recirculación.	42
Figura 8. Sistema de mezcla completa con recirculación.	42
Figura 9. Sistema de digestión discontinuo.	43
Figura 10. Sistema de lecho fijo.	43
Figura 11. Reactor de lecho fluidizado.	44
Figura 12. Esquema del sistema tipo UASB.	45
Figura 13. Diagrama de proceso con sistema de estabilización de temperatura.	49
Figura 14. Esquema del sistema de digestión anaerobia sin agitación.	51
Figura 15. Esquema del sistema de digestión anaerobia con agitación.	52
Figura 16. Puntos de muestreo en los sistemas de digestión.	67
Figura 17. Hipótesis planteadas para la temperatura.	88

LISTA DE ILUSTRACIONES

	pág.
Ilustración 1. Poda de césped recolectada en la Fundación Universidad de América.	62
Ilustración 2. Estiércol de bovino recolectado en el Frigorífico Ble Ltda.	63
Ilustración 3. Sistema de digestión anaerobia del diseño base construido.	66
Ilustración 4. Bolsa recolectora de biogás	68
Ilustración 5. Mecanismo de agitación implementado en el sistema de digestión (interior del sistema)	70
Ilustración 6. Mecanismo de agitación implementado en el sistema de digestión (exterior del sistema)	71
Ilustración 7. Sistemas de digestión anaerobia.	72
Ilustración 8. Sistemas de digestión anaerobia con asilamiento	72
Ilustración 9. Agua residual recolectada para la mezcla de sustrato.	74
Ilustración 10. Sustrato para los sistemas de digestión	75
Ilustración 11. Cultivos para la siembra de microorganismos	79
Ilustración 14. Resultados para los cultivos de la muestra 1	80
Ilustración 15. Resultados para los cultivos de la muestra 2	80

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Porcentaje de humedad de la poda	48
Ecuación 2. Volumen contenido de aire dentro del sistema de digestión.	53
Ecuación 3. Volumen contenido dentro del sistema de digestión del sustrato.	53
Ecuación 4. Cantidad de agua contenida en el sistema de digestión.	53
Ecuación 5. Cantidad en mezcla de biomasa contenida en el sistema de digestión.	54
Ecuación 6. Tiempo de retención aproximado en los sistemas.	56

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Materiales e instrumentos usados para el diseño de BERNAL y QUINTERO	97
Anexo B. Instrumentación	98
Anexo C. Materiales usados para la construcción de los sistemas de medición	100
Anexo D. Procedimiento para la construcción de los sistemas de digestión	101
Anexo E. Informe de resultados de laboratorio correspondientes al sustrato inicial.	102
Anexo F. Procedimiento del proceso de digestión.	104
Anexo G. Procedimiento de la evaluación de actividad microbiana	105
Anexo H. Condiciones monitoreadas a lo largo del proceso	106
Anexo I. Informe de resultados de laboratorio correspondientes al sustrato final.	107
Anexo J. Informe de resultados de la cromatografía del biogás producido	111
Anexo K. ANOVA	113

NOMENCLATURA

ANOVA.	Análisis de la varianza.
AGVs.	Ácidos grasos volátiles.
C/N.	Relación carbono – nitrógeno.
DQO.	Demanda química de oxígeno.
SV	Sólidos volátiles
THR.	Tiempo de retención hidráulico.
Vvac.	Volumen vacío dentro del sistema de digestión.
Vsus.	Volumen de sustrato dentro del sistema de digestión.
Vagua.	Volumen de agua dentro del sistema de digestión.
Vbio.	Volumen de biomasa dentro del sistema de digestión.
Vt.	Volumen total del sistema de digestión.

RESUMEN

El presente proyecto pretende contribuir al aprovechamiento de residuos y la generación de nuevas fuentes de energía, por medio de la transformación bioquímica de la biomasa residual a través del proceso de digestión anaerobia contribuyendo a la investigación en el área y dentro del grupo de investigación de Energías Alternativas de la Fundación Universidad de América. Para desarrollar el proyecto como primera fase se seleccionó y caracterizó la biomasa húmeda de interés: estiércol de bovino y residuo de poda, teniendo en cuenta la disponibilidad, la composición bioquímica y la forma de recolección. Para la preparación de la biomasa se realizó reducción del tamaño de partícula al residuo de poda; por último, se evaluó el pH siendo 7,3 para el estiércol de bovino y 6,24 para el residuo de poda. De igual forma se determinó un porcentaje de humedad superior al 60% para los dos tipos de biomasa.

En la segunda parte del proyecto se llevó a cabo el montaje de los sistemas de digestión, primero se realizaron las modificaciones del sistema base desarrollado por Bernal y Quintero (2016) las cuales consistieron en implementar un sistema de agitación mecánica tipo hélice, proporcionar tres puntos de muestreo para las fases formadas en el sustrato, también se agregó una bolsa hermética para la recolección del biogás; por último, se procedió a la construcción de cada sistema. Por otro lado se realizó la formulación de la mezcla de sustrato para cada sistema de digestión considerando que solo el 70% estaría cargado es decir 42 L, de los cuales 31,5 L son de agua residual, 8,5 L estiércol de bovino y 986 g de residuo de poda; una vez preparado el sustrato se evaluó la relación C/N de 3,04 obtenida por el método de Walkley-black y Micro-Kjeldahl (NTC 5167), la DQO determinada por método colorimétrico/ASTMD1252/12 fue de 37,45 g necesarios de oxígeno para degradar la materia orgánica contenida en cada litro de sustrato y con respecto a los sólidos totales y sólidos suspendidos determinados por método gravimétrico corresponden a 31,21g/L y 24,14 g/L presentes respectivamente. Se estableció que el proceso se llevaría a cabo dentro de un rango de 13°C a 18°C con un tiempo de retención de 67 días, el valor del pH se mantuvo entre 6 y 8 según la etapa del proceso, al sistema con agitación se le implementó una frecuencia de agitación de 50 rpm cada 2 días.

Se evaluó cualitativamente la actividad enzimática del sustrato mediante siembras en cultivos, donde el resultado mostro presencia de actividad microbiana. Se registró el comportamiento de la temperatura y el pH con respecto al tiempo, en cuanto a la temperatura la variación entre los sistemas fue de 1°C, pero en cuanto al pH se logró identificar una acidificación en el sistema sin agitación a partir del día 57. Para terminar esta fase se realizó el análisis a los parámetros evaluados al sustrato inicial obteniendo una mayor disminución de sólidos (1%) en el sistema con agitación y una disminución de DQO del 49,7% en el sistema sin agitación. En el día 90 la cantidad de biogás producido en el sistema con agitación fue de 11 L de los cuales 21,11% correspondieron a metano de acuerdo a los resultados arrojados

por cromatografía. Por último, se realizó el análisis de varianza determinando que estadísticamente el efecto de la agitación influye en el pH, DQO y sólidos totales.

Palabras claves: digestión anaerobia, codigestión, biogás, sustrato, agitación.

GLOSARIO

AGITACIÓN: mezclado del sustrato alimentado a los sistemas de digestión por medio de un mecanismo a lo largo del proceso.

BIOGAS: es un gas combustible que se genera en medios naturales a partir de reacciones de degradación que sufre la materia orgánica, mediante la acción de microorganismos, así como de otros factores en ausencia de aire.

BIOMASA RESIDUAL: restos de origen biológico que son degradables, y pueden ser aprovechados y usados en procesos para la producción de energía.

CODIGESTION: proceso en el cual una mezcla de dos o más tipos de biomasa residual es transformada en biogás a partir de bacterias metanogénicas.

DIGESTION ANAEROBIA: proceso que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno donde la materia orgánica es transformada por medio de microorganismos y su producto principal es el biogás.

DQO: análisis químico que se le realiza al agua para medir la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar la materia orgánica presente en el agua. Sigla de demanda química de oxígeno.

METANO: es un gas producto de la descomposición natural de la materia orgánica. Es el componente principal del biogás.

MONITOREO: llevar el seguimiento y el control de las condiciones bajo las cuales se está realizando el proceso.

SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA puede definirse como un contenedor completamente cerrado en el que se realiza la descomposición de biomasa, por medio de microorganismos anaerobios, para la obtención de biogás.

SÓLIDOS TOTALES: contenido de materia sólida disuelta y suspendida presente en la mezcla de sustrato.

SÓLIDOS VOLATILES: cantidad de materia orgánica que se volatilizan a temperaturas de 500 ± 50 °C.

SUSTRATO: mezcla de tipos de biomasa residual y agua, en sus correspondientes cantidades respecto al volumen del biodigestor.

TIEMPO DE RETENCIÓN: periodo en el cual se llevará a cabo el proceso, es decir, el tiempo necesario para la digestión del sustrato alimentado en el sistema.

INTRODUCCIÓN

Los residuos orgánicos presentan una considerable disponibilidad debido a su falta de aprovechamiento y técnicas de manejo, convirtiéndose cada vez más en un problema desde el punto de vista ambiental. Una de las causas de esta cantidad de residuos, es por el relevante aumento de la tasa de población mundial con respecto a otras décadas, teniendo como consecuencia también el incremento de la demanda de energía¹. Por esta razón, se hace necesario implementar estrategias que permitan el aprovechamiento de los residuos orgánicos contribuyendo al mismo tiempo a la generación de energía y además de esto poder minimizar los efectos ambientales causados por otras fuentes de energía como la emisión de gases de efecto invernadero producida por los combustibles fósiles.²

Dentro de estas técnicas de aprovechamiento de residuos se encuentra la digestión anaerobia, este es un procesamiento bioquímico de biomasa residual para obtención de energía por medio de microorganismos, este proceso se lleva a cabo en cuatro etapas, la primera es la etapa hidrolítica donde ocurre la descomposición de los polímeros orgánicos por medio de enzimas extracelulares, la segunda etapa es la etapa acidogénica donde se transforman los productos de la hidrólisis en mezclas de dióxido de carbono, hidrógeno y ácidos grasos volátiles que posteriormente en la tercera etapa, es decir, la acetogénica son transformados en acetato³. Por último, en la etapa metanogénica el acetato y las mezclas de dióxido de carbono e hidrógeno por medio de dos rutas, hidrogénotrofica y acetoclástica, son transformados en metano, teniendo como subproductos el dióxido de carbono y agua⁴.

¹ PASQUEVICH, Daniel. La creciente demanda mundial de energía frente a los riesgos ambientales. Asociación Argentina para el progreso de las ciencias. Instituto de energía y desarrollo sustentable. [Citado 3 de marzo de 2018] Disponible en <<http://aargentinapciencias.org/2/index.php/grandes-temas-ambientales/energi-y-ambiente/161-la-creciente-demanda-mundial-de-energia-frente-a-los-riesgos-ambientales>>

² ENERGIAS RENOVABLES. Combustibles fósiles vs energías renovables. 2015. [Citado 3 de marzo de 2018] Disponible en: <<http://www.energiasrenovablesinfo.com/general/combustibles-fosiles-vs-energias-renovables>>

³ CORRALES, Laura; ANTOLINEZ, Diana M; BOHÓRQUEZ, Johana A; CORREDOR, Aura M. Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Bogotá. NOVA (2015). 13 (23): 55-81. Página 60

⁴ SEADI, Teodorita; RUTZ, Dominik; KÖTTNER, Michael; FINSTERWALDER, Tobias, VOLK, Silke; JANSSEN, Rainer. Biogas Handbook. University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs. Dinamarca. 2008. ISBN 978-87-992962-0-0. Página 238.

El metano es el componente principal del producto obtenido el proceso, el biogás; este tiene un valor calorífico de 7 Kwh/ m³ aproximadamente, y luego de realizarle una purificación o acondicionamiento tiene diversas opciones de aplicación de las cuales las que más se destacan son la producción de calor o vapor, combustible y para la generación de electricidad.⁵

Este tipo de procesamiento bioquímico ya se ha venido trabajando en el grupo de investigación Energías Alternativas, mediante diferentes tipos de biomasa residual con resultados favorables en cuanto a la producción de biogás y la composición de metano obtenida en el gas producido. El presente proyecto implementará la digestión anaerobia como método de aprovechamiento de residuos como el estiércol bovino y el residuo de poda, éste último disponible en la Fundación universidad de América. Se acondicionarán dos tipos de sistemas de digestión anaerobia con el fin de comparar el efecto de la agitación implementada en uno de los sistemas sobre el proceso de digestión anaerobia y la producción de biogás.

⁵ MINISTERIO DE ENERGÍA. Manual del biogás. Proyecto CHI/00/G32. Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. Chile. 2011. Página 55.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Producir biogás a partir de la cogestión de biomasa residual en un sistema de digestión anaerobia con agitación a escala laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la biomasa residual seleccionada para llevar a cabo el proceso teniendo en cuenta propiedades fisicoquímicas (Relación C/N, porcentaje de humedad, pH, tamaño de partícula.)
- Realizar el montaje y puesta en marcha de un sistema de digestión anaerobio con y sin agitación a escala laboratorio.
- Definir las condiciones de operación y formulación del sustrato para el proceso de digestión anaerobia.
- Llevar a cabo la experimentación en el sistema de digestión anaerobia con agitación a escala laboratorio.
- Comparar el efecto de la agitación en el proceso de digestión anaerobia determinando cantidad y composición del biogás generado con las condiciones propuestas.

1. GENERALIDADES TEÓRICAS

1.1 BIOMASA

El término de biomasa se refiere a todo el material que se encuentra en la naturaleza proveniente de la conversión de la energía solar por el proceso de la fotosíntesis.⁶ La biomasa es transformada para su aprovechamiento energético por medio de procesos termoquímicos y bioquímicos, esto con el fin de darle uso a los productos obtenidos en cada proceso, como por ejemplo en la generación de energía renovable, siendo esta una forma favorecer al medio ambiente.⁷

1.1.1 Biomasa residual. Recurso energético de fuente secundaria, que proviene de residuos generados de actividades agrícolas, ganaderas, forestales e industrias agroalimentarias. Este hace referencia a los subproductos derivados de las transformaciones naturales de la materia orgánica que está compuesta por carbono, oxígeno e hidrógeno entre otros, lo que lleva a que se generen reacciones exotérmicas de liberación de energía.⁸ Al momento de utilizar cualquier tipo de biomasa residual en procesos para su aprovechamiento se debe tener en cuenta algunas propiedades fisicoquímicas como lo son su composición, humedad, pH, el balance entre el nitrógeno y carbono con el fin de saber si es posible obtener el producto que se quiere según el proceso que se vaya a realizar.

1.1.2 Tipos de biomasa residual. La biomasa puede clasificarse según su origen como:

- **Biomasa natural.** Se encuentra en la naturaleza sin intervención humana como hojas, troncos, residuos de las podas y cortezas entre otros.⁹
- **Biomasa residual seca.** Este tipo de biomasa requiere de gran contenido de lignina y celulosa en su composición y una humedad menor al 60% para aumentar su rendimiento, es generalmente usado como combustibles.¹⁰

⁶ SECRETARIA DE ENERGÍA. Energía biomasa, Energías renovables. Coordinación de energías renovables. Argentina 2008. 54-11-4349-5000. Página 5.

⁷ IMARTEC. Biomass energy evolution, [Citado el 1 marzo del 2018] Disponible en internet:< <https://www.imartec.es/es-realmente-la-biomasa-neutra-en-emisiones-de-carbono/>>

⁸ ESCALANTE, Humberto; ORDUZ, Janneth; ZAPATA, Henry; CARDONA, María; DUARTE, Marta. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Unidad de planeación minero-energética (UPME 2008). ISBN: 978-958-8504-59-9. Página 120.

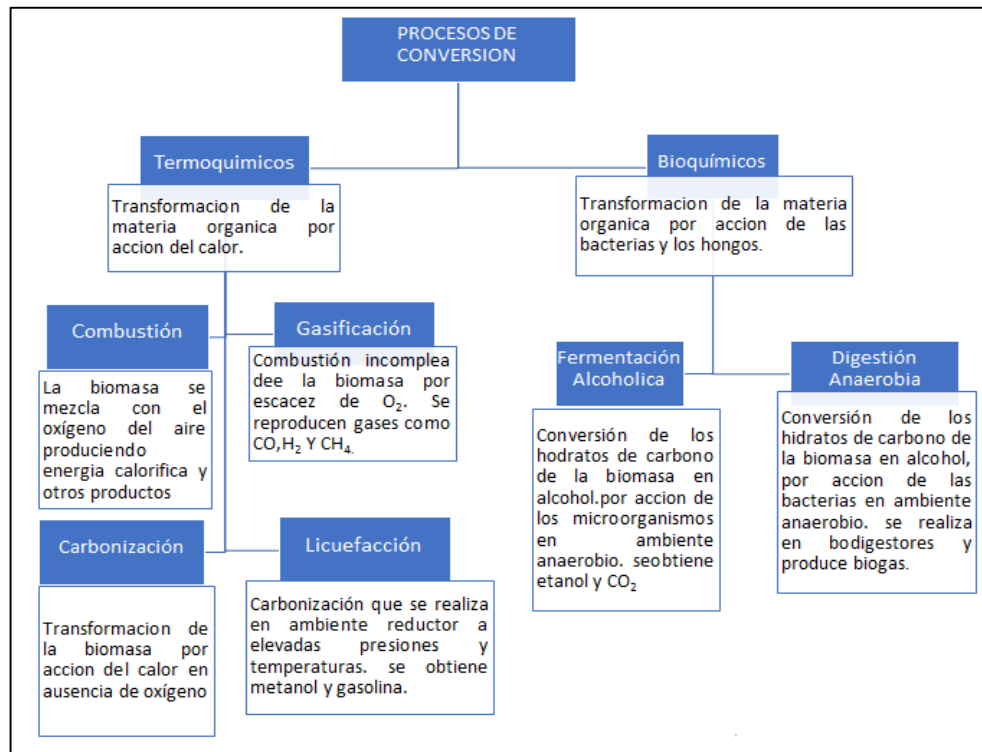
⁹ ORGAZ, Arturo. Energía renovable: la biomasa. Empresa provincial de energía en córdoba (EPEC). 0351- 429 6736. Página 5

¹⁰ SECRETARIA DE ENERGÍA. Op., cit., página 7.

- **Biomasa residual húmeda.** En esta clasificación se encuentran los residuos animales, residuos provenientes de la actividad humana y los desechos sólidos urbanos que, aunque son sólidos contienen una carga de humedad superior al 60%, por esta razón su descomposición se realiza por medio de microorganismos que degradan el material orgánico de forma aerobia o anaerobia y producen biogás con contenido de metano que se puede utilizar para la generación de energía eléctrica.¹¹

1.1.3 Procesos de conversión de la biomasa. Dependiendo del tipo de biomasa se define el tipo de tecnología a utilizar por lo cual es necesario conocer algunas características fisicoquímicas, bioquímicas, energéticas y estructurales del residuo a transformar para escoger la conversión energética mediante procesos termoquímicos como lo son la combustión, la gasificación, la carbonización y la licuefacción, o bioquímicos como la fermentación alcohólica y la digestión anaerobia.¹² Esta transformación de la biomasa se realiza con el fin de generar productos aprovechables para la obtención de energía eléctrica o calorífica como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Procesos de conversión de la biomasa residual.



Fuente: Román. Energía de la biomasa (2008). Modificado por autores.

¹¹ Lbid.p.5

¹² ESCALANTE. Op., cit., página 125.

1.1.4 Estiércol de bovino. El excremento de vacas tiene diversas formas de aprovechamiento debido a su disponibilidad y composición química, como lo es el uso de fertilizantes ya que proporciona mejores propiedades al suelo puesto que en el primer año liberan la mitad de sus nutrientes aproximadamente, este contenido depende directamente de la alimentación y clase del animal¹³. Otro tipo de aprovechamiento para las excretas es en el proceso de digestión anaerobia, allí es usado como sustrato ya que tiene componentes como proteínas, celulosa, ceniza, lignina que hacen parte de la producción de biogás. También está compuesto por carbono y nitrógeno que favorecen a la digestión anaerobia a diferencia de la composición de estos en otras excretas animales como puede observarse en la tabla 1.¹⁴

Tabla 1. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.

Materiales	%C	%N	C/N
Residuos animales			
Bovinos	30	1,30	25:1
Equinos	40	0,80	50:1
Ovinos	35	1,00	35:1
Porcinos	25	1,50	16:1
Caprinos	40	1,00	40:1
Conejos	35	1,50	23:1
Gallinas	35	1,50	23:1
Patos	38	0,80	47:1
Pavos	35	0,70	50:1

Fuente. MINISTERIO DE ENERGIA. Manual del biogás (2008)

1.1.5 Poda. La poda es considerada biomasa residual seca proveniente de la agricultura con alto contenido de carbono, su composición química está en forma de celulosa, hemicelulosa y lignina. La poda tiene un alto potencial energético debido a su estructura química y su composición en carbono, debido a este potencial estos residuos son usados para la producción de biocombustibles como el bioetanol y el biogás¹⁵. A continuación, en la tabla 2 se muestra la composición química del residuo de poda.

¹³ PASOLAC. Guía Técnica de Conservación de Suelos y Agua. [Citado el 1 marzo del 2018] Disponible en internet:

<http://www.funica.org.ni/docs/conser_sueyagua_49.pdf>.

¹⁴ MINISTERIO DE ENERGÍA. Op., cit., página 35.

¹⁵ ARISTIZABAL, Beatriz; VANEGAS, Estefanía; MARICAL, Juan; ALONSO, Miller. Digestión anaerobia de residuos de poda como alternativa para disminuir emisiones

Tabla 2. Composición del residuo de poda.

C/N	25
Etanol	34,14
Celulosa (%)	36,1
Hemicelulosa (%)	29,8
Lignina (%)	19,9
Acido lactico(%)	5,51
Acido acetico(%)	1,84
Acido butirico(%)	0,24
Proteinas(%)	82,5

Fuente. TSAPEKOS, P; KOUGIAS, P.G; EGELUND; LARSEN, U; PEDERSEN, J; TRENEL. P.

Improving the energy balance of grass-based anaerobic digestion through combined harvesting and pretreatment. (2016).

1.2 DIGESTIÓN ANAEROBIA

Es un proceso biológico cuyo objetivo es la descomposición de materia orgánica por medio de diferentes poblaciones bacterianas en ausencia de oxígeno, dando lugar a una mezcla de gases compuesta principalmente por metano, dióxido de carbono e hidrógeno.¹⁶

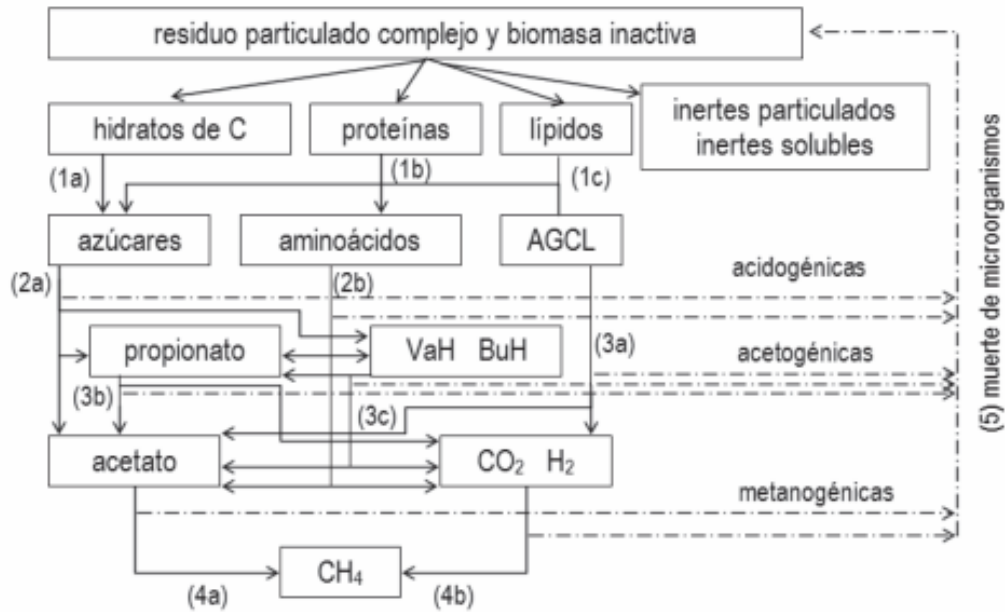
Dicha materia orgánica está compuesta por lípidos, carbohidratos, aminoácidos, proteínas que son degradadas a través de etapas secuenciales (Ver figura 2) por medio de reacciones bioquímicas.¹⁷

de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios. Universidad Nacional, Manizales. Energética (2015). ISSN 2357 - 612X. Página 31.

¹⁶DÍAZ, María; ESPITIA, Sandra; MOLINA, Francisco. Digestión anaerobia una aproximación a la tecnología. Bogotá D.C. Instituto de biotecnología. Universidad Nacional de Colombia. Primera edición. 2002. Página 41.

¹⁷ ROSATO, Mario A. Managing Biogas Plants a Practical Guide. Green Chemistry and Chemical Engineering. New York. CRC Press. Taylor and Francis Group. 2018. Página 1-7.

Figura 2.Esquema del proceso de digestión anaerobia.



Fuente: FERNÁNDEZ-POLANCO. Diseño de reactores Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) (2015)

Las reacciones bioquímicas, en su mayoría ocurren de forma simultánea y dependen directamente de los microorganismos involucrados en ellas y de las condiciones en las que se lleve a cabo el proceso. Se ha dividido el proceso en 4 fases o etapas según estudios microbiológicos:

- Hidrolisis
- Acidogénesis
- Acetogénesis
- Metanogénesis¹⁸

1.2.1 Etapas del proceso de digestión anaerobia

1.2.1.1 Etapa hidrolítica. En esta fase se da el paso inicial para la degradación de partículas complejas ya que únicamente se puede utilizar materia orgánica soluble capaz de atravesar la pared celular de los microorganismos ¹⁹. Esta hidrólisis se lleva a cabo por medio de las hidrolasas, que son enzimas extracelulares capaces

¹⁸ MINISTERIO DE ENERGÍA. Op., cit., página 19.

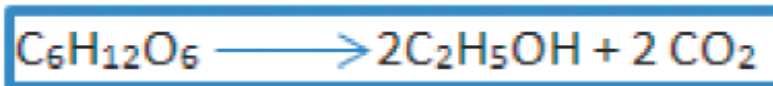
¹⁹ MARTÍ, Nuria. Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestión Process. Dissertation.com. Florida, Estado Unidos. 2006. Página.5.

de romper enlaces específicos y solubilizar la materia orgánica con ayuda del agua.²⁰

Puede considerarse que la velocidad de solubilización de materia orgánica y la velocidad de producción de biogás son proporcionales, por lo que esta etapa es limitante sobre la velocidad global del proceso cuando hay una gran cantidad de sólidos presentes en el sustrato. Además, esta etapa también depende de las condiciones de operación (temperatura, pH, tiempo de retención) y de la composición bioquímica del sustrato.²¹

1.2.1.2 Etapa acidogénica. Los compuestos obtenidos en el hidrolisis son convertidos en ácidos orgánicos a través de la fermentación por medio de bacterias acidógenas. Los productos obtenidos en esta etapa son principalmente ácidos simples llamados comúnmente ácidos grasos volátiles (AGVs) como el butírico, propiónico, valérico y acético; dependiendo el sustrato que se use en el proceso también se obtienen productos como, dióxido de carbono, amoníaco, hidrógeno y pequeñas cantidades de cetonas y alcoholes como se puede ver en la reacción de la figura 3.²²

Figura 3. Reacción química de la etapa acidogénica.



Fuente: CORRALES, ANTOLINEZ, BOHORQUEZ, CORREDOR. Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. (2006)

1.2.1.3 Etapa acetogénica. En esta etapa los ácidos grasos volátiles obtenidos en la acidogénesis son transformados en ácido acético por medio de mezclas de dióxido de carbono e hidrógeno (ver figura 4) a través de las bacterias acetogénicas²³ las cuales usan como sustrato el hidrógeno. Estos productos son los que las bacterias metanogénicas utilizarán como sustrato en la etapa siguiente.²⁴

²⁰ CORRALES. Op., cit., página 60.

²¹ FERNÁNDEZ-POLANCO, Fernando; SEGHEZZO, Lucas. Diseño de reactores Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB). Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional - INENCO, CONICET. Argentina. Universidad Nacional de Salta. 2015. Página 24.

²² SÁNCHEZ, Jesús. Optimización de la agitación de un digestor anaerobio mediante mecánica de fluidos computacional. España, Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. 2016. Página 13.

²³ MARTÍ. Op., cit., página 8.

²⁴ MINISTERIO DE ENERGÍA. Op., cit., página 21-22.

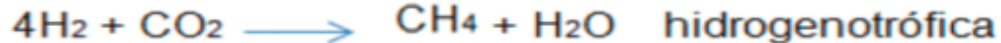
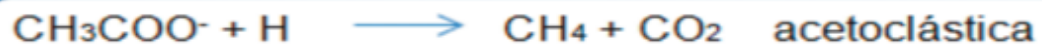
Figura 4. Reacción química de la etapa acetogénica.



Fuente: CORRALES, ANTOLINEZ, BOHORQUEZ, CORREDOR. Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. (2006)

1.2.1.4 Etapa metanogénica. Constituye la etapa final del proceso, en la que se da la formación de metano a partir de dos rutas principales, la acetoclástica y la hidrogenotrófica. La producción del metano es la forma principal por medio de la cual obtienen energía las bacterias metanogénicas para su crecimiento y desde un punto de vista metabólico, esta formación de metano es un tipo de respiración anaerobia²⁵. La ruta acetoclástica es donde los microorganismos crecen en acetato como sustrato y la hidrogenotrófica es donde los microorganismos crecen en sustratos como dióxido de carbono e hidrógeno como se puede observar en las reacciones mostradas en la figura 5.²⁶

Figura 5. Reacciones químicas de la etapa metanogénica.



Fuente: CORRALES, ANTOLINEZ, BOHORQUEZ, CORREDOR. Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. (2006)

Las bacterias metanogénicas son quizá las más importantes en todo el proceso de digestión ya que son las productoras del metano, pero así mismo hay que tener en cuenta características que influirían de forma definitiva en la eficiencia del proceso tales como que son estrictamente anaeróbicas y son sensibles a las condiciones ambientales y fisicoquímicas en las que se desarrolla el proceso. Y si no se tiene un control de estas condiciones es posible la inhibición de esta última etapa en el proceso de digestión anaerobia.²⁷

²⁵ DÍAZ. Op., cit., página 58

²⁶ CORRALES. Op., cit., página 66.

²⁷ FERNÁNDEZ- POLANCO. Op., cit., página 25.

1.2.2 Microorganismos en el proceso de digestión anaerobia. Las especies presentes en el proceso y sus características varían dependiendo el tipo de sustrato que se esté usando y de los componentes que serán degradados como se puede observar en el cuadro 1.

Cuadro 1. Microorganismos que participan en el proceso de fermentación durante las cuatro fases.

Etapa del proceso de digestión	Género del microorganismo	Características del género
Etapa hidrolítica	<i>Bacteroides, Lactobacillus, Propioni- bacterium, Sphingomonas, Sporobacterium, Megasphaera, Bifidobacterium</i>	Capaces de romper los enlaces complejos de proteínas, celulosa, lignina o lípidos en monómeros.
Etapa acidogénica	<i>Clostridium, Paenibacillus Ruminococcus, Clostridium, Paenibacillus Ruminococcus</i>	Capaces de convertir azúcares, aminoácidos y lípidos en ácidos orgánicos, alcoholes y cetonas, acetato, CO ₂ y H ₂ .
Etapa acetogénica	<i>Syntrophobacter wolinii, Syntrophomonas wolfei.</i>	Capaces de oxidar ácidos grasos de 4 a 8 átomos de carbono, convierten el propiónico, butírico y algunos alcoholes en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono.
Etapa metanogénica	<i>Methanobacterium, Methanospirillum hungatii, Methanosarcina.</i>	Capaces de generar gas metano como última fase de la digestión anaerobia.

Fuente: MINISTERIO DE ENERGÍA. Manual del biogás (2011) y CORRALES, ANTOLINEZ, BOHORQUEZ, CORREDOR. Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta (2006). Modificado por autores.

1.2.3 Factores que intervienen en el proceso. Para que el proceso pueda desarrollarse sin complicaciones se deben tener en cuenta los siguientes parámetros ambientales y de control que influenciarán en él.

1.2.3.1 Tipo de sustrato y composición. El tipo de sustrato determina la actividad microbiana en el proceso, el tamaño de cada grupo de organismos será proporcional

a la cantidad de sustrato en el sistema²⁸. La composición bioquímica del sustrato es la que permite el crecimiento y desarrollo de la actividad microbiana, esta composición varía también de acuerdo con el tipo de biomasa que se esté usando como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Composición química de diversos residuos de origen animal y vegetal (valores promedios, base seca)

Materia prima	Lípidos (%)	Proteínas (%)	Celulosa Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Ceniza (%)
Paja de trigo	1,1	2,1	65,45	21,6	3,53
Paja de arroz	2,35	12,26	30,51	10,61	12,55
Poroto verde	3,8	11,04	39,61	13,84	9,14
Pasto verde	8,05	4,94	57,22	9,8	19,99
Alfalfa	10,41	12,81	36,79	8,95	10,3
Hojas secas	4,01	3,47	32,78	29,66	4,68
Caña maíz	-	4,5	35,4	10,3	6,5
Bovino	3,23	9,05	32,49	35,57	19,66
Porcino	11,5	10,95	32,39	21,49	23,67
Equino	2,7	5	40,5	35	17,8
Ovino	6,3	3,75	32	32	25,95

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Manual del biogás (2011)

1.2.3.2 Temperatura. Es uno de los factores más importantes en el proceso de digestión, en la práctica, la temperatura dependerá en su totalidad de la composición del ecosistema bacteriano, lo que hace que sea un factor restrictivo en el proceso²⁹. De la temperatura dependen la velocidad y la cantidad en la producción del biogás, a medida de que la temperatura aumenta, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso dando lugar a mayores producciones.³⁰

Los rangos de temperatura en los que pueden operar los digestores son:

- Psicrófilo $-5 < T < 20^{\circ} \text{C}$
- Mesófilo $8 < T < 45^{\circ} \text{C}$
- Termófilo $40 < T < 70^{\circ} \text{C}$
- Hipertermófilo $65 < T < 110^{\circ} \text{C}$ ³¹

²⁸DÍAZ. Op., cit., página 89.

²⁹ROSATO. Op., cit., página 8-9.

³⁰MARTÍ. Op., cit., página 10.

³¹FERNÁNDEZ- POLANCO. Op., cit., página 35-37.

Con frecuencia es necesario añadir calor para acelerar las reacciones bioquímicas implicadas en el proceso ya que mayoría de digestores funcionan en un rango mesófilo, optimizándose el proceso entre los 29 y 33°C.

La digestión anaerobia también puede ocurrir en el rango termófilo, siendo óptima en las proximidades de los 55°C, permitiendo un tiempo de retención menor, pero, debido a su sensibilidad a los cambios de temperatura, exige un gran control, por lo tanto, es preferible llevar el proceso en un rango mesófilo.³²

1.2.3.3 pH. El valor del pH representa la acidez dentro del digestor y resulta determinante para propiciar la producción de biogás, puesto que por debajo de un valor de 6 la acidez del medio inhibe la actividad de las bacterias metanogénicas, y para valores de pH comprendidos entre 4 y 5, la inhibición afecta también a las bacterias fermentativas. Efectos similares se detectan para valores de pH superiores a 8- 8,5³³. Es decir, el valor del pH variará según la etapa en la que se encuentre el proceso, esto debido a la transformación de ácidos grasos volátiles y los microorganismos que actúen en ellas, como se muestra a continuación:

- Fermentativos: entre 7,2 y 7,4
- Acetogénicos: entre 7,0 y 7,2
- Metanogénicos: entre 6,5 y 7,5

Por otra parte, el pH afecta a los diferentes equilibrios químicos del medio, desplazándolos hacia la formación de otros componentes, como por ejemplo el amonio o amoniaco, por esto es tan importante el control de este factor.³⁴

1.2.3.4 Nutrientes. Estos componentes son los que aseguran el crecimiento de los microorganismos, como por ejemplo el potasio, el calcio, hierro, el magnesio y otros elementos ayudan, dentro de límites, a mantener un ecosistema bacteriano saludable. El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimento de las bacterias formadoras de metano, la relación C/N ideal es 30; sin embargo, no todo el carbono o el nitrógeno presente en la materia prima es necesariamente digerible por los microorganismos. En consecuencia, es posible para obtener relaciones C/N que presentan gran variación dependiendo el sustrato.³⁵

³² BAUTISTA, Alejandro. Sistema biodigestión para el tratamiento de desechos orgánicos. Estelí, Nicaragua. Universidad Carlos III De Madrid Escuela Politécnica Superior. 2010. Página 20-21.

³³ PEREZ, Javier. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Santiago de Chile. Universidad de Chile. 2010. Página 29.

³⁴ MARTÍ. Op., cit., página 11.

³⁵ ROSATO. Op., cit., página 9-10.

1.2.3.5 Inhibidores. Son los compuestos que causan toxicidad en el proceso, la toxicidad es dependiente del pH; esto se debe a que las especies no ionizadas de dichos compuestos, al tener un carácter apolar, son absorbidas por la membrana celular y alteran las funciones celulares, siendo entonces las responsables de la toxicidad³⁶. El efecto de estos inhibidores podría ser reducido por medio de la temperatura en el sistema. A continuación, en la tabla 4, se muestran los compuestos inhibidores más comunes en el proceso de digestión anaerobia con las cantidades correspondientes en las que son tóxicas.

Tabla 4. Concentración inhibidora de inhibidores comunes

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO ₄	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Nitrato (según contenido de Nitrógeno)	0,05 mg/
Cu	100mg/l
Cr	200mg./l
Ni	200- 500 mg./l
Detergente sintético	20-40 mg./l
Na	3500-5500 mg./l
K	2500-4500 mg./l
Ca	2500-4500 mg./l

Fuente: BAUTISTA. Sistema biodigestión para el tratamiento de desechos orgánicos (2010).

1.2.3.5 Agitación. En función del tipo de digestor es necesario tener un sistema de agitación que permita homogeneización y formación de agregados bacterianos. Este mecanismo dependiendo el tipo y su velocidad, puede causar efectos negativos en la actividad microbiana reduciendo la producción de sustancias poliméricas extracelulares y rompiendo enlaces necesarios en el sustrato. Los principales propósitos de la agitación en el proceso son:

- Prevenir la sedimentación y acumulación de sólidos dentro del digestor.
- Propiciar una densidad microbiana uniforme para evitar la formación de espacios sin actividad biológica.
- Logra igualar la concentración en el sustrato y el gradiente de temperatura.
- Favorecer la eficiente interacción del sustrato con la población bacteriana.
- Aumentar la producción de biogás y disminuir el tiempo de retención.
- Evitar la formación de espumas en la superficie.³⁷

³⁶ DÍAZ. Op., cit., página 90.

³⁷ MINISTERIO DE ENERGIA.Op., cit., página 50-51.

El sistema de agitación depende del tipo de digestor en el que se lleva a cabo el proceso. En el cuadro 2 se mencionan los tipos de agitación más comúnmente empleados.

Cuadro 2.Tipos de sistemas de agitación en el proceso de digestión anaerobia.

Tipo de agitación	Funcionamiento
Recirculación con bomba externa	Las bombas aspiran de la parte inferior del digestor y devuelven el fango por la parte superior, o al contrario.
Inyección de fango mediante boquillas	Funciona similar a la recirculación con bomba, pero en este caso, la entrada de fango en el digestor se produce a través de varias boquillas ubicadas en la parte inferior.
Agitadores mecánicos	Permiten girar en ambos sentidos y así mezclar sólidos que se puedan haber sedimentado.
Agitación con gas	Parte del gas producido en el proceso de digestión es presurizado mediante un compresor e introducido de nuevo en el digestor.

Fuente: SANCHEZ. Optimización de la agitación de un digestor anaerobio mediante mecánica de fluidos computacional. (2016)

En el caso de los agitadores mecánicos, existen diferentes diseños según las condiciones del proceso al cual se le vaya a implementar el sistema de agitación, como volumen del reactor, cantidad de sólidos y velocidad de agitación³⁸. En el cuadro 3, se describen algunos de los diseños más utilizados a nivel industrial.

³⁸ MINISTERIO DE ENERGIA. Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile. ISBN: 978-956-8066-14-7. Santiago de Chile 2003. Páginas 55 -58.

Cuadro 3. Diseños de los agitadores mecánicos.

Diseño del agitador	Características	Áreas de aplicación	Ventajas	Desventajas
Agitador tipo hélice	Alta velocidad de mezcla (si tiene motor), posibilidad de posición ajustable, funcionamiento discontinuo en intervalos.	Se usa en sustratos con contenido de solidos bajos (<10%) y reactores a temperatura s mesófilas	Muy buena mezcla para sustrato en estado líquido.	Mantenición del sistema de agitación requiere apertura del sistema de digestión.
Agitador axial de rotación	Diámetro de 22m de material resistente a la corrosión, motor de rotación colocado fuera del reactor.	Se usa en estanques verticales para sustratos con contenido de solidos medios (>10%)	Operación continua ayuda a evitar formación de grandes capas duras flotantes.	Posible formación de capas duras en los bordes del digestor para dimensionamientos incorrectos o velocidades de mezcla inadecuadas.
Agitador excéntrico	Instalación oblicua a través de las paredes del reactor anaerobio, diámetro de hélices entre 0,7 a 2,5 m.	Se usa en estanques verticales para sustratos con contenido de solidos medios (>10%)	Fácil mantención del motor, operación continua ayuda a evitar formación de grandes capas duras flotantes	Debido a su operación estática solo es posible una mezcla insuficiente, especialmente en los bordes del digestor.
Agitador de paletas	Reactores verticales con diámetro de paletas entre 2 a 4 m.	Estanques verticales y reactores de flujo pistón.	Su operación en estanques horizontales posibilita el efecto del flujo pistón.	Mezcla insuficiente en los bordes

Fuente: MINISTERIO DE ENERGIA. Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile (2013). Modificado por autores.

1.2.4 Productos finales en el proceso de digestión. Los principales productos en el proceso de digestión son el biogás y un efluente, que es un residuo orgánico de propiedades fertilizantes el cual puede tener varios usos luego del proceso.

1.2.5 Codigestión. Es la degradación de dos o más residuos mediante el proceso de digestión anaerobia aprovechando la complementariedad de la composición química de los residuos usados; la codigestión en su mayoría contribuye a procesos más estables y un incremento en la producción de biogás.³⁹

1.3 BIOGÁS

El biogás es una mezcla gaseosa compuesta de metano y dióxido de carbono principalmente, y contiene también otras impurezas como puede observarse en la tabla 5. Este gas producto del proceso de digestión, puede aprovecharse por medio de la cogeneración, que es la generación de energía térmica y eléctrica simultáneamente. Dependiendo la cantidad en la producción puede tener usos tales como:

- Red de transporte de gas natural, luego de su purificación.
- Uso en termo tanques y refrigeradoras.
- Generador de calor.

Tabla 5. Composición aproximada del biogás.

COMPONENTE	PORCENTAJE (%)
Metano (CH ₄)	55-70
Dióxido de carbono (CO ₂)	35-40
Nitrógeno (N ₂)	0.5-5
Hidrógeno (H ₂)	1-3

Fuente: SAMAYOA, BUESO, VIQUEZ. Guía implementación de sistemas de biodigestión en ecoempresas (2012)

1.3.1 Producción de biogás según sustrato. La composición y producción de biogás depende del sustrato usado en el proceso (tabla 6) y sus parámetros de operación.⁴⁰

³⁹ AINIA CENTRO TECNOLÓGICO. Valorización energética: producción de biogás mediante codigestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales. Página 6.

⁴⁰ MINISTERIO DE ENERGIA.Op., cit., página16.

Tabla 6. Características y producción de biogás de algunos residuos orgánicos agroindustriales.

RESIDUO	PRODUCCIÓN BIOGAS (m³/Kg SV)
Estiércol	0,20-0,30
Residuos de fruta	0,25-0,50
Restos de alimentos	0,50-0,60
Hojas	0,10-0,30
Jardinería	0,20-0,50
Hierba	0,55

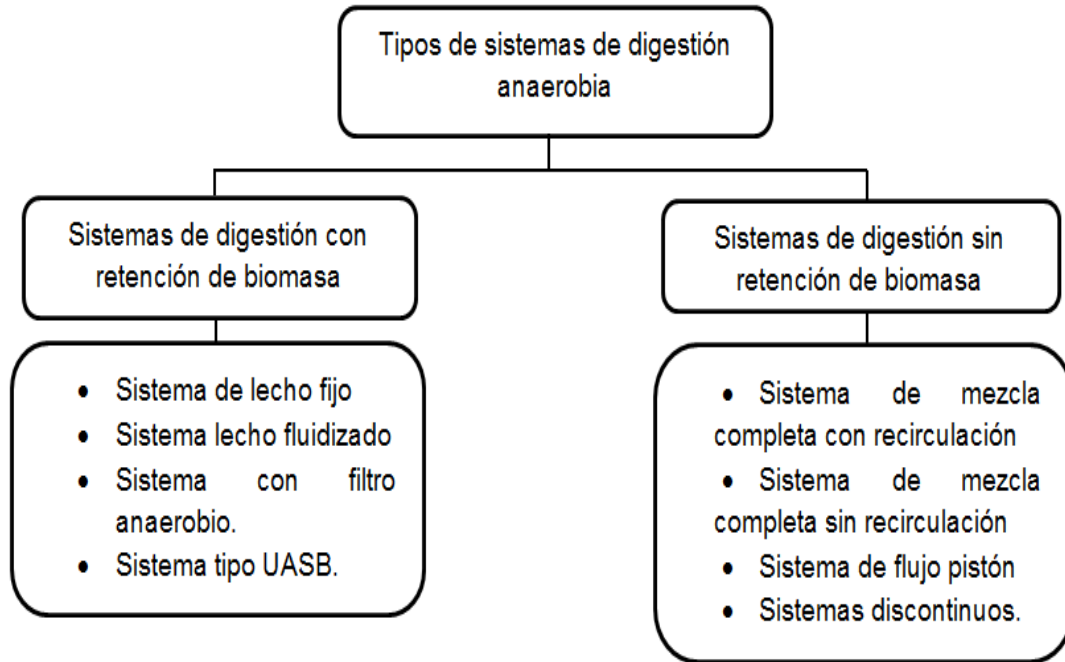
Fuente: AINIA CENTRO TECNOLÓGICO. Valorización energética: producción de biogás mediante codigestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales.

1.4 SISTEMAS DE DIGESTIÓN ANAEROBIA

Son dispositivos totalmente herméticos contruidos de diferentes tamaños y materiales en donde se introduce material orgánico húmedo que es degradado y transformado por microorganismos produciendo el biogás, el cual puede tener un aprovechamiento energético ⁴¹. Generalmente estos sistemas de digestión están conformados principalmente por un punto de carga, el punto de salida del biogás y el punto de salida o descarga. Estos sistemas de digestión pueden variar según el tipo de sustrato y su forma de funcionamiento, en la figura 6 se muestra una de sus clasificaciones.

⁴¹ PACHECO, Sebastián. Construcción y evaluación de un digester anaerobio ara la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco. Universidad Nacional de Colombia. Manizales. 2016. Página.24

Figura 6. Tipos de sistemas de digestión anaerobia según la retención de biomasa.



Fuente: INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. Biomasa: Digestores anaerobios (2007). Modificado por autores.

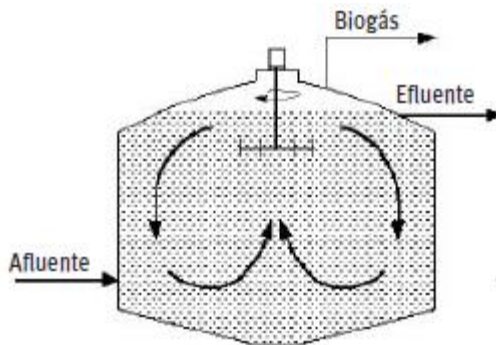
A continuación, se describen las características principales de algunos sistemas de digestión de la clasificación nombrada anteriormente.

1.4.1 Sistemas de digestión sin retención de biomasa.

1.4.1.1 Sistema de mezcla completa. Se denomina de mezcla completa por que el sustrato que se encuentra dentro del sistema digestor se mantiene en una distribución uniforme mediante la implementación de un mecanismo de agitación (figura 7). Este tipo de sistema puede tener recirculación (figura 8) con el fin de mantener las concentraciones del sustrato y a su vez disminuir los tiempos de retención, generalmente se usa este tipo de sistema con recirculación cuando se están tratando aguas residuales⁴².

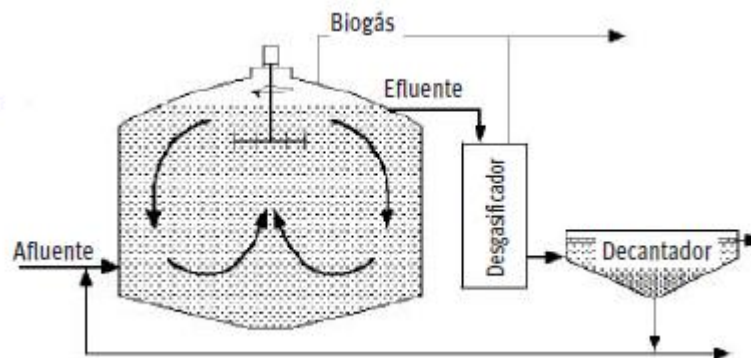
⁴² INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. Biomasa: Digestores anaerobios. Departamento de energía. Madrid (2007). ISBN: 13:978-84-96680-21-0. Página 26

Figura 7. Sistema de mezcla completa sin recirculación.



Fuente: INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. Biomasa: Digestores anaerobios (2007).

Figura 8. Sistema de mezcla completa con recirculación.

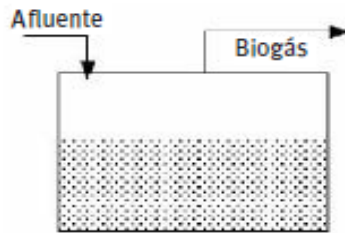


Fuente: INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. Biomasa: Digestores anaerobios (2007).

1.4.1.2 Sistema de discontinuo. La producción de biogás en este tipo de sistemas herméticos depende del ciclo de vida que tengan los microorganismos. El tipo de sustrato que más se ajusta al sistema son aquellos con elevada concentración de sólidos, este tipo de digestores solo se cargan al inicio y sufren una descarga al final del proceso cuando el biogás se ha dejado de producir⁴³.

⁴³ BAUTISTA. Op., cit., página 40.

Figura 9. Sistema de digestión discontinuo.

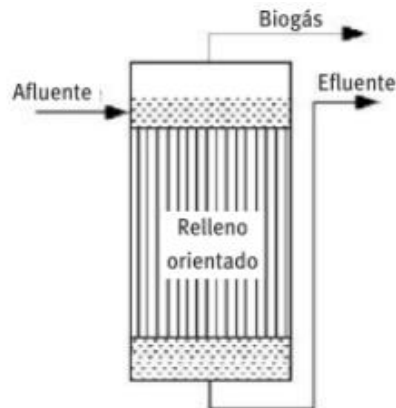


Fuente: INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. Biomasa: Digestores anaerobios (2007).

1.4.2 Sistemas de digestión con retención de biomasa.

1.4.3.1 Sistema de lecho fijo. En este tipo de sistema los microorganismos quedan fijos a una superficie, esta se ubica de manera vertical y la dirección del flujo puede ser ascendente o descendente según el diseño del sistema. Este tipo de sistemas requieren de un elevado tiempo de retención. La figura 10 muestra un esquema del sistema.⁴⁴

Figura 10. Sistema de lecho fijo.



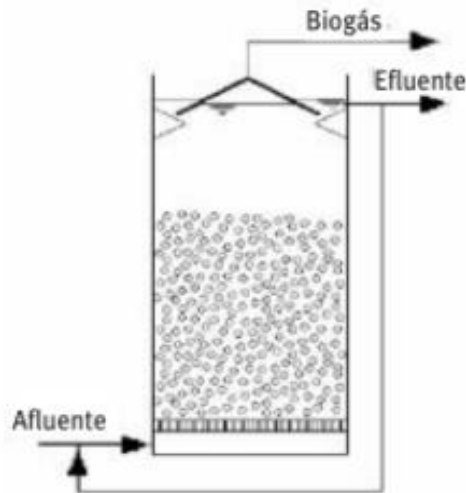
Fuente: INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. Biomasa: Digestores anaerobios (2007).

1.4.3.2. Sistema de lecho fluidizado. Es usado comúnmente en sustratos líquidos, en este caso los microorganismos se encuentran adheridos a partículas de material inerte que puede ser carbón activado granular u otros medios plásticos sintéticos.

⁴⁴ Lbid. Página 26.

Este tipo de sistemas logran mantener estables el caudal ascendente ya que permiten la recirculación y disminuye los tiempos de retención. A continuación en la figura 11 se ilustra un esquema de este tipo de sistemas⁴⁵.

Figura 11. Reactor de lecho fluidizado



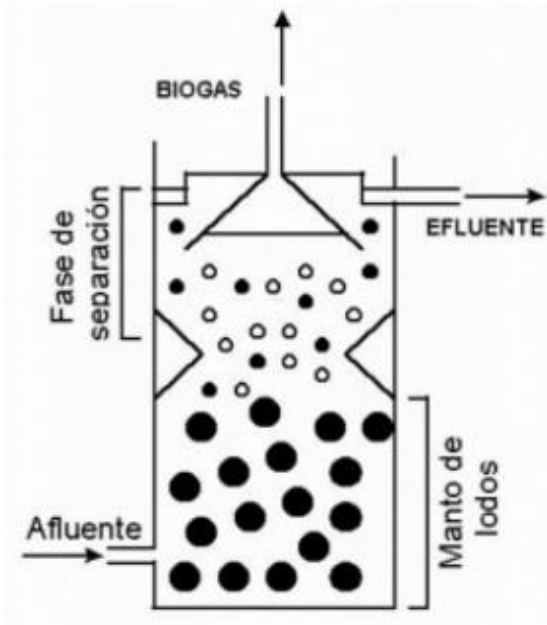
Fuente: INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. Biomasa: Digestores anaerobios (2007).

1.4.3.3. Sistema tipo UASB. Es un sistema de fácil operación, es de régimen estacionario, totalmente herméticos y no sufren cambios bruscos de temperatura. Se utilizan para sustratos con contenido de material orgánico elevado en donde los microorganismos que se encuentran en el afluente se encargan de degradar el material orgánico húmedo y de generar el biogás. Este tipo de sistema es de flujo ascendente, contiene un manto de lodos donde se produce la actividad metabólica logrando que los lodos sedimenten y el gas ascienda. En la siguiente figura se muestran las fases y los elementos de entrada y salida de este tipo de sistema.⁴⁶

⁴⁵ MINISTERIO DE ENERGIA.Op., cit., página 90

⁴⁶ MARQUEZ, Marjiori; MARTINEZ Sergio. Reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA s o UASB) Antalogia. Centro tecnológico de Aragón. 2011. Página 20

Figura 12. Esquema del sistema tipo UASB.



Fuente. MARQUÉZ y MARTÍNEZ. Reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA s o UASB) Antalogia (2011)

Ventajas de los reactores UASB.

- Los costos de implementación son menores en comparación a los otros tipos de biodigestores.
- Si no se implementa agitación mecánica o sistemas de recirculación que requieren de bombeo este tipo de reactor no necesita de energía eléctrica.
- Los lodos se conservan por largos periodos de tiempo y sirve como fertilizantes naturales para las plantas.⁴⁷

Desventajas de los reactores UASB.

- El arranque de la digestión es lento
- Las bacterias inhiben el proceso con facilidad
- Debe ser monitoreado constantemente
- Puede generar malos olores⁴⁸.

⁴⁷ Lbid. página 22.

⁴⁸ Lbid. página 23.

2. METODOLOGÍA

Para la primera parte del proyecto se seleccionará y caracterizará la biomasa residual según su disponibilidad teniendo en cuenta propiedades como humedad y pH, para llevar a cabo la formulación del sustrato que se utilizará en el proyecto. Para llevar a cabo el proceso se realizará el montaje de dos sistemas de digestión anaerobia, de los cuales un sistema tendrá un mecanismo de agitación.

Posteriormente se llevará a cabo el proceso de manera experimental en cada uno de los sistemas de digestión realizando el seguimiento y monitoreo de condiciones como pH y temperatura. Por último, se evaluará la producción y composición de biogás en los sistemas de digestión, teniendo en cuenta el efecto de la agitación. Los sistemas de digestión anaerobia estarán ubicados en la Fundación Universidad de América.

2.1 CARACTERIZACIÓN LA BIOMASA RESIDUAL

Para definir la biomasa residual adecuada para el proceso de digestión anaerobia se tendrá en cuenta la composición bioquímica, disponibilidad y el acceso a esta. Una vez se tenga este primer diagnóstico se deberá realizar acondicionamiento físico a los residuos seleccionados para facilitar la degradación a los microorganismos. Junto a esto se debe tener presente algunas condiciones de los residuos ya seleccionados como la relación carbono/nitrógeno, pH, humedad, son importantes ya que se relacionan directamente con el desarrollo del proceso.

2.1.1 Selección de la biomasa residual. Teniendo en cuenta que los sistemas de digestión estarán ubicados en las instalaciones de la Fundación Universidad de América, se quiere aprovechar un residuo producido en la misma, que tenga propiedades fisicoquímicas adecuadas para el proceso de digestión anaerobia. Se analizarán los residuos presentes en la universidad, teniendo en cuenta cantidad y disponibilidad.

Además de esto se plantea que en la mezcla de sustrato haya un porcentaje de estiércol animal, ya que este aporta la actividad microbiana que llevará a cabo el proceso de degradación, por esta razón se determinará cual es el estiércol a usar en el proceso.

Los criterios que se tendrán en cuenta para seleccionar la biomasa adecuada para el sustrato serán los siguientes:

- Disponibilidad en el lugar o lugares cercanos (estiércol).
- Composición bioquímica teórica.

- Ventajas y desventajas del uso de la biomasa en el proceso.
- Formas de recolección.

2.1.2 Recolección de biomasa residual. Una vez seleccionada la biomasa residual se gestionará la recolección de esta y el traslado al lugar donde estarán ubicados los sistemas de digestión. La recolección cada una de la biomasa residual se hará por medio de un muestreo aleatorio simple en el cual cada elemento de la población tendrá la misma probabilidad de ser recolectado para integrar la muestra.⁴⁹

Para el residuo proveniente de la Fundación Universidad de América se tendrá en cuenta el sistema de separación y recolección de desechos que tenga la universidad para facilitar su colecta. En cuanto al estiércol se obtendrán del lugar más cercano al lugar de operación, este residuo debe ser lo más fresco posible para que su composición no sea alterada por contaminantes y para que en él se encuentre la actividad microbiana necesaria para llevar a cabo el proceso de digestión.

2.1.3 Acondicionamiento de la biomasa residual. Dependiendo el tipo de biomasa residual que se seleccione se deberán realizar un pretratamiento físico con el fin de disminuir el tamaño de partícula del residuo, estas operaciones podrían ser molienda, secado, tamizado, dependiendo del residuo.

Los microorganismos encargados del proceso necesitan un tamaño de partícula entre 2 y 5 mm^{50,51} aproximadamente para realizar la degradación y que el proceso no se inhiba o que el tiempo de retención aumente disminuyendo la producción de biogás.⁵²

2.1.4 Condiciones fisicoquímicas de la biomasa seleccionada. Se debe analizar el pH y la humedad de los residuos antes de realizar la mezcla para garantizar la supervivencia de los microorganismos.

⁴⁹ DÍAZ, Neus. Técnicas de muestreo. Sesgos más frecuentes. Revisa Seden. Página 123. 2006.

⁵⁰ CADAVID, Luz; BOLAÑOS, Vanessa. Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. Energética (2015). Página 25.

⁵¹ CASTILLO Edgar; CRISTANCHO Diego; ARELLANO Víctor. Estudio de las condiciones de operación para la digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos. Página 12. 2003.

⁵² MINISTERIO DE ENERGIA.Op., cit., página 37

2.1.4.1 pH. Este parámetro se medirá a la biomasa seleccionada con un pHmetro una vez sea recolectada, el valor se tendrá en cuenta en los residuos que se seleccionen para llevar a cabo el proceso y así poder definir si al realizar el sustrato generaran cambios drásticos en el pH, ya que estos cambios pueden afectar a los diferentes equilibrios químicos existentes en el proceso. El valor del pH no solo determinará la producción del biogás sino también su composición.⁵³

2.1.4.2 Humedad. Se determinará la humedad de la biomasa seleccionada para el sustrato por método de prueba estándar para la determinación de humedad según la norma ASTM D-2216-98 y calculándola con la ecuación 1. Para que existan microorganismos presentes en el residuo y se lleve el proceso de digestión anaerobia se requiere que el contenido de humedad que esté presente en al menos uno de ellos sea superior al 60%⁵⁴.

Ecuación 1. Porcentaje de humedad de la poda

$$W = \left(\frac{Mcws - Mcs}{Mcs - Mc} \right) * 100 = \frac{Mw}{Ms} * 100$$

Fuente: Comité ASTM D-18 sobre Suelo y rocas

Donde:

W = Contenido de humedad en %

$Mcws$ = Peso del recipiente y el espécimen húmedo en gramos

Mcs = Peso del recipiente y el peso del espécimen secado en gramos

Mc = Peso del recipiente en gramos

Mw = Peso del agua ($Mw = Mcws - Mcds$) en gramos

Ms = Peso de las partículas sólidas ($Ms = Mcds - Mc$) en gramos

2.2 MONTAJE DE LOS SISTEMA DE DIGESTIÓN

Este proyecto tendrá dos sistemas de digestión en los que se llevara a cabo el proceso, los sistemas serán totalmente iguales solo se diferenciaran porque uno tendrá un mecanismo de agitación.

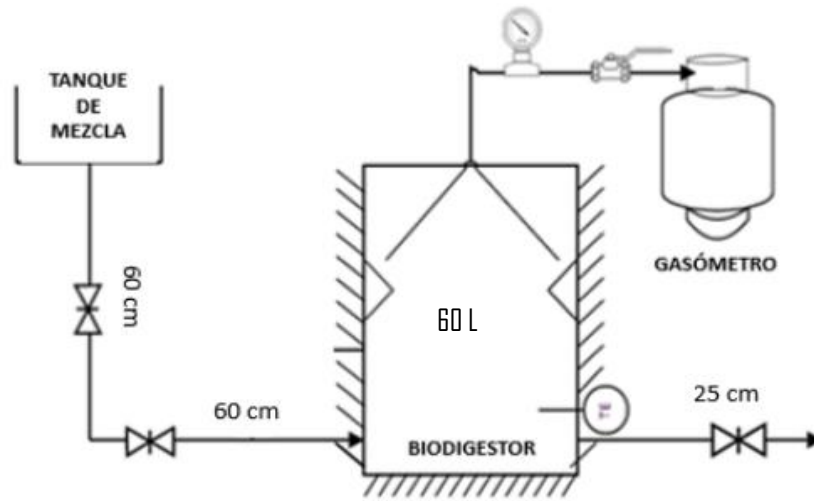
2.2.1 Diseño para la construcción del sistema de digestión. Para el diseño y la construcción de los sistemas de digestión del proyecto se toma como referencia el diseño empleado en el proyecto "Desarrollo de una propuesta para la mejora de un modelo de biodigestor anaerobio convencional a escala banco a partir de una

⁵³ MARTÍ. Op., cit., página 11.

⁵⁴ SECRETARIA DE ENERGÍA. Op., cit., página 7.

mezcla de residuos bovinos y lodos en la finca el recodo de Tabio, Cundinamarca”⁵⁵ donde se realizó un diseño de dos sistemas de digestión de un prototipo de un reactor UASB; este dimensionamiento será el utilizado para el diseño y montaje de los sistemas del este proyecto. En la figura 13 se puede observar el diagrama de proceso de los sistemas de digestión usados en el proyecto nombrado.

Figura 13. Diagrama de proceso con sistema de estabilización de temperatura.



Fuente: BERNAL Y QUINTERO. 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 (2015).

A partir de este diseño base se realizarán ajustes que contribuyan al control del proceso y a la producción de biogás, teniendo en cuenta algunas de las recomendaciones realizadas en el proyecto de Bernal Y Quintero. Las dimensiones y materiales que se usarán para la construcción de los nuevos sistemas serán los especificados y usados en el mismo.

2.2.2 Modificaciones al diseño base. Las modificaciones que se desean implementar en el diseño de los sistemas son en cuanto a:

⁵⁵ BERNAL, Daniela; QUINTERO, Daniela. 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. Bogotá D.C. Fundación Universidad de América. 2015.

- **Puntos de muestreo:** En cada sistema se busca implementar 3 puntos diferentes de muestreo. Se ubicarán de forma que estén a la altura del volumen de tanque que está cargado con la mezcla de sustrato (70%)⁵⁶, con el fin de poder tomar muestra de este a lo largo del proceso.
- **Recolección de biogás:** En este proyecto no se utilizarán gasómetros para la recolección del biogás producido por cuestión de costos y disponibilidad. Se seleccionará otro sistema para la recolección del gas.
- **Agitación:** Se elegirá a partir de los mecanismos de agitación más utilizados para procesos de digestión anaerobia en diferentes estudios. Esta modificación es la principal, ya que con el fin observar el efecto de este parámetro, solo en uno de los dos sistemas se agregará un mecanismo de agitación que mejor favorezca al proceso en aspectos microbiológicos y estructurales.

2.2.3 Partes de los sistemas de digestión. Cada parte de los sistemas de digestión tiene una función específica, y funcionan como se describe a continuación.

2.2.3.1 Instrumentos de medición. Estos instrumentos tendrán contacto directo con el sustrato y el biogás producido, y serán de gran importancia para llevar el monitoreo del proceso. Los instrumentos que se usaran son los nombrados a continuación, cuyas especificaciones estarán en el anexo B una vez sean seleccionados:

- **Termómetro:** Se adaptarán termómetros en cada uno de los sistemas para la medición directa de la temperatura del interior, el tipo de termómetro se escogerá de forma que facilite su adaptación al sistema.
- **Manómetros:** Se adaptarán manómetros en la salida del biogás para medir si hay variación de la presión dentro de los sistemas.
- **Válvulas:** Se elegirán válvulas para estar ubicadas en cada uno de los puntos de muestreo, las que puedan permitir la salida de la muestra que se quiere tomar sin perder la hermeticidad. Se seleccionarán otras válvulas para controlar la salida del gas de los sistemas.

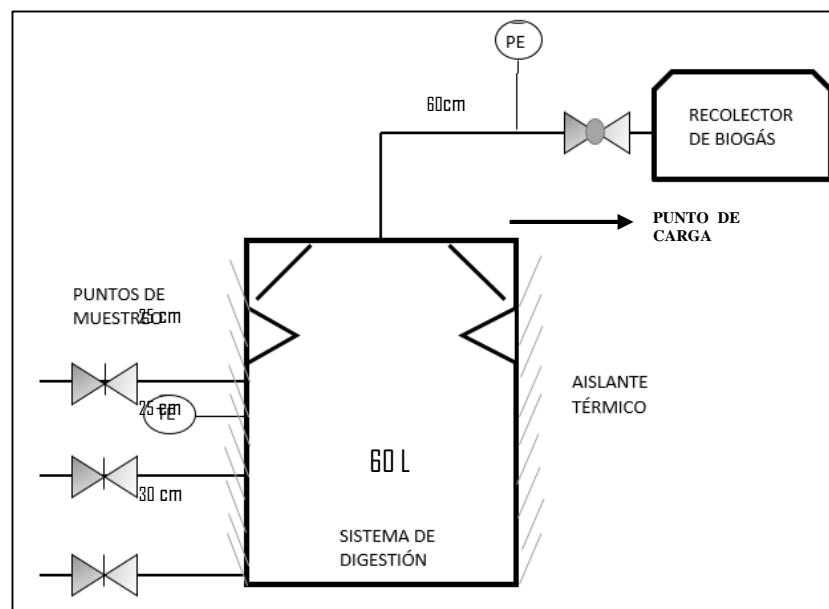
⁵⁶ GARCIA, Emilio; CORACE, Juan; YANK, Lisandro. Digestión anaerobia de virutas y aserrín de maderas utilizadas en la región chaqueña. Universidad Nacional de Nordeste. Grupo de investigación en Energías Renovables (GIDER). Chaco, Argentina .2005. Página 3

2.2.3.2 Mecanismo de agitación. Será el encargado de la mezcla y homogenización del sustrato; dependiendo del mecanismo de agitación previamente seleccionado como se especifica en la sección 2.2.2, se establecerá como va implementado estructuralmente en el sistema y su funcionamiento.

2.2.3.4 Recolección de gas. Se realizará el almacenamiento del biogás producido en un recolector que sea resistente, el cual sea totalmente sellado y no presente posibilidad de escape. Dependiendo el tamaño del recolector, si es necesario cambiar o reemplazarlo, se contará con una válvula que controlará la salida de biogás mientras se añade un nuevo recolector.

2.2.4 Construcción de los sistemas de digestión. Una vez identificadas cada una de las partes de los sistemas incluyendo las modificaciones, se puede proceder a la construcción de los sistemas de digestión. Los materiales e instrumentos que se usarán para la construcción son los especificados en el proyecto de BERNAL y QUINTERO, se usará el mismo tipo aislamiento térmico y las mismas dimensiones⁵⁷. En las figuras 14 y 15 se presenta el esquema de los sistemas de digestión con las modificaciones a partir del diseño de BERNAL y QUINTERO, sin agitación y con agitación.

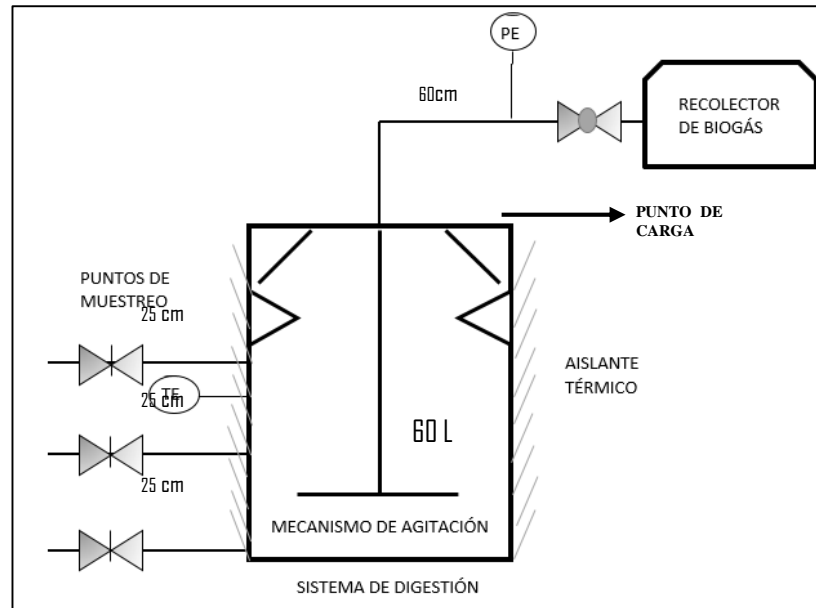
Figura 14. Esquema del sistema de digestión anaerobia sin agitación



Fuente: Elaboración propia.

⁵⁷ BERNAL. Op., cit., página 45.

Figura 15. Esquema del sistema de digestión anaerobia con agitación



Fuente: Elaboración propia.

2.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN Y FORMULACIÓN DEL SUSTRATO

Para llevar a cabo el proceso de digestión anaerobia se realizarán cálculos respecto a la cantidad de cada residuo según el volumen del sistema, se establecerán cuáles serán las condiciones de operación a lo largo del proceso, las cuales ayudan a mantener el monitoreo sobre la operación de los sistemas. Por otro lado, Se realizará la formulación de sustrato con las cantidades previamente calculadas, para luego ser analizadas en laboratorio la cantidad de sólidos, demanda química de oxígeno y relación C/N.

2.3.1 Formulación del sustrato. Se refiere a la cantidad de biomasa que hará parte del sustrato, este sustrato estará compuesto por los dos tipos de biomasa seleccionada en la sección 2.1.1, estas cantidades dependerán directamente del volumen de los sistemas que obedecen al diseño y dimensionamiento nombrado en la sección 2.2.1.

Se debe tener en cuenta que el 70% del volumen del sistema deberá estar cargado con el sustrato y el otro 30% deberá ser espacio libre⁵⁸, de acuerdo con estos valores se tienen las siguientes ecuaciones para calcular estos volúmenes.

⁵⁸ GARCIA. Op., cit., página 3.

Ecuación 2. Volumen contenido de aire dentro del sistema de digestión.

$$V_{vac} = V_t * 0,30$$

Fuente: GARCIA, CORACE, YANK. Digestión anaerobia de virutas y aserrín de maderas utilizadas en la región chaqueña (2005). Modificado por autores.

Dónde:

V_{vac} = volumen vacío dentro del sistema

V_t = volumen total del sistema.

0,30 = equivale al 30% de espacio libre dentro del sistema.

Ecuación 3. Volumen contenido dentro del sistema de digestión del sustrato.

$$V_{sus} = V_t * 0,70$$

Fuente: GARCIA, CORACE, YANK. Digestión anaerobia de virutas y aserrín de maderas utilizadas en la región chaqueña (2005). Modificado por autores.

Dónde:

V_{sus} = volumen del sustrato contenido dentro del sistema.

V_t = volumen total del digestor.

0,70 = equivale al porcentaje para el material orgánico dentro del sistema.

Una vez calculado el volumen del sistema que debe ir ocupado por el sustrato, se deberá calcular el volumen de biomasa y agua que lo conformaran, teniendo en cuenta que la relación de mezcla debe ser 1:3.⁵⁹ Organizando esta información, se plantean las siguientes ecuaciones:

Ecuación 4. Cantidad de agua contenida en el sistema de digestión.

$$V_{Agua} = (V_{sus} / 4) * 3$$

Fuente: BERNAL Y QUINTERO. 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 (2015). Modificado por autores.

Dónde:

V_{Agua} : Volumen de agua contenido en el sistema.

⁵⁹ BERNAL. Op., cit., página 40.

V_{sus} : Volumen del sustrato.

4: Cuatro partes del sistema de digestión.

3: Tres partes de agua.

Ecuación 5. Cantidad en mezcla de biomasa contenida en el sistema de digestión.

$$V_{bio} = (V_{sus} / 4) * 1$$

Fuente: BERNAL Y QUINTERO. 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 (2015). Modificado por autores.

Dónde:

V_{bio} : Volumen de la biomasa

V_{sus} : Volumen del sustrato

4: Cuatro partes del sistema de digestión

1: Una parte de biomasa residual

2.3.2 Parámetros fisicoquímicos del sustrato inicial. Luego de la preparación del sustrato con los volúmenes calculados en las ecuaciones 3 y 4 se analizarán los siguientes parámetros fisicoquímicos:

2.3.2.1 Temperatura de sustrato inicial. Se medirá la temperatura inicial del sustrato con la cual es alimentado a los sistemas de digestión, este parámetro se tomará como indicador para definir el tiempo de retención dentro de los sistemas. Por otro lado, la temperatura interna depende de la temperatura del lugar de ubicación y si estas aumentan hacen que la solubilidad dentro del sistema aumente también, así como la degradación de sales permitiendo la aceleración del proceso.⁶⁰

Los siguientes parámetros fisicoquímicos serán analizados en el laboratorio AGRILAB con los respectivos métodos especificados en cada uno.

2.3.2.2 Relación C/N. Esta relación que tiene el sustrato se medirá por medio del método de Walkley-black y Micro-Kjeldahl (NTC 5167) en el laboratorio nombrado, los niveles aceptables para un proceso de digestión anaerobia deben ser 30 veces

⁶⁰ MARTÍ. Op., cit., página 12.

en mayor cantidad de carbono que de nitrógeno⁶¹ para asegurar una degradación eficiente por parte de los microorganismos y evitar la inhibición del proceso.

2.3.2.3 Sólidos suspendidos totales. Se realiza la medida de sólidos totales suspendidos en el residuo por medio del método gravimétrico mediante el método analítico SM 2540 D, para procesos anaerobios este rango debe mantenerse entre 100 y 200 mg/L⁶² ya que este tipo de partículas retardan la degradación y por ende el tiempo de retención de la biomasa dentro de los sistemas de digestión. Los sólidos hacen que el sustrato se estratifique según su contenido, generalmente se producen tres fases diferentes.⁶³

2.3.2.4 Sólidos totales. Se medirá por el método gravimétrico mediante el método analítico SM 2540 B, es necesario determinar este parámetro debido a que una elevada carga de sólidos limita la movilidad y el crecimiento de los microorganismos dentro del reactor. Una de las formas para nivelar este tipo de carga es realizando un pretratamiento adecuado a los residuos que disminuya el tamaño de partícula y adicionar agua suficiente que logre diluir estos sólidos en la mezcla antes de ser introducidos al sistema de digestión y así llegue a un rango aproximado de 8 a 15% de concentración de sólidos totales.

2.3.2.5 Demanda química de oxígeno (DQO). Este parámetro se medirá por el método colorimétrico/ASTMD1252/12, método B, es un indicador teórico de cuanto metano se puede producir al finalizar el proceso, este parámetro determina la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar la materia orgánica contenida en el sustrato, por otro lado los niveles recomendados para el proceso anaerobio oscilan alrededor de los 1500 y 2000 mg/L para que el proceso sea eficiente y favorezca a la producción de metano⁶⁴.

2.3.3 Condiciones de operación. Se establecerán los rangos de las condiciones dentro de las cuales se estará llevando a cabo el proceso.

- **Temperatura.** Se establecerá un rango dentro del cual estará la temperatura del sustrato a lo largo del proceso, este rango dependerá directamente de la temperatura ambiente. La temperatura es un indicador directo de las reacciones que se presentan dentro de los sistemas de digestión y por ende de la actividad microbiana, se conoce que el proceso anaerobio es más eficiente a temperaturas

⁶¹ GUEVARA, Antonio; Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. Lima. 1996. página 15.

⁶² MARQUÉZ.Op., cit., página 10

⁶³ LINDMARK, Johan; THORIN, Eva; BEL, Rebei; DAHLQUIST, Erik. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. Renewable and sustainable energy reviews 40. 2014. 1030-1047. Página 1038.

⁶⁴ Lbid. página 9.

termofílica, aumentar la temperatura dentro de los sistemas de digestión implicaría el aumento de los costos en fuentes de energía externas.⁶⁵

- **pH.** El valor del pH variará según la etapa en la que se encuentra el proceso, se establecerá un rango dentro del cual deben estar los valores y la frecuencia en la que será medido; este parámetro determina la composición del biogás pues si este se acerca a la acidez, el biogás que se produce es pobre en metano y si se acerca a la alcalinidad se genera amoníaco lo que puede detener el proceso de degradación y por ende la producción de biogás⁶⁶. El valor del pH también afecta el equilibrio químico de las reacciones logrando que algunas veces se desestabilice y genere productos que pueden ser contaminantes para el sistema y afectar el crecimiento de los microorganismos.
- **Velocidad y frecuencia de agitación.** Se establecerá según el mecanismo de agitación seleccionado para el sistema especificado en la sección 2.2.1.1. La agitación se empleará a una velocidad determinada que favorezca la homogeneidad del sustrato, prevenga la sedimentación, permita el contacto de los microorganismos con el lodo y mantenga la temperatura uniforme en el digestor⁶⁷. Esta velocidad se establecerá según resultados y bibliografía de diferentes estudios y procesos de digestión anaerobia con el efecto de agitación.
- **Tiempo de retención.** Dependerá directamente del comportamiento de la temperatura del sustrato no del caudal de entrada o del volumen del sistema como en el caso de los sistemas con alimentación continua. debido a esto se puede calcular por medio de la ecuación 5. Por otro lado, en la tabla 7, se muestra la relación que existe entre la fermentación microbiana y el efecto de la temperatura.⁶⁸

Ecuación 6. Tiempo de retención aproximado en los sistemas.

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

Fuente: UPME. Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. 2003

Dónde:

Ln : Logaritmo natural

⁶⁵ CHAVEZ, Iván; OVIEDO, Daniel. Desarrollo de la ingeniería básica para la producción de biogás a partir de desechos orgánicos en la finca Tibamox. Bogotá D.C. Fundación Universidad de América. 2009. Página 37

⁶⁶ MARTI. Op., cit. página 11.

⁶⁷ Lbid. Página 15

⁶⁸ CHAVEZ. Op; cit. página 30

T °C : Temperatura en grados Celsius

Tabla 7. Relación entre periodo de fermentación y la temperatura

TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (Días)
8	120
10	90
15	55
20	40
25	25
37	18

Fuente: CHAVEZ. Desarrollo de la ingeniería básica para la producción de biogás a partir de desechos orgánicos en la finca Tibamox. (2009)

2.4 PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA

Una vez se tengan ya los sistemas de digestión construidos, probados y la mezcla del sustrato ya preparado con su respectiva formulación, se procede a empezar la parte experimental del proyecto, es decir, iniciar el proceso de digestión anaerobia.

2.4.1 Evaluación de la actividad microbiana. El proceso depende de los microorganismos presentes en el sustrato, para asegurarse de que el sustrato posea la actividad microbiana necesaria para llevar a cabo el proceso, se deberá realizar la evaluación cualitativa por medio de cultivos.

Desde el inicio del proceso se realizará el monitoreo de la temperatura y pH según los rangos y frecuencias especificados en la sección 2.3.3, para saber cómo se está llevando a cabo. Registrando el monitoreo se podrá obtener los diferentes perfiles de comportamiento a lo largo del proceso.

2.4.2 Perfil temperatura. La temperatura será registrada cada cuatro días aproximadamente a partir de la medición entregada por los termómetros bimetálicos ubicados en cada uno de los sistemas. Se ilustrará el comportamiento de la temperatura interna de cada uno de los sistemas de digestión con respecto al tiempo de retención.

2.4.3 Perfil pH. Se tomará una muestra del sustrato contenido en cada uno de los sistemas cada cuatro días, para medir directamente el valor del pH con un pHmetro para luego ilustrar el comportamiento del pH con respecto al tiempo de retención.

2.4.4 Parámetros fisicoquímicos del sustrato. En el día 90 del proceso se tomarán en cada uno de los sistemas de digestión muestras del sustrato para que sean analizadas en el laboratorio AGRILAB por los mismos métodos analíticos en los que se analizó el sustrato inicial. Se analizarán sólidos suspendidos totales, sólidos totales, demanda química de oxígeno. Teniendo los resultados de los análisis de sustrato en el día 90, se compararán con los resultados del análisis del sustrato inicial, y así contrastar la diferencia.

2.5 COMPARACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LOS SISTEMAS

Cuando el proceso este finalizando se analizará el biogás que estará en los recolectores que fue producido en cada uno de los sistemas de digestión y así poder comparar estas dos producciones.

2.5.1 Cromatografía. El análisis cromatográfico se realizará en el laboratorio de la Universidad Nacional utilizando un cromatógrafo HP 5890, una columna 13X y detector TCD (150°) utilizando helio como gas de arrastre. Se realizará al biogás producido almacenado en sus respectivos recolectores en los sistemas de digestión, con el fin de que sea evaluada su respectiva composición y cantidad.

2.5.2 Análisis estadístico. Este análisis se realizará por medio de un ANOVA, con el fin de comparar el efecto que el mecanismo de agitación tiene sobre los parámetros del proceso en cada uno de los sistemas. Según los resultados de este análisis estadístico, se podrá determinar la influencia de la agitación estadísticamente en el proceso de digestión anaerobia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a lo largo del proceso desde la caracterización de biomasa hasta la producción de biogás.

3.1 CARACTERIZACIÓN LA BIOMASA RESIDUAL

En esta sección se mostrará el procedimiento que se realizó para obtener la mezcla de sustrato. Desde la selección de los tipos de biomasa hasta el acondicionamiento de esta para posteriormente hacer la formulación del sustrato.

3.1.1 Selección de la biomasa residual. Para llevar a cabo el proceso de digestión se usaron dos tipos de biomasa residual para la mezcla de sustrato, la primera se seleccionó de los residuos de la Fundación Universidad de América y la segunda estiércol animal.

Debido a que los sistemas de digestión están ubicados en la Fundación Universidad de América, se generó interés en los residuos producidos y su aprovechamiento. Para la selección de un tipo de residuo se tuvieron en cuenta tres tipos diferentes evaluando los criterios ya establecidos en la sección 2.1.1.

3.1.1.1 Selección del residuo proveniente de la Fundación universidad de América. El primer tipo de residuo que se tuvo en cuenta para la selección fueron los desechos orgánicos, ya que en la institución se implementa un sistema de separación de residuos en la que está incluido la recolección separada de este tipo de desecho lo que facilita el acceso a este.

El segundo residuo que se tuvo en cuenta en la evaluación fue la poda, esta poda es proveniente del césped cortado. La principal característica por la que este residuo se eligió para ser evaluado es porque la institución cuenta con amplias zonas verdes que producen el residuo y por lo cual se tienen que recolectar de manera periódica y constante.

Y por último, los desechos de jardinería, estos se refieren a todo tipo de ramas, partes de tronco y hojas secas de los árboles, que se desprenden de forma natural.

A continuación, en el cuadro 3, se muestran las principales características de cada uno de los residuos nombrados anteriormente.

Cuadro 4. Características de la biomasa residual.

Tipo de residuo	Desechos orgánicos	Poda	Residuos de jardinería
Composición (1)	No hay composición específica debido a que el tipo de desechos es variable.	Lípidos 8,05% Proteínas 4,94 % Celulosa 57,22% Lignina 9,8% Ceniza 19,99%	Lípidos 4,01% Proteínas 3,47% Celulosa 32,78% Lignina 29,66% Ceniza 10,30%
Disponibilidad	Los desechos se recolectan diariamente de todas canecas ubicadas en la universidad.	Semanalmente, ya que es cuando se realiza la poda en la zonas verdes de la universidad.	No es constante, depende factores climáticos y naturaleza de los árboles.
Ventajas (2)	Producción de biogás: 0,25-0,50 [m3. Kg-1 SV] Potencial energético: 91,72 (TJ/año)	Producción de biogás: 0,55 [m3. Kg-1 SV] Potencial energético: 318,13 (TJ/año)	Producción de biogás: 0,10-0,45 [m3. Kg-1 SV] Potencial energético: No registra
Desventajas (3)	Acidificación, sedimentos.	Acidificación,	Baja biodegradabilidad
Forma de recolección	Bolsas plásticas directamente de las canecas.	Bolsas plásticas luego de la poda.	Recolección directa del suelo.

Fuente: (1) MINISTERIO DE ENERGIA. Manual del biogás (2011) (2) CADAVID. Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. (2015); (2) (3) AINIA CENTRO TECNOLÓGICO. Valorización energética: producción de biogás mediante codigestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales.

Con ayuda de la información mostrada en el cuadro anterior con respecto a cada residuo disponible en la Fundación Universidad de América, se seleccionó el residuo conveniente para el proceso de digestión anaerobia que es el residuo de poda.

Este residuo se seleccionó principalmente porque debido a su potencial energético y su rica composición en carbono favorece a la producción de biogás, de igual manera su composición tiene polímeros como: celulosa, hemicelulosa y lignina⁶⁹. La relación C/N de la poda, en promedio corresponde a 25 siendo un valor favorable para el proceso de digestión, aunque tenga un pH ácido debido a que en su composición tiene ácido láctico, ácido acético y ácido butírico.⁷⁰ Por otro lado, el acceso a la poda se facilita debido a los servicios de jardinería implementados en la institución, haciendo factible la recolección de está. Además, el acondicionamiento de este residuo puede realizarse en equipos ubicados en la Fundación Universidad de América.

Adicionalmente, los otros residuos que se tuvieron en cuenta para la selección no favorecen al proceso debido a que, por ejemplo, los desechos orgánicos presentan diversidad en composición y tamaño de partícula, lo que con llevaría a más de un proceso adicional para su acondicionamiento y separación de los desechos que serían útiles para el proceso. Por otro lado, los residuos de jardinería presentan una composición significativa de lignina como se muestra en el cuadro 3, la degradación de este compuesto se da por medio de enzimas producidas por microorganismos aerobios; este tipo de residuos con alto contenido de lignina son aprovechables por medio de procesos termoquímicos.⁷¹

3.1.1.2 Selección del estiércol animal. La segunda selección, se hizo para determinar el tipo de estiércol animal, con base en los mismos criterios que la selección anterior.

Se definió que el estiércol que se usaría en el sustrato sería la de bovino, este estiércol tiene una relación C/N aproximada a la que se debe manejar en el proceso (30/1) teniendo en cuenta que esta debe ser de 30 veces porcentaje en carbono en 1 de nitrógeno⁷². Este estiércol fue el encargado de aportar la actividad microbiana

⁶⁹ ARISTIZABAL. Op., cit., página 31.

⁷⁰ TSAPEKOS, P; KOUGIAS, P.G; EGELUND; LARSEN, U; PEDERSEN, J; TRENEL. P. Improving the energy balance of grass-based anaerobic digestion through combined harvesting and pretreatment. Anaerobe (2016). Página 2.

⁷¹ SECRETARIA DE ENERGÍA. Op., cit., página 7.

⁷² GUEVARA. Op., cit., página 15.

a la mezcla del sustrato, además que los microorganismos presentes en este residuo son capaces de degradar en su mayoría al otro residuo seleccionado para la mezcla del sustrato, es decir el residuo de poda. El nitrógeno se encuentra en un 70% soluble en el estiércol, del cual 30% está en forma de urea y amoníaco, y un 20% en forma de proteína.⁷³ Otro de los factores para usar el estiércol es que, en el proyecto llevado a cabo por BERNAL y QUINTERO, realizado dentro del grupo de investigación de energías alternativas, se usó excretas de bovino para la producción de biogás obteniendo 58,3% de metano en la composición del gas; estos resultados servirían como punto de comparación en la producción de biogás de este proyecto.

3.1.2 Recolección de biomasa residual. Una vez se seleccionó la poda y el estiércol de bovino como la biomasa del sustrato en el proceso, se procedió a la recolección de estas.

3.1.2.1 Recolección del residuo de poda. La poda, en la Fundación Universidad de América, está disponible semanalmente en la institución ya que es cuando se llevan a cabo los servicios de jardinería. Esta poda de césped se recolecta la misma semana en que se realizaría la preparación del sustrato, ya que se necesitaba que estuviera lo más fresca posible.

La poda se recolectó en una bolsa e inmediatamente fue cortada. Se recolectaron 3 kg de poda por método de muestreo aleatorio simple como se especificó en la sección 2.1.2. Una vez fue recolectada se dispuso a su acondicionamiento.

Ilustración 1. Poda de césped recolectada en la Fundación Universidad de América.



Fuente: Elaboración propia.

⁷³ CARO, Ángela. Desarrollo del proceso de producción de biogás a nivel de planta piloto a partir de residuos orgánicos generados en el frigorífico Ble Ltda. Fundación Universidad de América. Bogotá. 2014. Página 34.

3.1.2.2 Recolección del estiércol de bovino. Para esta recolección se tuvieron en cuenta lugares los siguientes lugares en los que se podía disponer de esta biomasa:

- **Frigorífico Guadalupe (Efege):** Planta con servicios en ferias ganaderas, beneficios ganado vacuno y porcino, y central de carnes. Ubicado en Autopista Sur # 66 – 78, Bogotá.⁷⁴
- **Zonas rurales:** Se refiere a zonas cercanas a Bogotá en donde se encuentre y haya crianza de ganado bovino, como lo es Mosquera, Facatativá, Funza, Choachi, La Calera y Subachoque.
- **Frigorífico Ble Ltda.:** Planta especializada en el sacrificio y faenado de ganado porcino y bovino, también ofrece servicios como salas de desposte y empaque al vacío. Ubicado en la Av. Ciudad de Cali con calle 13, Bogotá.⁷⁵

Finalmente se determinó que el estiércol de bovino se recolectaría en el Frigorífico Ble Ltda., debido a la cercanía al lugar en donde estarían los sistemas de digestión y principalmente porque permitían el acceso al lugar para la recolección del estiércol. La recolección se llevó a cabo el mismo día en que se realizaría el sustrato, es decir el 15 de febrero de 2018 en horas de la mañana, ya que se necesitaba el estiércol lo más fresca posible. El estiércol se recolectó en dos bidones iguales (ilustración 2), cada uno de 5 galones, es decir se recolectó 37,86 litros aproximadamente por método de muestreo aleatorio simple como se especificó en la sección 2.1.2. Una vez recolectada, se transportó inmediatamente a la Fundación Universidad de América, para posteriormente realizar el sustrato.

Ilustración 2. Estiércol de bovino recolectado en el Frigorífico Ble Ltda.



Fuente: Elaboración propia.

⁷⁴ Frigorífico Guadalupe, [Citado el 16 de abril del 2018] Disponible en internet :<
<http://www.efege.com/#>>

⁷⁵ Frigorífico Ble Ltda., [Citado el 16 de abril del 2018] Disponible en internet :<
<http://www.frigorificosble.com/>

3.1.3 Acondicionamiento de la biomasa residual. Para realizar el sustrato se necesita que la biomasa tenga tamaño de partícula entre 2 y 5 mm para favorecer a la degradación por parte de los microorganismos como se nombró en la sección 2.1.3. El estiércol de bovino no necesita ningún tipo de acondicionamiento físico, esto debido a que se recolectó lo más fresca posible, lo que hace que este en un estado casi líquido (lodo) y además de no tener en su composición ningún sólido.

3.1.3.1 Acondicionamiento del residuo de poda. A diferencia del estiércol, al residuo de poda se le debió realizar un acondicionamiento físico antes de realizar el sustrato. Luego de su recolección, para que se facilitara la disminución de tamaño de partícula se utilizó el molino de la Fundación Universidad de América. Esta molienda se realizó con el fin de liberar de las incrustaciones de lignina las sustancias factibles de ser transformadas en el proceso de digestión⁷⁶; ya terminado el acondicionamiento, la poda esta lista para la realización del sustrato.

3.1.4 Condiciones fisicoquímicas de la biomasa seleccionada. Para llevar el control del proceso incluso antes de iniciarlo, se analizaron cada uno de los parámetros descritos a continuación.

3.1.4.1 pH. Este parámetro se determinó para la biomasa que se usó para preparar el sustrato, es decir al residuo de poda y al estiércol de bovino. Para el estiércol de bovino se midió directamente con un pHmetro antes de ser mezclado, obteniendo un valor de pH de 7,3. El residuo de poda se trituró hasta obtener una mezcla sólido-líquido para así medir directamente el valor de pH con el pHmetro obteniendo un valor de 6,24. Estos valores de pH varían en el momento de realizarse la mezcla de sustrato.

3.1.4.2 Humedad. Esta condición para la biomasa que se seleccionada para el sustrato debe ser superior al 60% como se especificó en la sección 2.1.2.1, para la poda, este parámetro se determinó por método de prueba estándar para la determinación de humedad según la norma ASTM D-2216-98 y los resultados obtenidos según el procedimiento de la norma se reemplazaron en la ecuación 1 como se muestra a continuación:

$$W = \left(\frac{97,1788g - 89,6116g}{89,6116g - 78,82930g} \right) * 100 = 70,18\%$$

Obteniendo como resultado un 70,18% de contenido de humedad para el residuo de poda seleccionado y recolectado en la Fundación Universidad de América, siendo este porcentaje superior al necesario para el proceso de digestión. Por otro lado, el estiércol bovino se encontraba en estado casi líquido por lo que la humedad se determinó por un método utilizado en el compostaje denominado “método del

⁷⁶ MINISTERIO DE ENERGIA.Op., cit., página 30

puño”⁷⁷ obteniendo como resultado una humedad <80% a partir del líquido liberado al ejercer presión en un “puñado” de muestra; estos porcentajes de humedad dan lugar a las zonas de anaerobiosis favoreciendo el proceso y la producción de biogás.⁷⁸

3.2 MONTAJE DE LOS SISTEMA DE DIGESTIÓN

Para llevar a cabo este proyecto se necesitó tener dos sistemas de digestión anaerobia, la diferencia entre estos sistemas fue un mecanismo de agitación que se le implementó solo a uno. En esta sección se mostrará como fue el diseño y construcción de cada uno de los sistemas y el funcionamiento de cada una de sus partes.

3.2.1 Ajuste de diseño del sistema de digestión. El diseño en el cual se basó la construcción de los nuevos sistemas de digestión fue el diseño del proyecto nombrado en la sección 2.2.1. A continuación en la tabla 8 se muestra cuáles fueron las dimensiones, materiales, instrumentos y especificaciones usadas en ese proyecto, y la ilustración 3 se puede observar dicho sistema

Tabla 8. Dimensiones de los sistemas de digestión base.

Diámetro de la tapa	60cm
Altura del sistema	60cm
Ancho	40cm
Volumen del sistema	60L

Fuente. BERNAL Y QUINTERO. 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 (2015). Modificado por autores.

En el proyecto nombrado se usaron gasómetros para la recolección del biogás producido y para estas dimensiones se usó un aislante térmico con el fin de estabilizar la temperatura, este aislante es la espuma rígida de poliuretano. Con esta

⁷⁷ ROMÁN, Pilar; MARTÍNEZ, María; PANTOJA, Alberto. Manuela del compostaje del agricultor. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Santiago de Chile. Página 56.

⁷⁸ Lbid. Página 27.

espuma se realizó un recubrimiento completo de todo el sistema. Para los nuevos sistemas de digestión también sería usado este tipo de aislamiento. Los materiales e instrumentos usados en ese diseño están especificados en el anexo A.

Ilustración 3. Sistema de digestión anaerobia del diseño base construido.



Fuente. BERNAL Y QUINTERO. 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 (2015).

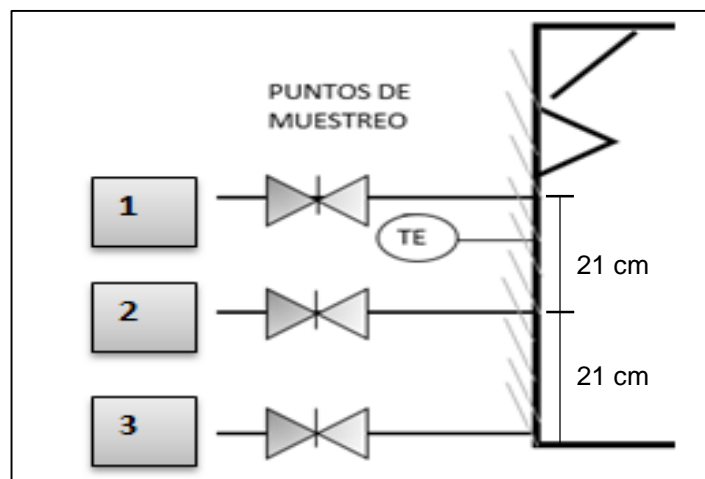
3.2.2 Modificaciones al diseño base. Al diseño anterior se le agregaron modificaciones y mejoras para el diseño de los nuevos sistemas, que favorecieran el proceso y teniendo en cuenta las recomendaciones finales que se hicieron en dicho proyecto.

- **Puntos de muestro.** Se estableció que cada sistema de digestión tendría 3 puntos de muestreo ya que generalmente en procesos de digestión el sustrato cargado en el sistema presenta estratificación en 3 diferentes fases, una fase flotante en la superficie, una fase de sedimentos en el fondo y una fase con sólidos suspendidos en el medio⁷⁹. Establecer la ubicación de estos puntos de muestreo a lo largo de los sistemas digestores dependió directamente del volumen que estaría cargado

⁷⁹ LINDMARK. Op., cit., página 1038.

con sustrato, es decir el 70%⁸⁰, por lo que, según las dimensiones especificadas en la tabla 8 la altura del cada sistemas es de 60 cm y teniendo en cuenta el porcentaje cargado, el primer punto de muestreo se ubicó a una altura de 42 cm, y el tercer punto en el fondo del sistema; mientras que el segundo punto de muestreo en el medio de los puntos 1 y 3 , es decir una altura de 21 cm como puede observarse en la figura 16, esta ubicación es con el fin de tomar muestras para medir el valor del pH de las 3 diferentes fases descritas anteriormente que se forman en el sustrato.

Figura 16. Puntos de muestreo en los sistemas de digestión



Fuente: Elaboración propia.

- **Recolección de biogás:** Para recolectar el biogás producido en los sistemas se determinó que se usarían bolsas “cistoflo”, estas bolsas son generalmente usadas para la recolección de orina, lo que hace que sean de un material resistente y sean totalmente herméticas (figura 17). Además, se tiene un fácil acceso a estas comercialmente.

Los gasómetros se descartaron para la recolección de biogás debido a que no se cuenta con acceso a estos equipos, por disponibilidad y costos. Otra opción que se descartó fueron las bolsas que contienen suero o agua destilada, porque aunque también son de material resistente y herméticas, los residuos de su contenido podrían afectar la composición del biogás recolectado en ellas.

⁸⁰ GARCIA. Op., cit., página 3.

Ilustración 4. Bolsa recolectora de biogás



Fuente: Elaboración propia.

- **Agitación:** Este es el parametro de evaluación ya que diferencia los sistemas de digestión debido a que solo se impletaria en uno de ellos, evaluando el efecto de este en el proceso de digestión y en la producción de biogás. Los tipos de agitación que se tuvieron en cuenta para la selección fueron los nombrados en el cuadro 2; el tipo que se eligió considerando aspectos económicos, estructurales y microbiológicos.

La agitación por medio de reciculación con bomba externa y la agitación con gas, son más eficientes en cuanto a la homogenización de la mezcla evitando la sedimentación, pero implementar estos tipos de agitación implicaban un aumento de costos para la construcción de los sistemas, ya que necesitan una estructura determinada para su funcionamiento, además de necesitar bombas y compresores⁸¹. Además este tipo de sistemas de agitación son de alta intensidad de mezcla, lo que causa el rompimiento de enlaces para la transferencia de hidrógeno afectando la interacción sintrofica entre microorganismos acetogénicos y metanogénicos, también causa la reducción de las sustancias poliméricas extracelulares que ayudan a la adhesión entre células y otras superficies. Los mecanismos de agitación con alta intensidad de mezcla, causan también desestabilización del proceso teniendo efecto sobre la comunidad microbiana, lo que implica la ausencia de microorganismos necesarios para la degradación de diferentes compuestos en las etapas.⁸²

A partir de lo anterior, las bajas intensidades de mezclas favoreceran al proceso haciendolo más estable y además permitiendo el crecimiento de las comunidades microbianas. Por otro lado, que el mezclado sea continuo o intermitente no tiene efecto con respecto a la producción de biogás, pero un menor grado de mezcla

⁸¹ SÁNCHEZ. Op., cit., página 20

⁸² LINDMARK. Op., cit., página 1032.

puede ser beneficioso en la fases de inicio del proceso para permitir el crecimiento y transformación de los compuestos necesarios para la metanogénesis, contribuyendo a la reducción del tiempo de mezcla y costos energeticos que puedan implicar su intensidad⁸³, debido a esto la selección del tipo de mecanismo de agitación se reduce a la agitación mecánica.

La agitación mecánica cumple con las especificaciones nombradas anteriormente, ya que su intensidad puede ser controlada incluso manualmente, al igual que la intermitencia, sin que afecte la actividad microbiana y favoreciendo al proceso de digestión. Para implementar una agitación mecánica, existen tres tipos diferentes: agitador tipo helice, agitador axial, agitador excéntrico y agitador de paletas como se describen en el cuadro 3, se definió que se usaría el agitador tipo helice en el sistema de digestión (cuatro helices), este agitador permite el movimiento del sustrato en ambos sentidos, homogeneizando la mezcla, además este tipo de diseño favorece al proceso cuando la cantidad de sólidos es menor al 10% y cuando el rango de temperatura será menor o igual al mesófilo⁸⁴. Por otro lado su funcionamiento puede ser intermitente, controlando su frecuencia y velocidad externamente por una manivela. Estructuralmente, no habría que realizar cambios al sistema de digestión si no simplemente acondicionarlo y no implica costos energéticos ya que se controlaría manualmente.

3.2.3 Partes de los sistemas de digestión. Cada sistema de digestión estará conformado por las siguientes partes descritas con su respectiva ubicación y funcionamiento, exceptuando el mecanismo de agitación que solo está presente en un sistema.

3.2.3.1 Instrumentos de medición. Estos instrumentos están acoplados a los sistemas haciendo posible el monitoreo del proceso, ya que estarán en contacto directo con el sustrato y el biogás producido. Sus especificaciones físicas están descritas en el anexo B.

- **Termómetros:** La medición de temperatura sería por medio de un termómetro bimetalico ubicado a la mitad de la altura total del sistema. El largo del termómetro es 30 cm lo que significa que mide la temperatura del sustrato en el centro del sistema ya que su diámetro es de 60 cm.

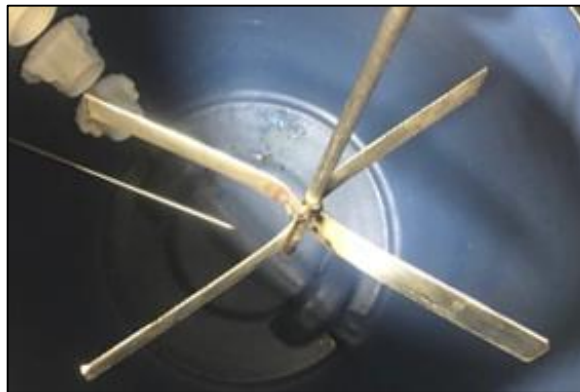
⁸³ Lbid. Página 1039.

⁸⁴ MINISTERIO DE ENERGIA. Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile. Op., cit., página 55-58.

- **Manómetros:** La presión del biogás producido sería medida por manómetros con un rango de 0-15 psi. Estos manómetros estarían ubicados en una manguera que conecta el sistema de digestión con el recolector del biogás.
- **Válvulas:** En cada sistema hay dos tipos de válvulas: Las válvulas check-in, que estarían ubicadas en cada punto de muestreo y solo permiten el paso de los sistemas de digestión hacia el exterior manteniendo la condición anaerobia dentro del sistema. Y las válvulas de bola, estarían ubicadas en la manguera que conecta el sistema de digestión con el recolector del biogás luego del manómetro, esta válvula controla la salida del biogás hacia el recolector.

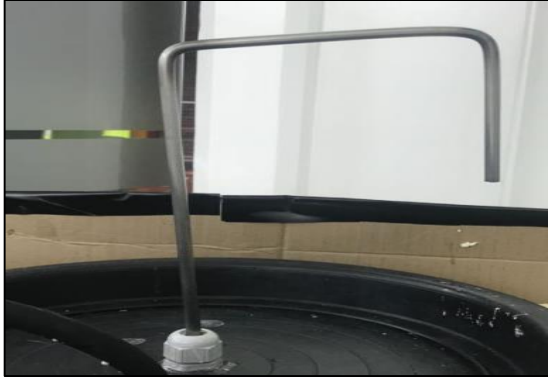
3.2.3.2 Mecanismo de agitación. Como el tipo de agitación mecánica que se implementó es agitador tipo hélice, el mecanismo debería ir en el sistema de tal forma que las hélices queden en contacto directo con el fondo del sistema de digestión, este mecanismo es controlado desde el exterior con una manivela que permite girar en ambos sentidos sin alterar la propiedad anaerobia del sistema.

Ilustración 5. Mecanismo de agitación implementado en el sistema de digestión (interior del sistema)



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 6. Mecanismo de agitación implementado en el sistema de digestión (exterior del sistema)



Fuente: Elaboración propia.

3.2.3.3 Recolección de gas. El recolector de biogás, que en este caso será la bolsa “cistoflo”, debería estar herméticamente unido a una manguera que es la que conecta el sistema con la bolsa. Todas las uniones deberían estar completamente selladas para evitar escapes del biogás.

3.2.3.4 Sistema de aislamiento. Como se nombró en la sección 3.2.1 el tipo de aislamiento que se utilizaría en los sistemas es un recubrimiento con espuma rígida de poliuretano, este recubrimiento se realizaría a la parte externa de los sistemas, soportando a la espuma con un cartón alrededor de ella.

3.2.4 Construcción de los sistemas de digestión. Teniendo las dimensiones del diseño base nombrada en la sección 3.2.1, las modificaciones y las partes que se quieren implementar a los nuevos diseños, se procede a la construcción de cada uno de los sistemas de digestión por medio del procedimiento y los materiales descritos en los anexos D y C respectivamente.

En las ilustraciones 7 y 8 se observan los sistemas de digestión ya construidos.

Ilustración 7. Sistemas de digestión anaerobia.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 8. Sistemas de digestión anaerobia con asilamiento



Fuente: Elaboración propia.

3.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN Y FORMULACIÓN DEL SUSTRATO

Una vez construidos y aislados los sistemas de digestión, y ya acondicionada la biomasa residual seleccionada, se realizó la formulación del sustrato con el que irían cargados los sistemas, a partir del volumen de los sistemas construidos.

3.3.1 Formulación del sustrato. En la sección anterior se especificó que el volumen de cada sistema digestor es de 60 L, antes de definir las cantidades en la mezcla de sustrato, se determinó el volumen de los sistemas que iría cargado. Estos volúmenes fueron calculados utilizando la ecuación 1 y 2, obteniendo los resultados que se muestran a continuación:

Volumen vacío en cada sistema de digestión calculado según la ecuación 1:

$$V_{\text{vacío}} = 60\text{L} * 0,30$$

$$V_{\text{vacío}} = 18\text{L}$$

Volumen cargado en cada sistema de digestión calculado según la ecuación 2:

$$V_{\text{sus}} = 60\text{L} * 0,70$$

$$V_{\text{sus}} = 42\text{L}$$

Por lo tanto, el volumen que estará cargado de sustrato en cada sistema es 42L, este volumen además de estar compuesto por el residuo de poda y el estiércol de bovino, está compuesto en su mayor parte de agua, esta relación se determinó como se muestra a continuación, utilizando las ecuaciones 3 y 4.

Volumen de agua en el sustrato para cada sistema calculado según la ecuación 3:

$$V_{\text{Agua}} = (42\text{L} / 4) * 3$$

$$V_{\text{Agua}} = 31,5\text{L}$$

Este volumen de agua fue recolectado de un pozo de aguas residuales ubicado en la Av. Circunvalar, Bogotá, el mismo día en que se realizó la mezcla del sustrato.

Ilustración 9. Agua residual recolectada para la mezcla de sustrato.



Fuente: Elaboración propia.

Volumen de biomasa en el sustrato para cada sistema calculado según la ecuación 4:

$$V_{\text{bio}} = (42\text{L} / 4) * 1$$

$$V_{\text{bio}} = 10,5\text{L}$$

Este volumen total de biomasa está conformado por los residuos de poda y el estiércol de bovino, se usaron 8,5 L de estiércol para la mezcla del sustrato en cada digester. El residuo de poda presenta alta disponibilidad en la Fundación Universidad de América, pero solo se usaron 986 g de este para la mezcla de sustrato en cada sistema, esto a partir de estudios realizados por Feng Lu, donde se obtuvo como resultado que realizar la codigestión entre estiércol de bovino y residuo de poda al 5% (p/p) tiene mayor rendimiento de metano (65% aproximadamente) y menor acumulación de ácidos grasos volátiles, que realizar una digestión de estiércol o poda⁸⁵; y en otros estudios realizados por Maset Verónica, se determinó que la adición de poda al 5% (p/p) en codigestión con estiércol de bovino aumento la producción volumétrica de metano alrededor del 20%⁸⁶.

⁸⁵ FENG, Lu; WAHID, Radziah; WARD, Alastair; MOLLER, Henrik. Anaerobic co-digestion of cattle manure and meadow grass: Effect of serial configurations of continuous stirred tank reactors (CSTRs). Biosystems engineering. 2017. ISSN 15375110. Pagina 2.

⁸⁶ MOSET, Veronica; FONTAINE, Doline; MOLLER, Henrik. Co-digestion of cattle manure and grass harvested with different technologies. Effect on methane yield, digestate composition and energy balance. Energy. S0360-5442(17)31444-5. Página 21.

Una vez calculados los respectivos volúmenes, se procede a realizar la mezcla del sustrato, es decir, el agua, la poda y estiércol para cada uno de los sistemas.

Ilustración 10. Sustrato para los sistemas de digestión



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Parámetros fisicoquímicos del sustrato inicial. Se realizó la mezcla de sustrato con la formulación que se especificará en la sección 3.3.1, una vez estuvo el sustrato se analizaron los siguientes parámetros fisicoquímicos:

3.3.2.1 Temperatura. Se midió la temperatura cuando ya estuvo preparado el sustrato, obteniendo un valor de 15,9°C. Esta temperatura inicial tiene relación directa con la temperatura ambiente de la Fundación Universidad de América, que fue donde se preparó la mezcla.

Se tomaron dos muestras de 300mL al sustrato inicial inmediatamente fue mezclado, el sustrato inicial es el mismo para los dos sistemas; las muestras se llevaron al laboratorio **AGRILAB**, para determinar los parámetros que se nombran a continuación.

3.3.2.2 Relación C/N. Según los resultados del laboratorio especificados en el anexo E y mostrados en la tabla 9, en cada sistema hay 4,19 g de carbono oxidable por cada litro de sustrato, esta cantidad de carbono constituye parte de la fuente de energía para la actividad microbiana⁸⁷. En cuanto al nitrógeno orgánico, está presente en 1,38 g por cada litro de sustrato, este compuesto favorece a la formación de nuevas células⁸⁸. De acuerdo con lo anterior, la relación carbono nitrógeno del sustrato fue de 3,04, lo que quiere decir que no hay el carbono

⁸⁷ MINISTERIO DE ENERGÍA. Op., cit., página 35

⁸⁸ Lbid. Página 35.

necesario para la actividad microbiana, y ya que esta es la principal fuente de energía para su crecimiento y para llevar a cabo cada una de las etapas podría presentarse inhibición bacteriana en las etapas, además el nitrógeno libre puede acumularse en forma de amonio afectando el pH en el sistema e inhibiendo la producción de metano.⁸⁹

Tabla 9. Resultados de la relación carbono-nitrógeno del sustrato inicial.

Carbono orgánico oxidable	4,19 g/L
Nitrógeno orgánico	1,38 g/L
Relación C/N	3,04

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2.3 Sólidos suspendidos totales y sólidos totales. Para el sustrato inicial se determinó que los sólidos suspendidos totales son 24.14g por litro, por otro lado, los sólidos totales están en 31.21 g por litro, como se puede ver en la tabla 10 y en los resultados del laboratorio especificados en el anexo E. Esta cantidad de sólidos se tendrá en cuenta con respecto a las cantidades del sustrato final, con el fin de comparar la degradación en cada sistema.

Tabla 10. Resultados sólidos suspendidos totales y sólidos totales.

Sólidos suspendidos totales	24,14 g/L
Sólidos totales	31,21 g/L

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados especificados en el anexo, se determinó que la densidad del sustrato inicial fue 1000g/L lo que nos permitió evaluar la cantidad de sólidos con respecto a la cantidad total del sustrato, teniendo como resultado que el sustrato inicial está compuesto en un 2,414% de sólidos suspendidos totales y en 3,121% en sólidos totales, estos valores son menores al rango requerido, especificado en la sección 2.3.2.4, para el proceso de digestión y aunque pueda que no presente problemas de sedimentación, si podría presentar dificultades en cuanto a la formación de fases del sustrato dentro del sistema a lo largo del proceso.

⁸⁹ UPME. Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Guía para la implementación de sistemas de producción de biogás. Bogotá, D.C. 2003. Página 17.

3.3.2.3 Demanda química de oxígeno (DQO). Este parámetro tuvo un resultado de 37,45g O₂ /L, lo que significa que es necesario de 37,45 g de oxígeno para degradar la materia orgánica contenida en cada litro de sustrato contenido en cada uno de los sistemas. Los resultados del laboratorio están especificados en el anexo E.

3.3.3 Condiciones de operación. En esta sección se estableció el rango de valores al que las siguientes condiciones deberían llevarse a lo largo del proceso, con el fin de que se esté llevando favorablemente con respecto a la producción de biogás.

- **Temperatura.** Como los sistemas estarán ubicados en un lugar donde la temperatura ambiente de alrededor de 15°C se implementó un medio aislante, el descrito en la sección 3.2.2.4, que permite mantener la temperatura lo más estable posible y evite un decrecimiento de la actividad microbiana y por ende en la producción de biogás⁹⁰. Por lo tanto, se establece que el rango de temperatura en que se llevara a cabo el proceso estaría entre 13-18°C, este valor se tomaría directamente cada 4 días del termómetro bimetálico acondicionado a los sistemas.
- **pH.** El pH se tomará cada 4 días aproximadamente, este factor se debe controlar porque a cambios bruscos de pH afecta directamente la actividad enzimática, y además es un indicador de la etapa en la que se pueden encontrar los microorganismos dentro de los sistemas⁹¹. Este valor debería estar a lo largo del proceso en un rango entre 6 y 8, ya que si se encuentra en valores inferiores a 6 indicaría la producción de un biogás pobre en metano.⁹²
- **Velocidad y frecuencia de agitación.** Según procesos analizados por Lindmark.J, en los experimentos evaluados la mezcla, el proceso de digestión y la producción de biogás se mantuvieron estables en una intensidad de mezcla 50-100rpm, y si se llega a implementar una intensidad superior a 700rpm puede presentarse disminución en la producción de biogás, debido al efecto que esta tiene sobre la actividad microbiana⁹³. Por lo tanto, se definió que la velocidad de agitación en el sistema de digestión anaerobia del proyecto sería de 50 rpm ejercida manualmente cada dos días a lo largo del proceso.
- **Tiempo de retención.** El factor principal del cual depende esta condición es la temperatura, en la sección 3.2.2.1 se estableció que el rango de temperatura del proceso estaría entre 13-18°C, por lo cual se determinó el tiempo de retención aproximado necesario para la producción de biogás teniendo en cuenta la tabla 7,

⁹⁰ FERNÁNDEZ- POLANCO. Op., cit., página 35.

⁹¹ PEREZ. Op., cit. página 29.

⁹² MARTÍ. Op., cit. página 11.

⁹³ LINDMARK. Op., cit., página 1038.

el cual estaría entre 55 a 90 días. Y teniendo en cuenta la ecuación 5, con una temperatura ambiente promedio de 15,5°C:

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

Obteniendo como resultado un tiempo de retención de 67 días aproximadamente, este tiempo es el mínimo necesario para la fermentación y producción de biogás.

3.4 PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA

Ya preparado el sustrato y establecidas las condiciones a las que debería llevarse el proceso, se llevó a cabo experimentalmente. La carga del sustrato y puesta en marcha de los sistemas se detalla en el anexo F.

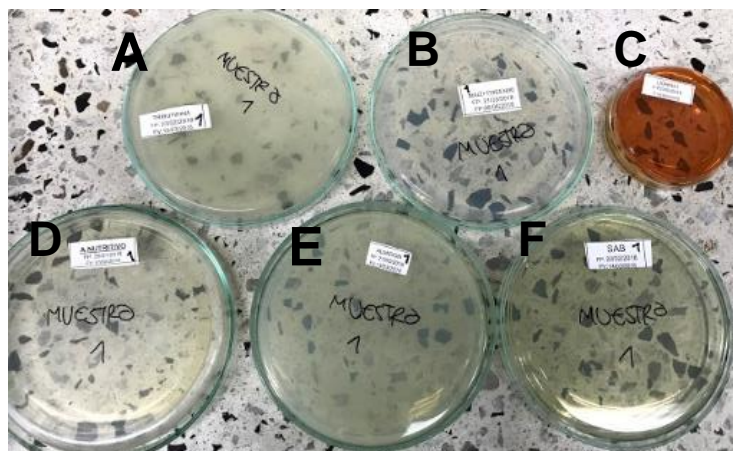
A lo largo del proceso se llevó el monitoreo de sus condiciones, su comportamiento se especifica a continuación.

3.4.1 Evaluación de la actividad enzimática microbiana. La producción de biogás se lleva a cabo por acción de los microorganismos como se detalló en la sección 1.2, por esta razón es necesario determinar que en el sustrato contenido de cada sistema haya actividad enzimática microbiana.

Para esto, se tomaron muestras de los dos sistemas, se sembraron en medios específicos y se evaluó el crecimiento microbiológico. Los medios de cultivo, mostrados en la ilustración 11, correspondían a:

- A. Cultivo de tributirina
- B. Cultivo de maíz
- C. Cultivo de lignina
- D. Cultivo nutritivo
- E. Cultivo de Almidón
- F. Cultivo SAB

Ilustración 11. Cultivos para la siembra de microorganismos



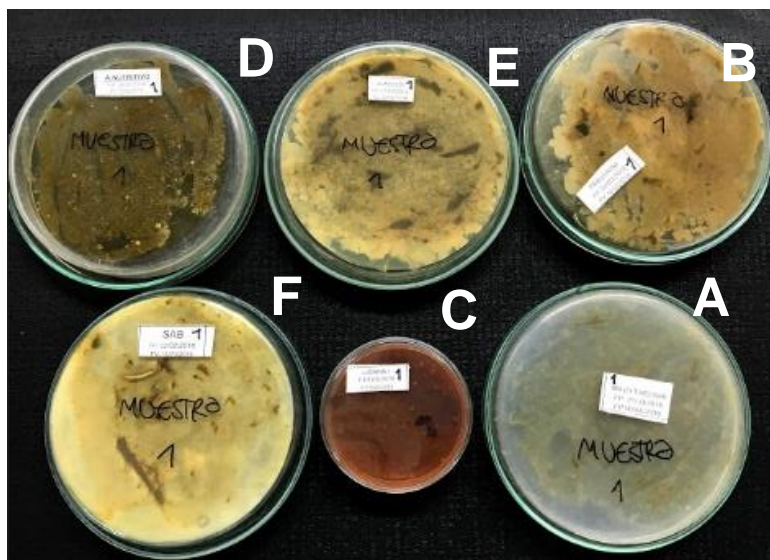
Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento de la siembra se detalla en el anexo G, las muestras tomadas en cada uno de los sistemas de digestión, corresponden: la muestra 1 al sustrato del sistema de digestión con agitación y la muestra 2 al sustrato del sistema de digestión sin agitación. Una vez realizadas las siembras, para cada muestra, se procede a incubar los cultivos.

Luego de la incubación se pudo observar la presencia de microorganismos, en los cultivos de tributirina, maíz, nutritivo, almidón y SAB, lo que significa que en el sustrato de los dos sistemas de digestión habría degradación de lípidos, maíz, nutrientes, almidón y proteínas por medio de actividad enzimática microbiana como la lipasa, la proteasa y la celulasa. Por otro lado, en los cultivos de lignina no se presencié actividad enzimática microbiana, lo que significa que no será degradada la lignina contenida en el sustrato, ya que esta degradación es llevada a cabo por enzimas extracelulares producidas principalmente por hongos de podredumbre blanca⁹⁴; esto resulta desfavorable para el proceso de digestión en los sistemas, ya que uno de los residuos que se usó en la mezcla del sustrato es el residuo de poda que tiene un porcentaje significativo de este polímero como se muestra en el cuadro 3. En las siguientes ilustraciones se puede observar los cultivos de cada muestra luego de la incubación.

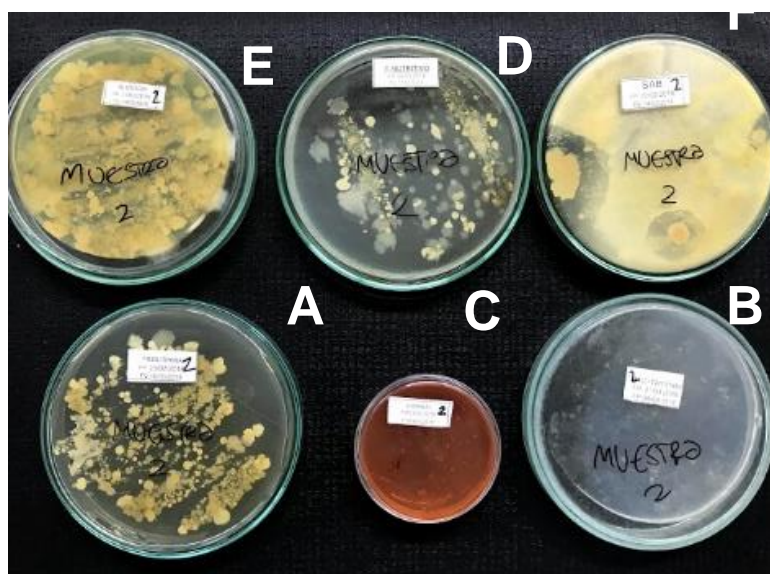
⁹⁴ QUINTERO, Juan; FEIJOO, Gumersindo; LEMA, Juan. Producción de enzimas ligninolíticas con hongos basidiomicetos cultivados sobre materiales lignocelulósicos. Vitae. Medellín, Colombia. 2006. Página 2.

Ilustración 12. Resultados para los cultivos de la muestra 1



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 13. Resultados para los cultivos de la muestra 2

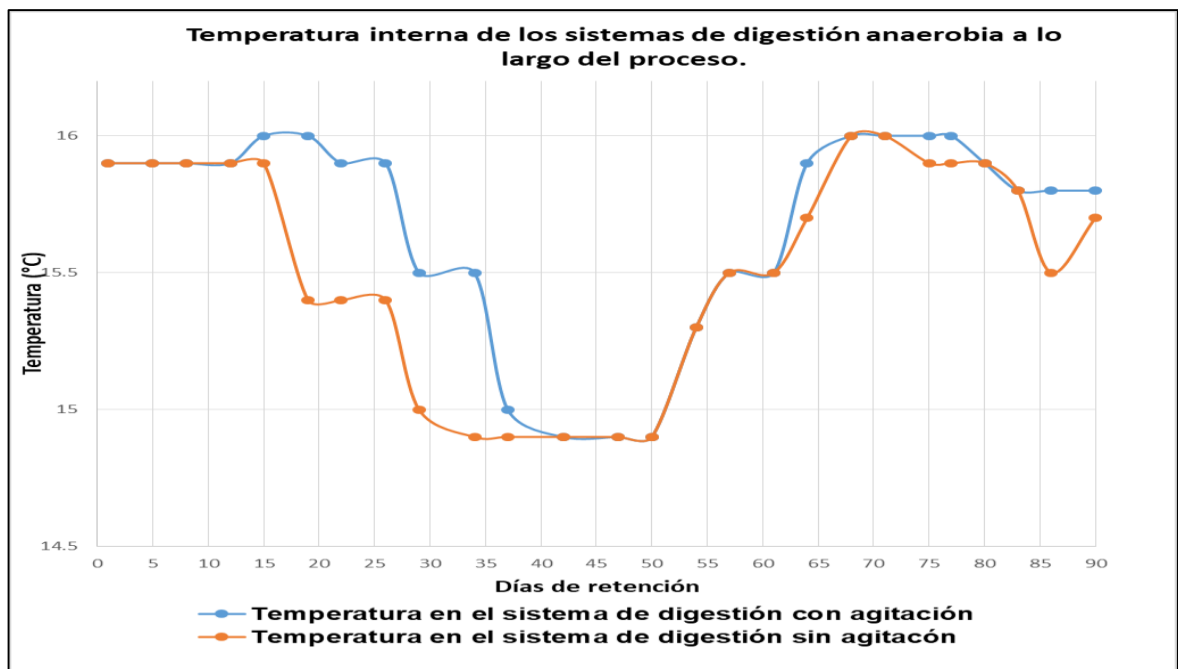


Fuente: Elaboración propia.

Una vez evaluada la actividad microbiana, se lleva a cabo el monitoreo de la temperatura y el pH del proceso durante 90 días como se puede ver en los datos registrados presentes en el anexo H. Estos parámetros se monitorearon con los instrumentos y la frecuencia ya especificada, y con el fin de llevar un seguimiento de las etapas microbiológicas y el desarrollo del proceso.

3.4.2 Perfil temperatura. La temperatura fue medida con los termómetros bimetalicos ubicados en cada uno de los sistemas, esta variación dependió totalmente de la temperatura ambiente de la ubicación de los sistemas. La temperatura del sustrato inicial fue de 15.9°C y el rango de temperatura en el que se llevó el proceso dentro de los sistemas fue de 14.9°C a 16°C teniendo un promedio de 15,67°C para el sistema con agitación y de 15,54°C para el sistema sin agitación. El comportamiento de la temperatura a lo largo del proceso puede observarse en el siguiente gráfico.

Gráfico 1. Temperatura interna de los sistemas de digestión anaerobia a lo largo del proceso.



Fuente: Elaboración propia.

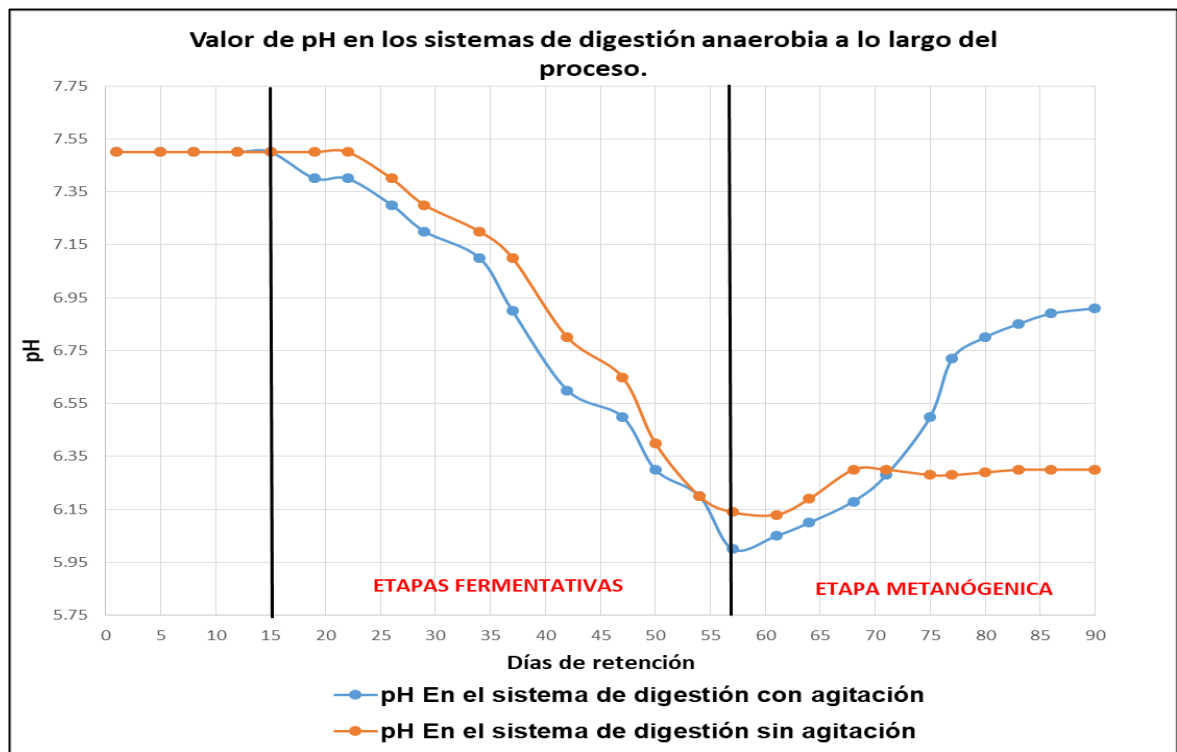
Observando la gráfica anterior, la temperatura de los sistemas de digestión, se mantuvo constante con respecto a la temperatura inicial de 15,9°C durante los primeros 12 días. En el día 15 hasta el 42, se presenció disminución de temperatura en los dos sistemas debido a las condiciones climáticas que se presentaron en la temporada, alcanzando una temperatura de 14,9°C en los sistemas, pero a partir del día 50 hasta el 71, la temperatura de los sistemas aumento hasta llegar a 16°C en el día 90.

También se puede observar en el gráfico 1 que en el sistema con agitación hubo variación mínima con respecto al sistema sin agitación, esto debido a que la agitación implementada favorece a la uniformidad de la temperatura en todo el sustrato, aumentando la eficiencia del sistema y también evitando la formación de

espacios inactivos⁹⁵, pero aunque esta temperatura fue superior, siempre se mantuvo en un rango psicrófilo lo que significa que la velocidad del proceso obtendrá rendimientos bajos, ya que a medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos acelerando el proceso.⁹⁶

3.4.3 Perfil pH. En el siguiente gráfico, se observa el comportamiento del pH en cada uno de los sistemas de digestión a lo largo del proceso, este parámetro sirve como indicador de la etapa en la que se encuentra el proceso, ya que según los componentes transformados en cada una de las etapas variará este valor. El valor inicial del pH para el sustrato fue 7,5.

Gráfico 2. Valor de pH en los sistemas de digestión anaerobia a lo largo del proceso.



Fuente: Elaboración propia.

⁹⁵ ESTEVAN, Palau; VIRGINIA, Carmen. Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Natural Universidad Politécnica de Valencia. España. Página 7.

⁹⁶ MARTI. Op., cit. página 10.

En el gráfico 2, se puede observar que el pH en los sistemas se mantuvo con el valor inicial durante los primeros 15 días y posteriormente comenzó a decrecer hasta el día 57 alcanzando un valor de 6 para el sistema con agitación y de 6,13 para el sistema sin agitación, este decrecimiento significó que se llevó a cabo el desarrollo de la etapa hidrolítica y de la fermentación en los sistemas. En la etapa hidrolítica la descomposición de los polímeros orgánicos tiene como productos ácidos grasos y aminoácidos, mientras que en las etapas fermentativas (acidogénesis y acetogénesis) está la formación de los ácidos grasos volátiles y la presencia de estos compuestos son los que causan el decrecimiento del valor del pH, y por esta razón con el monitoreo de esta condición se sabe que se llevaron a cabo las etapas nombradas.⁹⁷

En el sistema de digestión con agitación, se puede observar en el gráfico 2 que a partir de día 61 se presenta un crecimiento en el pH, lo que indica el inicio de la etapa metanogénica, este aumento en el pH se debe a que los microorganismos metanogénicos transforman el acetato proveniente de los ácidos grasos volátiles en metano por la ruta acetoclástica⁹⁸, al realizar estas transformaciones disminuye la concentración de ácidos grasos volátiles en el sustrato por lo que aumenta el pH. En el día 90, alcanzó un valor de 6,91.

Mientras que, en el sistema de digestión sin agitación, se puede observar que llegó hasta la etapa fermentativa según los valores del pH. Como ya se nombró este valor disminuye debido a la presencia de ácidos grasos volátiles, lo que puede significar, según el comportamiento presenciado en el gráfico 2, que hubo producción, pero no consumo de estos, es decir no hubo etapa metanogénica, lo que pudo causar su acumulación acidificando el sistema, logrando inhibición de la producción de biogás.

3.4.4 Parámetros fisicoquímicos del sustrato. Se toman muestras del sustrato en cada sistema de digestión correspondiente al día 90 del proceso, para ser analizados en el laboratorio los parámetros nombrados a continuación con el fin de comparar con el sustrato inicial analizado el día 1. Los resultados detallados de cada muestra se encuentran en el anexo I.

3.4.4.1 Sólidos suspendidos totales y sólidos totales. En la tabla 11 se puede observar los resultados correspondientes de sólidos suspendidos totales y sólidos totales del sustrato contenido en cada sistema en el día 1 y en el día 90. Con estos valores se pudieron calcular los porcentajes de reducción de sólidos, para así determinar cuál sistema tuvo mayor degradabilidad.

⁹⁷ SEADI. Op., cit., página 26.

⁹⁸ CORRALES. Op., cit., página 66.

Tabla 11. Comparación de sólidos suspendidos totales y sólidos totales en el sustrato.

	Sistema de digestión con agitación		Sistema de digestión sin agitación	
	<i>Sólidos totales</i>	<i>Sólidos suspendidos totales</i>	<i>Sólidos totales</i>	<i>Sólidos suspendidos totales</i>
SUSTRATO INICIAL	31,21g/L	21,14 g/L	31,21g/L	21,14 g/L
SUSTRATO DÍA 90	14,98g/L	9,140 g/L	15,73g/L	9,075 g/L
DISMINUCIÓN	52%	56.76%	49,59%	57,07%

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 11, con respecto a los sólidos suspendidos totales y a los sólidos totales, hubo una disminución de 56,76% y 52% respectivamente en el sistema de digestión con agitación, mientras que para el sistema de digestión sin agitación la disminución de sólidos suspendidos totales y de sólidos totales fue de 57,07% y 49,59% respectivamente.

Con el promedio del porcentaje reducido de sólidos en cada sistema, se obtiene que el sistema de digestión con agitación presentó una reducción superior esto quiere decir que la agitación contribuyó a la degradabilidad y transformación del material orgánico presente en el sustrato inicial. Con la medición de sólidos también se puede determinar el fin del proceso de digestión, lo cual sería cuando el sustrato se mezcla quedando en una sola fase (lodo) debido a la reducción total de los sólidos.

3.4.4.2 Demanda química de oxígeno (DQO). Los valores de este parámetro en el día 90 en cada sistema, se pueden observar en la tabla 12 junto con los valores del mismo del sustrato inicial.

Tabla 12. Comparación de la demanda química de oxígeno del sustrato.

	Sistema de digestión con agitación	Sistema de digestión sin agitación
	<i>DQO</i>	<i>DQO</i>
SUSTRATO INICIAL	37,45g O ₂ /L	37,45g O ₂ /L
SUSTRATO DÍA 90	22,041g O ₂ /L	15,819g O ₂ /L
DISMINUCIÓN	29,91%	49,7%

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados mostrados la tabla 12, en los dos sistemas de digestión anaerobia se presentó una disminución de la demanda química de oxígeno con respecto a la del sustrato inicial, siendo del 29,91% en el sistema de digestión con agitación y del 49,7% en el sistema de digestión sin agitación. La DQO está

relacionado con el oxígeno que necesitan los microorganismos para la degradación total de contenido de materia orgánica del sustrato⁹⁹, por lo tanto, se podría decir que la actividad microbiana es proporcional a este parámetro.

Por lo tanto, según lo anterior en el sistema de digestión sin agitación la actividad microbiana es 39,81% inferior que en el sistema de digestión con agitación en el día 90, esto contribuye a lo descrito en la sección 3.4.3 acerca de que el sistema sin agitación solo realizó las etapas fermentativas, debido a la ausencia de microorganismos metanogénicos que llevaran a cabo la última etapa del proceso.

3.5 PRODUCCIÓN DE BIOGAS Y EFECTO DE LA AGITACIÓN.

En el sistema de digestión sin agitación, hasta al día 90 no se había dado producción de biogás, teniendo las mismas condiciones de operación iniciales que el sistema con agitación y siendo cargado con la misma mezcla de sustrato. Así que, se podría decir que hubo inestabilidad e inhibición en el proceso de digestión anaerobia.

De acuerdo a lo anterior y como ya se nombró en la sección 3.4.2 el rango de temperatura al que se desarrollo fue psicrófilo lo que no favoreció a la velocidad ni el crecimiento de los microorganismos especialmente los acetogénicos y metanogénicos que son los grupos de bacterias más sensibles a esta variable¹⁰⁰. Con respecto al decrecimiento microbiano, un factor que pudo influir fue no contar con un mecanismo de agitación que contribuyera a la homogeneidad del sustrato, evitando espacio muerto, sedimentación y temperatura uniforme, además, favorecer el contacto de la población microbiana con el sustrato y sus nutrientes.¹⁰¹

Por otro lado, los ácidos grasos volátiles, al presentarse disminución en la actividad microbiana metanogénica o cuando la producción de ácidos grasos volátiles se hace superior al consumo de estos, la concentración de ácidos grasos volátiles aumenta al acumulasen en el sistema teniendo efecto inhibitorio¹⁰².

Para el sistema de digestión con agitación, se presencié producción de biogás desde el día 68, correspondiente al tiempo de retención estimado en la sección 3.3.2.4 y bajo unas condiciones de temperatura de 16°C y un valor de pH de 6,18. Hasta el día 100 del proceso se habían recolectado 11L de biogás, se tomó una muestra de 500ml para realizar un análisis cromatográfico.

3.5.1 Cromatografía. Este análisis se realizó utilizando un cromatógrafo HP 5890, una columna 13X y detector TCD (150°) utilizando helio como gas de arrastre, con

⁹⁹ RODRIGUEZ, Carlos. Demanda química de oxígeno por reflujo cerrado y volumetría. IDEAM.2007. Página 2.

¹⁰⁰ FERNÁNDEZ- POLANCO. Op., cit., página 25

¹⁰¹ ESTEVAN. Op., cit. página 7.

¹⁰² FERNÁNDEZ- POLANCO. Op., cit., página 25.

el fin de determinar la composición química del biogás producido en el sistema de digestión anaerobia con agitación. En la siguiente tabla se especifica la composición, los resultados detallados se encuentran en el anexo J.

Tabla 13. Composición del biogás producido en el sistema de digestión con agitación.

	Metano (CH ₄)	Oxígeno (O ₂)	Nitrógeno (N ₂)
Sistema de digestión con agitación	21,11%	0,11%	0,38%

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la tabla anterior el biogás producido en el sistema de digestión anaerobia con agitación contiene 21,11% de metano en su composición química, esta composición dependió directamente de la biomasa usada y de las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo el proceso. Este porcentaje de metano es el que determina el valor calorífico que tendrá el biogás, cuando su contenido es superior al 45% el biogás es inflamable¹⁰³. Por otro lado, según este análisis, hay presencia de dióxido de carbono y también nitrógeno en la muestra, esto puede deberse a filtraciones de aire en la recolección del biogás al cual se le realizó el análisis cromatográfico o también por la presencia de este último compuesto en el interior del sistema.

En estudios realizados por Bernal Y Quintero (2016) se obtuvo 58,3% de metano en la composición del biogás utilizando como sustrato estiércol de bovino en un tiempo de retención de 100 días, el proceso fue realizado en un rango mesófilo en un sistema tipo UASB¹⁰⁴; en otro estudio realizado por Feng Lu (2017), en un proceso de codigestión con poda al 5% (p/p) y estiércol de bovino en reactores CSTR, se obtuvo un 57,38% de metano en el biogás producido a condiciones termofílica y un tiempo de retención de 90 días¹⁰⁵ y en otro proceso de codigestión realizado por Moset Verónica (2017) bajo las mismas condiciones de operación del estudio nombrado anteriormente un tiempo de retención de 116 días, se obtuvo una composición de metano de 53%- 55% dependiendo el tipo de poda utilizado para el proceso e implementando una velocidad de agitación de 60 rpm¹⁰⁶.

¹⁰³ MINISTERIO DE ENERGIA.Op., cit., página16.

¹⁰⁴ BERNAL. Op., cit., página 64

¹⁰⁵ FENG. Op., cit., página

¹⁰⁶ MOSET. Op., cit., página

Esta composición de metano obtenida en los estudios nombrados anteriormente, no se puede comparar con la del presente proyecto, debido a que este proyecto se llevó a cabo en un rango de temperatura psicrófilo lo que influye directamente en la velocidad de reacción y producción de biogás siendo inferior que en los procesos llevados a condiciones termófilas; además, el tiempo de retención de este proyecto (90 días) fue inferior al tiempo de estos proyectos, pero a pesar de obtener una composición de metano relativamente baja, estos sistemas no implicaron costos operacionales ni de mantenimiento correspondientes a técnicas y equipos para el calentamiento, ni tampoco costos energéticos con respecto al sistema de mezclado al ser mecánico, manual e intermitente.

3.5.2 Análisis estadístico. Este análisis estadístico se realizó con el fin de identificar si la agitación tenía efecto sobre los parámetros como temperatura, pH, sólidos totales y demanda química de oxígeno que influyen en el proceso de digestión anaerobia, por medio de un análisis de varianza (ANOVA), teniendo en cuenta diferentes días durante el proceso, como se describe en la siguiente tabla.

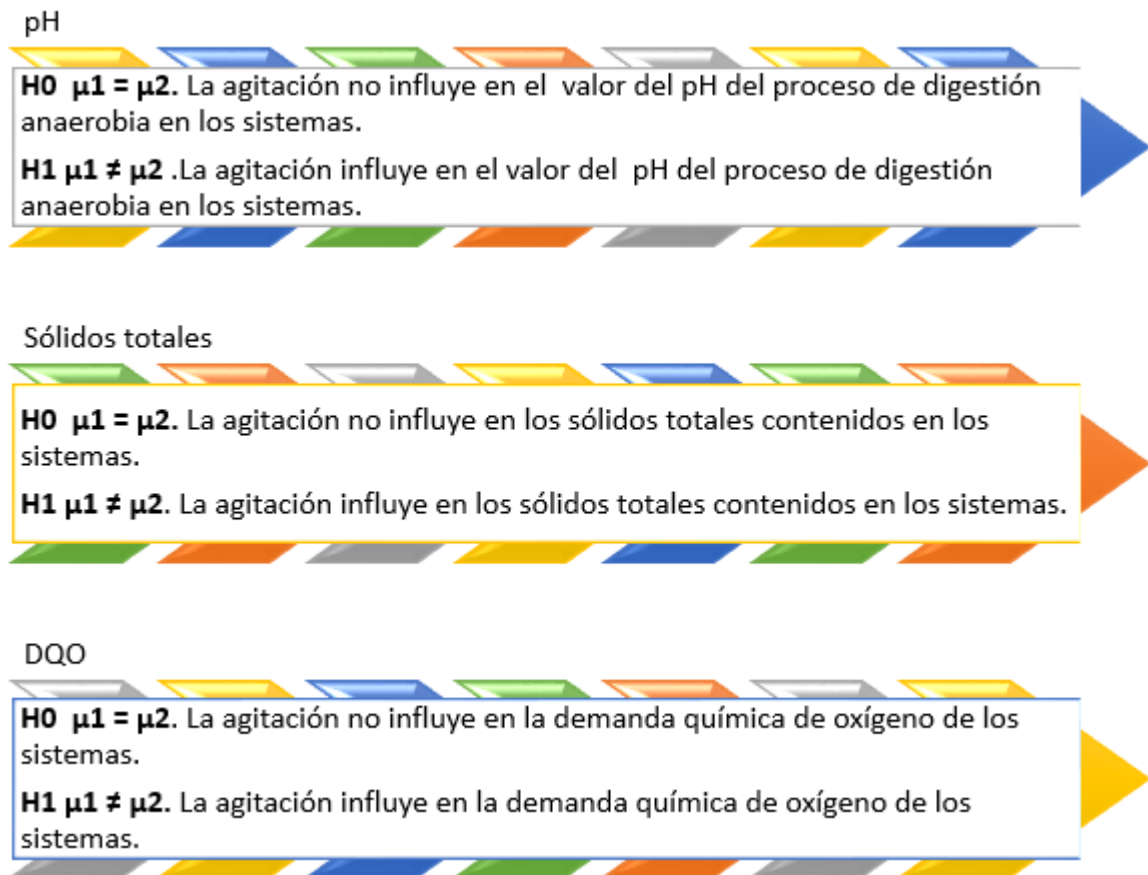
Tabla 14. Parámetros en los sistemas de digestión que serán evaluados estadísticamente.

Día de proceso	Sistema de digestión con agitación			Sistema de digestión sin agitación		
	pH	Sólidos totales	DQO	pH	Sólidos totales	DQO
		g/L	g O ₂ /L		g/L	g O ₂ /L
1	7,5	31,21	37,45	7,5	31,21	37,45
19	7,4	-	-	7,4	-	-
42	6,6	-	-	6,8	-	-
68	6,18	-	-	6,3	-	-
90	6,91	14,98	22,04	6,3	15,73	15,819

Fuente: Elaboración propia.

Este análisis de varianza se realizó por medio de la distribución F, con un nivel de significancia de 0.10 dando un 90% de confiabilidad a los resultados obtenidos de manera experimental. De acuerdo a los datos mostrados en la tabla 14, en la figura 17 se detallan las hipótesis planteadas para cada parámetro.

Figura 17. Hipótesis planteadas para el ANOVA.



Fuente: Elaboración propia.

Una vez se plantearon las hipótesis, se realizó el ANOVA con el procedimiento especificado en el anexo k. A continuación, en la tabla 15 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 15. Resultados del ANOVA

	pH	Sólidos totales	DQO
r	5	2	2
K	2	2	2
n	10	4	4
C	258,408605	1085,08111	1589,3522
SCT	269,191895	1337,37879	1951,69924
SCA	259,491015	1085,20714	1599,03052
SCE	9,70088	252,17165	352,668721
GL v1	1	1	1
GL v2	8	2	2
MCA	259,491015	1085,20714	1599,03052
MCE	1,21261	126,085825	176,334361
F	213,993794	8,60689247	9,06817319
$F_{\alpha, v1, v2}$	3,46	8,53	8,53

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con la distribución, si $F > F_{\alpha, v1, v2}$ se rechaza la hipótesis nula H_0 , por lo cual, según los resultados anteriores, H_0 es rechazado para cada uno de los parámetros evaluados, es decir que la agitación influye directamente en los parámetros pH, sólidos totales y DQO del proceso de digestión anaerobia ya que la variación de datos entre los dos sistemas es significativa; corroborando estadísticamente los resultados ya descritos en la sección 3.4 en cuanto a que la variación del pH a lo largo del proceso en el sistemas con agitación fue significativa debido a que se llevaron a cabo todas las etapas, mientras que el sistema sin agitación presento acidificación por lo cual el valor del pH no vario significativamente después del día 57, por otro lado en el sistema con agitación el porcentaje de disminución de sólidos totales fue superior que en el otro sistema y la demanda química de oxígeno solo disminuyó en un 29,9%.

4. CONCLUSIONES

- Los residuos seleccionados y caracterizados fueron estiércol de bovino y residuo de poda, obteniendo como resultado que teóricamente los dos residuos tienen una relación C/N de 25/1 la cual es aproximada a la necesaria (30/1) para el proceso de digestión anaerobia; además, se determinó que la humedad contenida en las dos biomásas es superior al 60% lo que favorece a la actividad microbiana. El valor del pH fue de 6,24 para el residuo de poda y 7,3 para el estiércol de bovino, siendo estos valores cercanos a la neutralidad evitando cambios drásticos de este parámetro a lo largo del proceso; por otro lado, el tamaño de partícula de la biomasa fue inferior a 5 mm.
- Se realizaron modificaciones a un diseño de un prototipo de sistema tipo UASB para la construcción de dos sistemas de digestión anaerobia, teniendo como modificación principal un mecanismo de agitación a uno de los sistemas. Se implementó agitación mecánica tipo hélice manejado manualmente permitiendo controlar la intensidad y la frecuencia de mezclado. Con el fin de tomar muestras de las fases del sustrato se estableció que cada sistema tuviera tres puntos de muestreo; y la utilización de bolsas herméticas como recolectores de biogás. Una vez identificadas las modificaciones se realizó el montaje de los dos sistemas.
- Se establecieron las condiciones de operación, la temperatura estaría dentro de un rango de 13°C-18°C debido a la temperatura ambiente del lugar de ubicación obteniendo que el tiempo de retención mínimo será de 67 días aproximadamente, el valor del pH variaría en un rango de 6-8 dependiendo la etapa en la que se encuentre el proceso y se estableció que la agitación se aplicaría al sistema cada 2 días a una velocidad de 50 rpm. Por otro lado, se determinó que se utilizarían 31,5L de agua, 8,5L de estiércol de bovino y 986g de residuo de poda para el sustrato de cada sistema correspondientes al 70% del volumen del sistema cargado siguiendo la metodología usada por García (2005).
- Se evaluó la actividad enzimática microbiana del sustrato contenido en cada sistema, observando la población microbiana en todos los cultivos sembrados a excepción del cultivo de lignina. Se registró el valor del pH y la temperatura del sustrato durante 90 días obteniendo que la temperatura se mantuvo dentro de un rango de 14,9°C-16°C y que según los valores de pH se observa que en el sistema con agitación se llevaron a cabo todas las etapas microbiológicas teniendo una reducción del 29,91% en el DQO, mientras que en el sistema sin agitación se presentó inhibición de la etapa metanogénica, debido a la acidificación en el sustrato, una de sus causas es la disminución en la actividad microbiana evidenciada en una reducción del 49,7% en el DQO. En los dos sistemas de digestión disminuyó la cantidad de sólidos contenidos en un promedio de 53,85% con respecto a la cantidad del sustrato inicial.

- En el sistema de digestión con una agitación de 50 rpm, se presentó producción de biogás bajo una temperatura de 16°C, un valor de pH de 6,18 correspondientes al día 68; hasta el día 100 del proceso se habían recolectado 11 L de biogás, con 21,11% de metano en su composición en comparación con el sistema sin agitación donde no hubo producción de biogás, se presentó acidificación en el sustrato debido a la acumulación de ácidos grasos expresada en los valores del pH, una de las posibles causas de esto es que la concentración del sustrato no fue homogénea al no contar con un mecanismo de agitación, lo que aumenta zonas de estancamiento y con ausencia de nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos. Según un análisis de varianza el efecto de la agitación influye directamente en el pH, DQO y sólidos totales.

5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar otro tipo de aislamiento térmico, que permita mantener la temperatura del sistema estable y en un rango superior al psicrófilo, favoreciendo el proceso y la producción de biogás.
- Se recomienda que en la mezcla de sustrato se varíe la cantidad de paja y de estiércol en la mezcla de sustrato para comparar los resultados obtenidos en cuanto al porcentaje de metano y la cantidad de biogás producido.
- Se recomienda variar la velocidad y frecuencia de agitación, implementando una superior o inferior a la que se operó en este proyecto (50 rpm) con el fin de observar el efecto de esta variación en las etapas del proceso y en la producción del biogás.
- Se recomienda evaluar el uso de un sistema automatizado para la medición continua de las condiciones de operación internas como pH y temperatura de los sistemas de digestión.
- Se recomienda buscar alternativas para la implementación del biogás producido en el lugar donde se lleva a cabo el proceso, de acuerdo con su potencial energético, su valor calorífico.
- Se recomienda utilizar el sistema de digestión con agitación de este proyecto en un régimen de carga continua con el fin de aprovechar permanentemente los residuos generados en la zona de ubicación.

BIBLIOGRAFÍA

AINIA CENTRO TECNOLÓGICO. Valorización energética: producción de biogás mediante codigestión anaerobia de residuos/subproductos orgánicos agroindustriales. Departamento Calidad y Medio Ambiente. Valencia, España. p. 1-11.

ARISTIZABAL, Beatriz; VANEGAS, Estefanía; MARICAL, Juan; ALONSO, Miller. Digestión anaerobia de residuos de poda como alternativa para disminuir emisiones de gases de efecto invernadero en rellenos sanitarios. Universidad Nacional, Manizales. Energética (2015). ISSN 2357 - 612X. p. 30-36.

BAUTISTA, Alejandro. Sistema biodigestión para el tratamiento de desechos orgánicos. Estelí, Nicaragua. Universidad Carlos III De Madrid Escuela Politécnica Superior. 2010. p. 67

BERNAL, Daniela; QUINTERO, Daniela. 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. Bogotá D.C. Fundación Universidad de América. 2015. p.111

CADAVID, Luz; BOLAÑOS, Vanessa. Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de energía renovable en una ciudad colombiana. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. Energética (2015). ISSN 2357-612X. p. 24-28.

CARO, Ángela. Desarrollo del proceso de producción de biogás a nivel de planta piloto a partir de residuos orgánicos generados en el frigorífico Ble Ltda. Fundación Universidad de América. Bogotá. 2014. p. 97

CHAVEZ, Iván; OVIEDO, Daniel. Desarrollo de la ingeniería básica para la producción de biogás a partir de desechos orgánicos en la finca Tibamox. Bogotá D.C. Fundación Universidad de América. 2009. p. 142

CORRALES, Laura; ANTOLINEZ, Diana M; BOHÓRQUEZ, Johana A; CORREDOR, Aura M. Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, Bogotá. NOVA (2015). 13 (23). p. 55-81.

DÍAZ, María; ESPITIA, Sandra; MOLINA, Francisco. Digestión anaerobia una aproximación a la tecnología. Bogotá D.C. Instituto de biotecnología. Universidad Nacional de Colombia. Primera edición. 2002.p.80.

ESCALANTE, Humberto; ORDUZ, Janneth; ZAPATA, Henry; CARDONA, María; DUARTE, Marta. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Unidad de planeación minero-energética (UPME 2008). ISBN: 978-958-8504-59-9

ESTEVAN, Palau; VIRGINIA, Carmen. Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Natural Universidad Politécnica de Valencia. España. 2016. p.10.

FENG, Lu; WAHID, Radziah; WARD, Alastair; MOLLER, Henrik. Anaerobic co-digestion of cattle manure and meadow grass: Effect of serial configurations of continuous stirred tank reactors (CSTRs). Biosystems engineering. 2017. ISSN 15375110.p. 11.

FERNÁNDEZ-POLANCO, Fernando; SEGHEZZO, Lucas. Diseño de reactores Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB). Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional - INENCO, CONICET. Argentina. Universidad Nacional de Salta. 2015. p. 134.

GARCIA, Emilio; CORACE, Juan; YANK, Lisandro. Digestión anaerobia de virutas y aserrín de maderas utilizadas en la región chaqueña. Universidad Nacional de Nordeste. Grupo de investigación en Energías Renovables (GIDER). Chaco, Argentina .2005. p. 1-4.

GUEVARA, Antonio; Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. Lima. p.80.

IMARTEC. Biomass energy evolution, [Citado el 1 marzo del 2018] Disponible en internet:< <https://www.imartec.es/es-realmente-la-biomasa-neutra-en-emisiones-de-carbono/>>

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. p.110

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

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

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE LA ENERGÍA. Biomasa: Digestores anaerobios. Departamento de energía. Madrid (2007). ISBN: 13:978-84-96680-21-0. p.48

LINDMARK, Johan; THORIN, Eva; BEL, Rebei; DAHLQUIST, Erik. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. Renewable and sustainable energy reviews 40. 2014. p. 1030-1047.

MARQUEZ, Marjiori; MARTINEZ Sergio. Reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA s o UASB) Antalogia. Centro tecnológico de Aragón. 2011. p.30.

MARTÍ, Nuria. Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestión Process.Dissertation.com. Florida, Estado Unidos. 2006. p. 50.

MINISTERIO DE ENERGÍA. Manual del biogás. Proyecto CHI/00/G32. Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. Chile. 2011. p. 119

MOSET, Veronica; FONTAINE, Doline; MOLLER, Henrik. Co-digestion of cattle manure and grass harvested with different technologies. Effect on methane yield, digestate composition and energy balance. Energy. S0360-5442(17)31444-5. p. 35.

ORGAZ, Arturo. Energía renovable: la biomasa. Empresa provincial de energía en córdoba (EPEC). 0351- 429 6736. p. 1-8

PEREZ, Javier. Estudio y diseño de un biodigestor para aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. Santiago de Chile. Universidad de Chile. 2010. p.77.

ROSATO, Mario A. Managing Biogas Plants a Practical Guide. Green Chemistry and Chemical Engineering. New York. CRC Press. Taylor and Francis Group. 2018. p. 295

SAMAYOA, BUESO, VIQUEZ. Guía implementación de sistemas de biodigestión en eco empresas. Ambiente en Centro América (PREMACA). FIDE. Honduras (2012). p. 70.

SÁNCHEZ, Jesús. Optimización de la agitación de un digestor anaerobio mediante mecánica de fluidos computacional. España, Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. 2016. p. 161.

SEADI, Teodorita; RUTZ, Dominik; KÖTTNER, Michael; FINSTERWALDER, Tobias, VOLK, Silke; JANSSEN, Rainer. Biogas Handbook. University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs. Dinamarca. 2008. ISBN 978-87-992962-0-0

TSAPEKOS, P; KOUGIAS, P.G; EGELUND; LARSEN, U; PEDERSEN, J; TRENEL. P. Improving the energy balance of grass-based anaerobic digestion through combined harvesting and pretreatment. Anaerobe (2016). p. 7.


ANEXOS


ANEXO A


MATERIALES E INSTRUMENTOS USADOS PARA EL DISEÑO DE BERNAL Y QUINTERO

CANTIDAD	ELEMENTO
2	Bidón 60L hermético
2	Balde 5 gal
2	Canasta plástica
2	Embudo
8	Racor macho manguera-rosca
8	Capsula en latón
2	Racor Tee 1/4"
2	Manguera para gas 3/8"
2	Registro de gas
2	Gasómetro
1	Tubo 3/4" PVC x 6m
9	Registro 3/4" PVC
5	Codo 3/4" PVC
1	Limpiador PVC
1	Soldadura PVC
1	Cinta teflón
6	Flanche tanque 3/4"
4	Flanche tanque 1/2"
1	Tee 3/4"
6	Unión 3/4"
1	Tapón 3/4"
3	Poliuretano rígido
1	Plástico de polietileno x5m
10	Lámina de icopor 1cm de grosor
2	Termómetro bimetálico bulbo 9" -20+120°C
2	Manómetro 2" caja negra 0-60 psi
	TOTAL

ANEXO B
INSTRUMENTACIÓN

CARACTERÍSTICA	Termómetro
ILUSTRACIÓN	
Rango de medida	-10°C a 110°C
Resolución	1°C
Largo del bulbo	30cm
Angulo	90°
Material	Acero inoxidable
Marca	Brixco

CARACTERÍSTICA	Manómetro
ILUSTRACIÓN	
Rango de medida	0 a 15 psi
Resolución	0,02 psi
Material caja	Acero negro
Material visor	Vidrio
Marca	Ritherm

CARACTERÍSTICA	pHmetro
ILUSTRACIÓN	
Rango de medida	0 a 14
Resolución	0,1
Precisión	± 0.1 ph ± 0.2 ph
Calibración	calibración manual utilizando el condensador de ajuste

ANEXO C

MATERIALES USADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DIGESTIÓN

MATERIALES	CANTIDADES
Bidón 60L	2 unidades
Embudo	2 unidades
Tubo 3/4" PVC	2 metros
Soldadura PVC	1 unidad
Flanche 1/2"	6 unidades
Flanche 3/4"	2 unidades
Registro 3/4" PVC	6 unidades
Lamina de aluminio	1 unidad
Válvulas check in	6 unidades
Válvulas de globo	2 unidades
Manguera para gas	1 metro
Racor macho manguera-rosca	2 unidades
Racor Tee 1/4"	2 unidades
Varrila de acero inoxidable	2 metros
Lamina acero inoxidable	1 unidad
Acople plástico	1 unidad
Poliuretano rígido	4 unidades
Cajas de cartón	2 unidades
Cinta teflón	2 unidades
Cinta aislante	2 unidades
Termómetro bimetalico	2 unidades
Manómetros	2 unidades

ANEXO D

PROCEDIMIENTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DIGESTIÓN

1. Ya comprados los bidones de 60L, se procede a perforar tres orificios uno tras de otro de manera vertical con una distancia de 10 cm desde la parte inferior de cada tanque con el fin de implementar tres puntos de muestreo a diferentes alturas. Se perfora otro orificio en la mitad del tanque que tenga el diámetro del termómetro bimetálico y por último un orificio ubicado en la mitad de la tapa del bidón.
2. Se procede a cortar 3 tubos PVC con un largo de 30 cm a los que se les adapta válvulas check in a cada uno, posteriormente se acoplan en los bidones, en los tres orificios perforados con flanches.
3. Una vez instaladas los tres tubos en los bidones se procede a adaptar el termómetro bimetálico en el orificio hecho a la mitad del tanque, sellándolo completamente.
4. Se adapta un embudo en la tapa del bidón formando una especie de campana con el fin de direccionar el gas hacia manguera de salida. Este embudo se adaptó de acuerdo con el diseño establecido en los sistemas de digestión tipo UASB.
5. Se adecua una lámina de aluminio, para realizar las placas deflectoras dentro de cada bidón, de tal forma que formen un ángulo de 45° , sí que su altura choque con la campana de la tapa.
6. Se adapta una manguera para gas con un diámetro de 2 cm y un largo de 50 cm en el orificio hecho en el centro de la tapa de los bidones y a lo largo de esta manguera se instala un manómetro y una válvula de globo con el fin de mantener el control del gas.
7. A la salida de la manguera se acondiciona una boquilla que pueda ser acoplada a la bolsa recolectora de gas.
8. Uno de los bidones tendrá un orificio adicional con un acople donde ira la manivela del mecanismo de agitación de manera que pueda ser controlada manualmente. Este mecanismo de agitación es en acero inoxidable, consta de 5 aspas unidas a una varilla.
9. Se acopla una caja de cartón a cada bidón con el fin de rellenar el espacio entre caja y bidón de espuma de poliuretano rígido.

ANEXO E

INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO CORRESPONDIENTES AL SUSTRATO INICIAL.



INFORME DE RESULTADOS AREA DE ANALISIS AMBIENTAL

Información del cliente			
Nombre:	MARIA ALEJANDRA ORTIZ	Dirección:	No Suministrada
e-mail:	alejita.o.r@hotmail.com	Teléfono:	No Suministrado

Fecha Ingreso	2018-02-19	Fecha Emisión	2018-03-08
---------------	------------	---------------	------------

Información de la muestra			
Tipo de Agua:	No Suministrado	Condiciones de recepción:	
Tipo de muestra:	No Suministrado	Ninguna.	
Código de campo:	No Suministrado		
Identificación:	No Suministrado	Informe: AAA	10559

Resultados Obtenidos

Variable	Resultado	Unidades	Método	Fecha de Análisis
Sólidos Suspendidos Totales	24140	mg/L	Gravimétrico / SM 2540 D	2018-03-08
Sólidos Totales	31210	mg/L	Gravimétrico / SM 2540 B	2018-03-08
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	37450	mg O ₂ /L	Colorimétrico / ASTM D1252/12, Método B	2018-03-09

Observaciones a los resultados:	Convenciones
Descripción física de la muestra: Líquido Verde.	< Valor inferior al límite de cuantificación del método. * Variable acreditada ** Variable subcontratada

Notas:

1. El presente informe registra fielmente los resultados de las variables solicitadas por el cliente y corresponden exclusivamente a la muestra enviada y analizada en las fechas indicadas.
2. El informe solo tiene validez al estar firmado por el personal autorizado por AGRILAB LABORATORIOS S.A.S.
3. AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. no presta los servicios de muestreo en campo, por lo tanto no se responsabiliza por los perjuicios derivados de dicho proceso.
4. La verificación de análisis mediante ensayos de laboratorio se realizará únicamente dentro de los tiempos y condiciones estipulados por la Guía de monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM y el SM 1060.
5. AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. es responsable frente al cliente, del trabajo realizado por el subcontratista aprobado por la empresa, excepto en el caso en que el cliente o una autoridad reglamentaria especifique el subcontratista.
6. Si usted tiene alguna inquietud, queja o reclamo sobre sus resultados, por favor comuníquela a través del e-mail: servicioalcliente@agrilab.com.co

Informe de resultados autorizado por:

Myriam Bendeck Lugo
MYRIAM BENDECK LUGO
 Química Director Técnico PQ-1168

Fin del informe

Paola Díaz Pinto
PAOLA DIAZ PINTO
 Química coordinadora de área - PQ 3257

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA

Calle 79 B No. 70 - 16 Bogotá, D.C. PBX: 745 4697
 Para quejas y reclamos comuníquese al E-mail: servicioalcliente@agrilab.com.co
www.agrilab.com.co

Insumos Agrícolas

Registrado ante el ICA según Resolución 001271 del 05 de Mayo de 2014 (Última actualización)

Propietario / Remitente	MARIA ALEJANDRA ORTIZ / MARIA ALEJANDRA ORTIZ		
Identificación suministrada	No especificada		
Descripción	Líquido verde	No. Laboratorio	MO 23682
Fecha de Ingreso	16-feb-18	Fecha de Entrega	05-mar-18

CARACTERIZACIÓN Y COMPOSICIÓN DE MATERIAL ORGÁNICO LÍQUIDO

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO
Carbono Orgánico Oxidable Total	4,19	g/L	Walkley-Black (NTC 5167)
Densidad (20°C)	1,00	g/cm ³	Gravimétrico (NTC 5167)
N Total (NOrg)	1,38	g/L	Sumatoria
Nitrógeno Orgánico (NOrg)	1,38	g/L	Micro-Kjeldhal (NTC 5167)

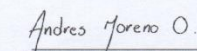
OBSERVACIONES: * N.D. NO DETECTADO

1. El presente informe registra fielmente los resultados de las variables solicitadas por el cliente y corresponden exclusivamente a la muestra enviada y analizada en las fechas indicadas.
2. El informe solo tiene validez al estar firmado por el personal autorizado por AGRILAB LABORATORIOS S.A.S.
3. El presente informe no puede ser reproducido parcial o totalmente, salvo autorización expresa por parte del laboratorio AGRILAB S.A.S.
4. La fecha de ejecución de los ensayos, corresponde al periodo comprendido entre la fecha de ingreso y la fecha de emisión del presente informe de resultados.
5. AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. no presta los servicios de muestreo en campo, por lo tanto no se responsabiliza por los perjuicios derivados de dicho proceso.
6. En el caso de análisis subcontratados, AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. es responsable frente al cliente del trabajo realizado por el subcontratista, siempre y cuando este haya sido aprobado y contratado por el laboratorio.
7. La verificación de análisis mediante ensayos de laboratorio se realizará máximo 15 días hábiles luego de emitido el presente informe de resultados.
8. En Agrilab estamos interesados en la satisfacción de nuestros clientes. Para conocer sus inquietudes, quejas o reclamos sobre los resultados emitidos, hemos dispuesto el siguiente correo electrónico: servicioalcliente@agrilab.com.co, por favor comuníquese con nosotros a través de este medio y con gusto le brindaremos una respuesta clara y oportuna a su solicitud.

ATENTAMENTE,

MYRIAM BÉNDECK LUGO
 Química Director Técnico PQ-1168

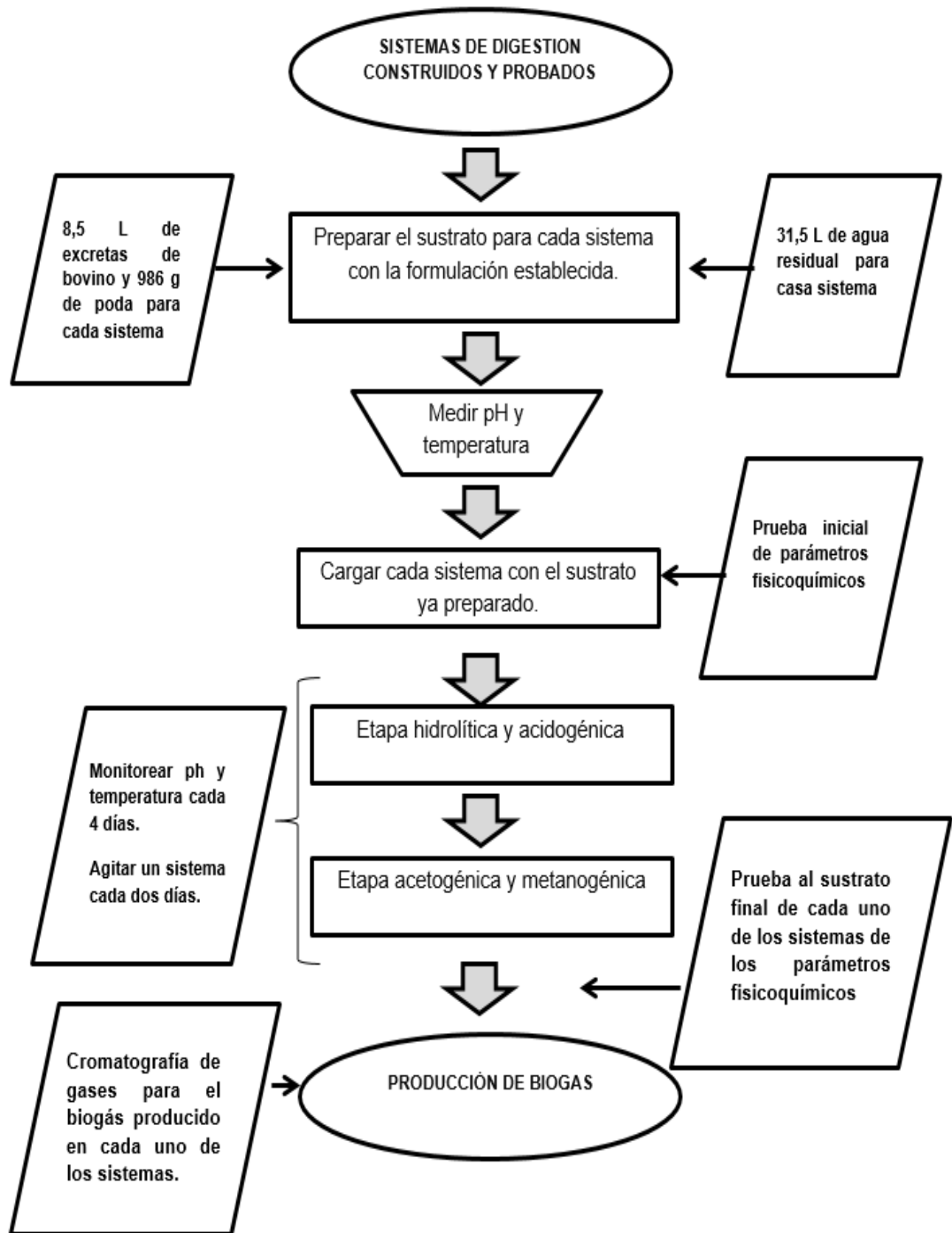
Página 1 de 1


ALVARO ANDRES MORENO OSPINA
 Químico Coordinador de área PQ- 5067

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA

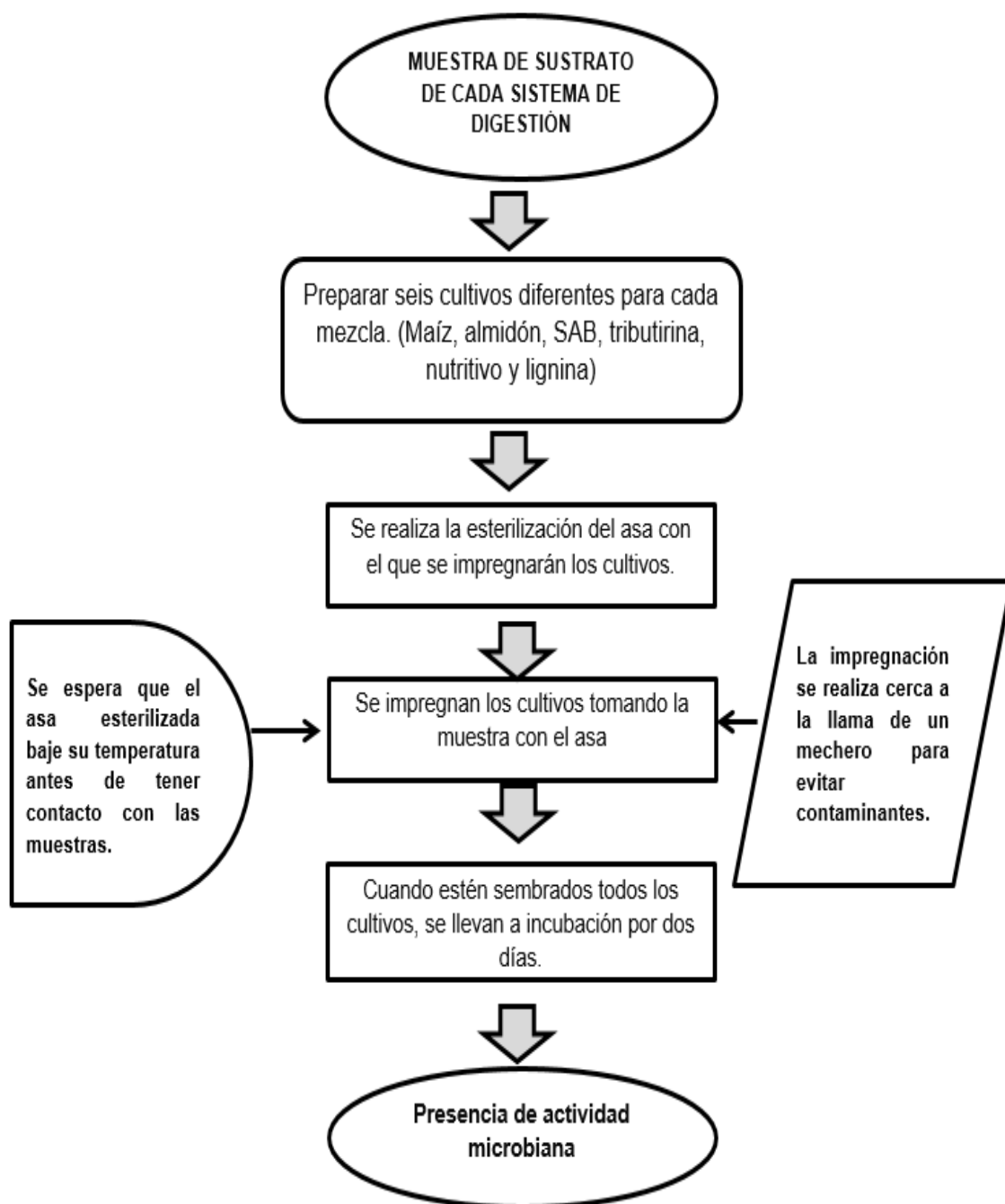
 Calle 79 B No. 70 - 16 Bogotá, D.C. PBX: 745 4697
 Para quejas y reclamos comuníquese al E-mail: servicioalcliente@agrilab.com.co
www.agrilab.com.co

ANEXO F
PROCEDIMIENTO DEL PROCESO DE DIGESTIÓN.



ANEXO G

PROCEDIMIENTO DE LA EVALUACIÓN DE ACTIVIDAD MICROBIANA



ANEXO H

CONDICIONES MONITOREADAS A LO LARGO DEL PROCESO

	SISTEMA DE DIGESTIÓN CON AGITACION		SISTEMA DE DIGESTIÓN SIN AGITACION	
	pH	Temperatura interna	pH	Temperatura interna
Día 1	7.5	15.9	7.5	15.9
Día 5	7.5	15.9	7.5	15.9
Día 8	7.5	15.9	7.5	15.9
Día 12	7.5	15.9	7.5	15.9
Día 15	7.5	16	7.5	15.9
Día 19	7.4	16	7.5	15.4
Día 22	7.4	15.9	7.5	15.4
Día 26	7.3	15.9	7.4	15.4
Día 29	7.2	15.5	7.3	15
Día 34	7.1	15.5	7.2	14.9
Día 37	6.9	15	7.1	14.9
Día 42	6.6	14.9	6.8	14.9
Día 47	6.5	14.9	6.65	14.9
Día 50	6.3	14.9	6.4	14.9
Día 54	6.2	15.3	6.2	15.3
Día 57	6.00	15.5	6.14	15.5
Día 61	6.05	15.5	6.13	15.5
Día 64	6.10	15.9	6.19	15.7
Día 68	6.18	16	6.3	16
Día 71	6.28	16	6.3	16
Día 75	6.5	16	6.28	15.9
Día 77	6.72	16	6.28	15.9
Día 80	6.8	15.9	6.29	15.9
Día 83	6.85	15.8	6.3	15.8
Día 86	6.89	15.8	6.3	15.5
Día 90	6.91	15.8	6.3	15.7

ANEXO I.

INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO CORRESPONDIENTES AL SUSTRATO FINAL.

INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO CORRESPONDIENTES AL SUSTRATO FINAL EN EL SISTEMA DE DIGESTIÓN CON AGITACIÓN.



INFORME DE RESULTADOS AREA DE ANALISIS AMBIENTAL

Información del cliente			
Nombre:	Sra. MARIA ALEJANDRA ORTIZ	Dirección:	No Suministrada
e-mail:	alejita.o.r@hotmail.com	Teléfono:	No Suministrado

Fecha Ingreso	2018-05-11	Fecha Emisión	2018-05-30
---------------	------------	---------------	------------

Información de la muestra	
Tipo de Agua:	No Suministrado
Tipo de muestra:	No Suministrado
Código de campo:	No Suministrado
Condiciones de recepción: La muestra no cumple con las condiciones de preservación requeridas.	
Identificación:	Muestra 1 con agitación sustrato final
Informe:	AAA 10577

Resultados Obtenidos

Variable	Resultado	Unidades	Método	Fecha de Análisis
Sólidos Suspendidos Totales	9140	mg/L	Gravimétrico / SM 2540 D	2018-05-30
Sólidos Totales	14980	mg/L	Gravimétrico / SM 2540 B	2018-05-30
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	22041	mg O ₂ /L	Colorimétrico / ASTM D1252/12, Método B	2018-05-23

Observaciones a los resultados:	Convenciones
Descripción física de la muestra: Líquido Verde, con presencia de sólidos y olor desagradable.	< Valor inferior al límite de cuantificación del método. * Variable acreditada ** Variable subcontratada

Notas:
1. El presente informe registra fielmente los resultados de las variables solicitadas por el cliente y corresponden exclusivamente a la muestra enviada y analizada en las fechas indicadas. 2. El informe solo tiene validez al estar firmado por el personal autorizado por AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. 3. AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. no presta los servicios de muestreo en campo, por lo tanto no se responsabiliza por los perjuicios derivados de dicho proceso. 4. La verificación de análisis mediante ensayos de laboratorio se realizará únicamente dentro de los tiempos y condiciones estipulados por la Guía de monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM y el SM 1060. 5. AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. es responsable frente al cliente, del trabajo realizado por el subcontratista aprobado por la empresa, excepto en el caso en que el cliente o una autoridad reglamentaria especifique el subcontratista. 6. Si usted tiene alguna inquietud, queja o reclamo sobre sus resultados, por favor comuníquela a través del e-mail: servicioalcliente@agrilab.com.co

Informe de resultados autorizado por:

Myriam Bendeck Lugo

MYRIAM BENDECK LUGO
Química Director Técnico PQ-1168

Fin del informe

Paola Díaz Pinto

PAOLA DÍAZ PINTO
Química Coordinadora de área -PQ 3257

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA

Calle 79 B No. 70 - 16 Bogotá, D.C. PBX: 745 4697
Para quejas y reclamos comuníquese al e-mail: servicioalcliente@agrilab.com.co
www.agrilab.com.co

Insumos Agrícolas

Registrado ante el ICA según Resolución 001271 del 05 de Mayo de 2014 (Última actualización)

Propietario / Remitente	MARIA ALEJANDRA ORTIZ / MARIA ALEJANDRA ORTIZ		
Identificación suministrada	M1-CON AGITACION SUSTRATO FINAL		
Descripción	Líquido verde	No. Laboratorio	MO 24081
Fecha de Ingreso	11-may-18	Fecha de Entrega	26-may-18

CARACTERIZACIÓN Y COMPOSICIÓN DE MATERIAL ORGÁNICO LÍQUIDO

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO
Carbono Orgánico Oxidable Total	5,81	g/L	Walkley-Black (NTC 5167)
pH	6,59	Unidades pH	Potenciométrico
Densidad (20 °C)	1,00	g/cm ³	Gravimétrico (NTC 5167)
N Total (NOrg)	0,97	g/L	Sumatoria
Nitrógeno Orgánico (NOrg)	0,97	g/L	Micro-Kjeldhal (NTC 5167)

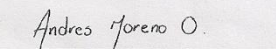
OBSERVACIONES: Todos los parámetros son solubles en agua
*** N.D. NO DETECTADO**

- El presente informe registra fielmente los resultados de las variables solicitadas por el cliente y corresponden exclusivamente a la muestra enviada y analizada en las fechas indicadas.
- El informe solo tiene validez al estar firmado por el personal autorizado por AGRILAB LABORATORIOS S.A.S.
- El presente informe no puede ser reproducido parcial o totalmente, salvo autorización expresa por parte del laboratorio AGRILAB S.A.S.
- La fecha de ejecución de los ensayos, corresponde al periodo comprendido entre la fecha de ingreso y la fecha de emisión del presente informe de resultados.
- AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. no presta los servicios de muestreo en campo, por lo tanto no se responsabiliza por los perjuicios derivados de dicho proceso.
- En el caso de análisis subcontratados, AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. es responsable frente al cliente del trabajo realizado por el subcontratista, siempre y cuando este haya sido aprobado y contratado por el laboratorio.
- La verificación de análisis mediante ensayos de laboratorio se realizará máximo 15 días hábiles luego de emitido el presente informe de resultados.
- En Agrilab estamos interesados en la satisfacción de nuestros clientes. Para conocer sus inquietudes, quejas o reclamos sobre los resultados emitidos, hemos dispuesto el siguiente correo electrónico: servicioalcliente@agrilab.com.co, por favor comuníquese con nosotros a través de este medio y con gusto le brindaremos una respuesta clara y oportuna a su solicitud.

ATENTAMENTE,

MYRIAM BÉNDECK LUGO
 Química Director Técnico PQ-1168

Página 1 de 1


ALVARO ANDRES MORENO OSPINA
 Químico Coordinador de área PQ- 5067

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA

 Calle 79 B No. 70 - 16 Bogotá, D.C. PBX: 745 4697
 Para quejas y reclamos comuníquese al E-mail: servicioalcliente@agrilab.com.co
www.agrilab.com.co

CPPE

INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO CORRESPONDIENTES AL SUSTRATO FINAL EN EL SISTEMA DE DIGESTIÓN SIN AGITACIÓN.



INFORME DE RESULTADOS AREA DE ANALISIS AMBIENTAL

Información del cliente			
Nombre:	Sra. MARIA ALEJANDRA ORTIZ	Dirección:	No Suministrada
e-mail:	alejita.o.r@hotmail.com	Teléfono:	No Suministrado

Fecha Ingreso	2018-05-11	Fecha Emisión	2018-05-30
---------------	------------	---------------	------------

Información de la muestra			
Tipo de Agua:	No Suministrado	Condiciones de recepción: La muestra no cumple con las condiciones de preservación requeridas.	
Tipo de muestra:	No Suministrado		
Código de campo:	No Suministrado		
Identificación:	Muestra 2 sin agitación sustrato final	Informe: AAA	10578

Resultados Obtenidos

Variable	Resultado	Unidades	Método	Fecha de Análisis
Sólidos Suspendidos Totales	9075	mg/L	Gravimétrico / SM 2540 D	2018-05-30
Sólidos Totales	15730	mg/L	Gravimétrico / SM 2540 B	2018-05-30
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	15819	mg O ₂ /L	Colorimétrico / ASTM D1252/12, Método B	2018-05-23

Observaciones a los resultados:	Convenciones
Descripción física de la muestra: Líquido Verde, con presencia de sólidos y olor desagradable.	< Valor inferior al límite de cuantificación del método. • Variable acreditada ** Variable subcontratada

Notas:
1. El presente informe registra fielmente los resultados de las variables solicitadas por el cliente y corresponden exclusivamente a la muestra enviada y analizada en las fechas indicadas. 2. El informe solo tiene validez al estar firmado por el personal autorizado por AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. 3. AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. no presta los servicios de muestreo en campo, por lo tanto no se responsabiliza por los perjuicios derivados de dicho proceso. 4. La verificación de análisis mediante ensayos de laboratorio se realizará únicamente dentro de los tiempos y condiciones estipulados por la Guía de monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM y el SM 1060. 5. AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. es responsable frente al cliente, del trabajo realizado por el subcontratista aprobado por la empresa, excepto en el caso en que el cliente o una autoridad reglamentaria especifique el subcontratista. 6. Si usted tiene alguna inquietud, queja o reclamo sobre sus resultados, por favor comuníquela a través del e-mail: servicioalcliente@agrilab.com.co

Informe de resultados autorizado por:

Myriam Bendeck Lugo

MYRIAM BENDECK LUGO
Química Director Técnico PQ-1168

Fin del informe

Paola Díaz Pinto

PAOLA DIAZ PINTO
Química Coordinadora de área - PQ 3257

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA

Calle 79 B No. 70 - 16 Bogotá, D.C. PBX: 745 4697
Para quejas y reclamos comuníquese al e-mail: servicioalcliente@agrilab.com.co
www.agrilab.com.co

Insumos Agrícolas

Registrado ante el ICA según Resolución 001271 del 05 de Mayo de 2014 (Última actualización)

Propietario / Remitente	MARIA ALEJANDRA ORTIZ / MARIA ALEJANDRA ORTIZ		
Identificación suministrada	M2-SIN AGITACION SUSTRATO FINAL		
Descripción	Líquido verde	No. Laboratorio	MO 24082
Fecha de Ingreso	11-may-18	Fecha de Entrega	26-may-18

CARACTERIZACIÓN Y COMPOSICIÓN DE MATERIAL ORGÁNICO LÍQUIDO

PARÁMETRO	RESULTADO	UNIDADES	MÉTODO ANALÍTICO
Carbono Orgánico Oxidable Total	6,52	g/L	Walkley-Black (NTC 5167)
pH	6,38	Unidades pH	Potenciométrico
Densidad (20°C)	1,01	g/cm ³	Gravimétrico (NTC 5167)
N Total (NOrg)	1,12	g/L	Sumatoria
Nitrógeno Orgánico (NOrg)	1,12	g/L	Micro-Kjeldhal (NTC 5167)

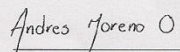
OBSERVACIONES: Todos los parámetros son solubles en agua * N.D. NO DETECTADO

- El presente informe registra fielmente los resultados de las variables solicitadas por el cliente y corresponden exclusivamente a la muestra enviada y analizada en las fechas indicadas.
- El informe solo tiene validez al estar firmado por el personal autorizado por AGRILAB LABORATORIOS S.A.S.
- El presente informe no puede ser reproducido parcial o totalmente, salvo autorización expresa por parte del laboratorio AGRILAB S.A.S.
- La fecha de ejecución de los ensayos, corresponde al periodo comprendido entre la fecha de ingreso y la fecha de emisión del presente informe de resultados.
- AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. no presta los servicios de muestreo en campo, por lo tanto no se responsabiliza por los perjuicios derivados de dicho proceso.
- En el caso de análisis subcontratados, AGRILAB LABORATORIOS S.A.S. es responsable frente al cliente del trabajo realizado por el subcontratista, siempre y cuando este haya sido aprobado y contratado por el laboratorio.
- La verificación de análisis mediante ensayos de laboratorio se realizará máximo 15 días hábiles luego de emitido el presente informe de resultados.
- En Agrilab estamos interesados en la satisfacción de nuestros clientes. Para conocer sus inquietudes, quejas o reclamos sobre los resultados emitidos, hemos dispuesto el siguiente correo electrónico: servicioalcliente@agrilab.com.co, por favor comuníquese con nosotros a través de este medio y con gusto le brindaremos una respuesta clara y oportuna a su solicitud.

ATENAMENTE,

MYRIAM BÉNDECK LUGO
 Química Director Técnico PQ-1168

Página 1 de 1


ALVARO ANDRES MORENO OSPINA
 Químico Coordinador de área PQ- 5067

CENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA

 Calle 79 B No. 70 - 16 Bogotá, D.C. PBX: 745 4697
 Para quejas y reclamos comuníquese al E-mail: servicioalcliente@agrilab.com.co
www.agrilab.com.co

ANEXO J

INFORME DE RESULTADOS DE LA CROMATOGRAFÍA DEL BIOGÁS PRODUCIDO.



Laboratorio de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Sede Bogotá



INFORME DE ENSAYO
Código: FA006001 Versión: 01
Vigencia: 16/07/2012 Página 1 de 3

Consecutivo No. 026 – 2018
Fecha 2018-06-7

Empresa	Universidad de América		
Nombre	María Alejandra Ortiz		
Dirección	Calle 59 No. 130 - 92	Teléfono	3195656594
Correo electrónico	Maria.ortiz2@estudiantes.uamerica.edu.co		

Ensayo	Cromatografía Líquida/gas
Orden de trabajo	LQUI-026-2018

Muestra	
Consecutivo	LQUI-026-2018
Fecha de recepción	11-05-2018
Cantidad	1 muestras

Ejecución del ensayo	
Fecha inicio	30-05-2018
Fecha fin	01-06-2018

1. MÉTODO DE ENSAYO

Preparación de las muestras	Ninguna
Normas o especificación aplicable	Ninguna
Desviación adiciones ó exclusiones de la norma o especificación	Ninguna

2. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS

Muestra No.	Descripción	Observaciones iniciales
026A	Cromatografía de gases, determinación de metano, CO ₂	Ninguna

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

3. DATOS DEL ENSAYO

Equipo	Cromatógrafo HP 5890
Detector	TCD. Temperatura 150 °C
Inyector	Temperatura 100°C
Columna	Malla molecular 13x
Tamaño de Muestra	0,1 ml

Camera 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
Bogotá, Colombia, Sur América
Correo electrónico: labiq_fiaboa@unal.edu.co

INFORME DE ENSAYO
Código: FA006001 Versión: 01
Vigencia: 16/07/2012 Página 2 de 3

Consecutivo No. 026 - 2018
Fecha 2018-06-7

4. RESULTADOS

Muestra	Pico Común 1		Metano		Pico Común 2	
	Tiempo de Retención	Área	Tiempo de Retención	Área	Tiempo de Retención	Área
Inyección 1	6,724	2366	2,782	7172	3,444	26592
Inyección 3	6,747	1648	2,796	7705	3,498	28264
Promedio	6,736	2007	2,789	7439	3,471	27428

mol O2/L	mol CH4/L
0,0000142	0,0021716
0,0000099	0,0023315
0,0000121	0,0022516

mLO2/L	mL CH4/L
0,3182	48,6438
0,2217	52,2256
0,2700	50,4347

% vol O2/vol	% vol CH4/vol
0,137	20,971
0,091	21,402
0,113	21,192

Muestra	% vol O2/vol	% vol CH4/vol	% vol CO2/vol
Inyección 1	0,137013794	20,94241468	78,78336949
Inyección 3	0,090272919	21,26831429	78,01786307
Promedio	0,112994432	21,11001949	78,39044418

Muestra	% vol N2/vol
Inyección 1	0,1372
Inyección 3	0,6235
Promedio	0,3865

ING. JORGE ORLANDO MANRIQUE PERDOMO
Coordinador

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
Bogotá, Colombia, Sur América
Correo electrónico: labio_fisqu@unal.edu.co

ANEXO K

ANOVA

NIVEL DEL FACTOR A:

Repeticiones	Y1	Y2	Yk
1	Y11	Y12	Y1k
2	Y21	Y22	Y2k
3			
R	Yr1	Yr2	Yrk
Total	$\Sigma Yr1$	$\Sigma Yr2$	ΣYrk
Promedio (\bar{Y})	$\Sigma Yr1/r$	$\Sigma Yr1/r$	$\Sigma Yrk/r$

- R= repeticiones
- K= niveles
- Grados de libertad: (V1= k-1) y (V2= n-k)
- α = significancia

FACTOR DE CORRECCION (C):

$$C = \left(\frac{1}{n}\right) * (\Sigma\Sigma y_{ij})^2$$

VARIABILIDAD ENTRE LOS GRUPOS (SCA):

$$SCA = \left(\frac{1}{r}\right) * \Sigma(\Sigma y_{ij})^2 - C$$

VARIABILIDAD DENTRO DE LOS GRUPOS (SCE):

$$SCE = \Sigma(\Sigma y_{ij})^2 - \left(\frac{1}{r}\right) * \Sigma(\Sigma y_{ij})^2$$

VARIABILIDAD TOTAL DE LOS GRUPOS (SCT):

$$SCT = \Sigma(\Sigma y_{ij})^2 - C$$

MEDIA CUADRATICA DE LA VARIABILIDAD CENTRO DE LOS GRUPOS (MCE):

$$MCE = \frac{SCE}{n - k}$$

MEDIA CUADRATICA DE LA VARIABILIDAD ENTRE GRUPOS (MCA):

$$MCA = \frac{SCA}{k - 1}$$

ESTADISTICO DE PRUEBA (F):

$$F = \frac{MCA}{MCE}$$

La distribución es de tipo (F α , v_1 , v_2)

Hipótesis: $H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$

$H_1 =$ al menos μ_1 es diferente

Entonces sí (F > F α , v_1 , v_2), H_0 se rechaza