

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE DIGESTIÓN
ANAEROBIA A PARTIR DE LODOS RESIDUALES DE LA PTAR VILLAS DEL
NUEVO SIGLO, EN LA MESA - CUNDINAMARCA

LINA ROCÍO BAQUERO CADENA
CINDY MELISSA MURILLO MALPICA

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

EVALUACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE DIGESTIÓN
ANAEROBIA A PARTIR DE LODOS RESIDUALES DE LA PTAR VILLAS DEL
NUEVO SIGLO, EN LA MESA - CUNDINAMARCA

LINA ROCÍO BAQUERO CADENA
CINDY MELISSA MURILLO MALPICA

Proyecto integral para optar el título de:

INGENIERO QUÍMICO

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

NOTA DE ACEPTACIÓN

Ing. Duvian Alberto Vera Romero

Ing. Felipe Correa Mahecha

Bogotá D.C., agosto 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano de Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director del Programa de Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y los docentes no son responsables por las ideas y conceptos emitidos en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

Dedico este trabajo de grado a Dios por darme la voluntad para continuar con el trabajo a pesar de las dificultades que se presentaron en el camino, porque gracias a ello, aprendí de los errores y que cuando me caigo debo levantarme con más fuerza.

A mis padres por apoyarme cada día incondicionalmente, por el apoyo moral y económico que me ha permitido llegar hasta este punto de mi carrera, gracias por haberme moldeado como la persona que soy ahora y, por los principios y valores que me han enseñado a lo largo de mi vida. Gracias padres porque gracias a ustedes está meta está cumplida y nunca olviden que este triunfo también es de ustedes.

A mi hermana y a su nutria, por su amor, apoyo y por hacerme los días más felices cuando lo necesitaba además de estar conmigo en momentos difíciles y apoyarme en mis locuras y aciertos.

A mi familia, que ha estado a mi lado todo el tiempo y me han permitido aprender de amor y apoyo a su lado.

A mis amigos quienes me apoyaron y acompañaron durante los años en la carrera, algunas veces ayudaron a redactar y a veces a distraerme y hacerme más ameno este duro trabajo.

A todos ellos dedico este trabajo con un agradecimiento muy grande ya que me han hecho una persona muy feliz a lo largo de mi vida y han ayudado a forjar el carácter y el buen humor que me caracterizan; todos ustedes han hecho parte de momentos que no cambiaría por nada en el mundo.

CINDY MELISSA MURILLO MALPICA

A Dios porque tu amor y tu bondad no tienen fin, me permites sonreír ante todos mis logros que son resultado de tu guía y ayuda; cuando caigo y me pones a prueba, aprendo de mis errores y me doy cuenta que los pones en frente mío para mejorar como ser humano y crecer de diversas maneras; te agradezco inmensamente por darme fuerza para el desarrollo de este proyecto y no cesarán mis ganas de decir que es gracias a ti que esta meta está cumplida.

A mis padres por ser los principales promotores de mis sueños, gracias a ellos por cada día demostrarme su amor, creer en mí y en que puedo lograr todo lo que me proponga, gracias a ellos por haberme forjado como la persona que soy; gracias a mi madre, por estar dispuesta a acompañarme en cada paso que doy y por su admirable dedicación para ser mi ejemplo a seguir; gracias a mi padre por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, por tanta paciencia y por sus palabras de motivación a pesar de las adversidades; gracias... infinitas gracias a los dos, por cada consejo y por cada una de sus enseñanzas que han guiado mi camino y que el día de hoy me traen hasta este punto tan importante en mi vida.

A mis hermanos Laura (mi hermaná) y Luis Miguel, por ser mis cómplices, por su amor y su apoyo incondicional; es una gran bendición que hagan parte de mi vida, gracias a ustedes por nunca bajar los brazos y no permitir que yo lo haga.

A Naia, por su infinito amor gatuno, por su compañía incondicional y por recargarme de energía en largas noches y largos días de estudio.

A mi compañera de trabajo de grado Cindy, por su paciencia y por las mil y una anécdotas que nos dejó el desarrollo de este proyecto.

LINA ROCÍO BAQUERO CADENA

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Universidad de América, por abrirnos sus puertas y formarnos como profesionales integrales en ingeniería química.

A Aguas Tequendama S.A, por la oportunidad de desarrollar nuestro trabajo de grado dentro de una de sus instalaciones y por su colaboración con la información que requerimos para el desarrollo de este proyecto.

A la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Villas del Nuevo Siglo, por abrirnos sus puertas y por su colaboración.

Al Ingeniero Fernando Moreno, por su acompañamiento constante y aportar con su conocimiento al desarrollo del proyecto.

A nuestros padres, por su apoyo económico, por creer en nosotras y acompañarnos en cada paso del desarrollo de nuestro trabajo de grado.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	pág 23
OBJETIVOS	25
1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	26
1.1 AGUAS RESIDUALES	26
1.2 TRATAMIENTO DE AGUAS	26
1.3 BIOMASA	29
1.3.1 Biomasa residual	31
1.3.2 Procesos de transformación de la biomasa	31
1.4 DIGESTIÓN ANAEROBIA	32
1.4.1 Etapas de la digestión anaerobia	32
1.4.2 Parámetros del proceso	34
1.4.2.1 Tiempo de retención	34
1.4.2.2 Temperatura	34
1.4.2.3 pH y alcalinidad	35
1.4.2.4 Macronutrientes y micronutrientes	35
1.4.2.5 Relación Carbono/Nitrógeno	36
1.4.2.6 Contenido de agua de la mezcla	37
1.4.2.7 Inhibición	38
1.4.2.8 Agitación	42
1.5 PRODUCTOS FINALES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	42
1.6 CUANTIFICACIÓN DE CH ₄ POR DESPLAZAMIENTO VOLUMÉTRICO	43
1.7 BIODIGESTORES	44
1.8 LODOS	48
1.9 MICROBIOLOGÍA DE LODOS RESIDUALES	50
1.10 GALLINAZA	53
2. METODOLOGÍA	54
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LODOS, GALLINAZA Y MEZCLA LODO-GALLINAZA	54
2.1.1 Toma de muestras	54

2.1.2 Parámetros fisicoquímicos evaluados	55
2.2 DISEÑO DE LOS DIGESTORES ANAEROBIOS	55
2.2.1 Selección de los biodigestores	55
2.2.2 Parámetros de diseño	56
2.2.2.1 Volumen del reactor	56
2.2.2.2 Tiempo de retención	57
2.2.3 Dimensionamiento de los biodigestores	57
2.2.3.1 Tanque de fermentación	57
2.2.3.2 Campana Fija	58
2.2.4 Construcción de los biodigestores	59
2.2.4.1 Selección del tipo de almacenamiento para el biogás	59
2.2.4.2 Volumen de biogás esperado	60
2.3 DIAGNÓSTICO DE LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS	60
2.3.1 Adecuación de lodos	61
2.3.2 Variables a modificar en la evaluación del proceso	64
2.3.3 Puesta en marcha de los digestores	66
2.3.4 Condiciones de operación	66
2.3.5 Digestato	67
2.4 CUANTIFICACIÓN DE METANO	67
2.5 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA PTAR VILLAS DEL NUEVO SIGLO	72
3. RESULTADOS	73
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LODOS, GALLINAZA Y MEZCLA LODO-GALLINAZA	73
3.1.1 Adecuación de lodos	74
3.2 DISEÑO DE LOS BIODIGESTORES	76
3.2.1 Parámetros de diseño	76
3.2.1.1 Volumen del reactor	76
3.2.1.2 Tiempo de retención	77
3.2.2 Dimensionamiento de los digestores	77
3.2.3 Construcción de los digestores	77
3.2.3.1 Volumen de biogás esperado	78
3.3 DIAGNÓSTICO DE LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS	79

3.3.1 Puesta en marcha de los digestores	79
3.3.2 Condiciones de operación	79
3.3.2.1 Digestión 1	82
3.3.2.2 Digestión 2	88
3.4 CUANTIFICACIÓN DE METANO	95
3.4.1 Digestión 1	95
3.4.2 Digestión 2	98
3.5 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA PTAR VILLAS DEL NUEVO SIGLO	101
3.5.1 Adecuación de lodos	101
3.5.2 Parámetros de diseño	102
3.5.3 Dimensionamiento de los digestores	103
3.5.4 Construcción de los digestores	104
3.5.5 Condiciones de operación	106
4. COSTOS DE INVERSIÓN Y DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN PARA LA PTAR VILLAS DEL NUEVO SIGLO	107
4.1 ANÁLISIS DE INVERSIÓN (CAPEX)	107
4.2 ANÁLISIS DE OPERACIÓN (OPEX)	108
4.2.1 Costos directos de operación	108
4.2.2 Costos indirectos de operación	108
5. CONCLUSIONES	111
6. RECOMENDACIONES	112
BIBLIOGRAFÍA	113
ANEXOS	117

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica	pág 35
Tabla 2. Relación C/N de varios productos residuales	37
Tabla 3. Concentración de amoníaco y su efecto en el proceso	39
Tabla 4. Elementos inhibidores	41
Tabla 5. Características fisicoquímicas de diferentes gases	43
Tabla 6. Características de lodos según tipo	50
Tabla 7. Composición de lodos residuales	50
Tabla 8. Composición nutrientes gallinaza	53
Tabla 9. Relación C/N de materiales ricos en nitrógeno	61
Tabla 10. Matriz de selección	62
Tabla 11. Resultados caracterización	74
Tabla 12. Promedio de temperatura interna	85
Tabla 13. Rango de pH según etapa de digestión	86
Tabla 14. Resultados DQO y sólidos volátiles	88
Tabla 15. Promedio de temperatura interna	92
Tabla 16. Resultados DQO y sólidos volátiles	94
Tabla 17. Resultados	100
Tabla 18. Parámetros de solver	102
Tabla 19. Materiales para la construcción del biodigestor	105
Tabla 20. Costos de inversión	107
Tabla 21. Costos directos de operación	108
Tabla 22. Costos energéticos	108
Tabla 23. Costos de mano de obra	109

LISTA DE GRÁFICAS

	pág
Gráfica 1. Temperatura ambiente digestión 1	82
Gráfica 2. Temperatura externa digestión 1	83
Gráfica 3. Temperatura interna digestor 1- digestión1	84
Gráfica 4. Temperatura interna digestor 2- digestión 1	84
Gráfica 5. pH de los digestores digestión 1	86
Gráfica 6. Temperatura ambiente digestión 2	89
Gráfica 7. Temperatura externa digestión 2	90
Gráfica 8. Temperatura interna digestor 1- digestión 2	91
Gráfica 9. Temperatura interna digestor 2- digestión 2	91
Gráfica 10. pH de los digestores digestión 2	93
Gráfica 11. Volumen acumulado vs día de digestión	96
Gráfica 12. Comparación volumen acumulado y pH digestión 1- digestor 1	97
Gráfica 13. Comparación volumen acumulado y pH digestión 1- digestor 2	97
Gráfica 14. Volumen acumulado vs día de digestión	98
Gráfica 15. Comparación volumen acumulado y pH digestión 2- digestor 1	99
Gráfica 16. Comparación volumen acumulado y pH digestión 2- digestor 2	99

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Entrada PTAR	pág 27
Ilustración 2. Reactor de hiperoxidación	27
Ilustración 3. DAF circular	28
Ilustración 4. Extracción de lodos del reactor DAF	28
Ilustración 5. Lechos de secado	29
Ilustración 6. Sistema de ultrafiltración de membrana	29
Ilustración 7. Producción de biomasa	30
Ilustración 8. Clasificación de la biomasa	30
Ilustración 9. Alternativas de utilización del biogás y sus requerimientos de purificación	43
Ilustración 10. Reacciones llevadas a cabo en la cuantificación	44
Ilustración 11. Biodigestor de domo flotante	45
Ilustración 12. Digestor de domo o campana fija	45
Ilustración 13. Tanque almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno	46
Ilustración 14. Biodigestor de estructura flexible	47
Ilustración 15. Reactor UASB	47
Ilustración 16. Altura de la campana	58
Ilustración 17. Plano del prototipo	59
Ilustración 18. Recolector de biogás	60
Ilustración 19. Parámetros que influyen en el proceso de biodigestión	64
Ilustración 20. Esquema de cuantificación de metano	67
Ilustración 21. pH de la solución de NaOH	68
Ilustración 22. Bolsa llena con solución de NaOH	68
Ilustración 23. Conexión bolsa de solución-equipos de goteo	69
Ilustración 24. Conexión manguera- equipo de goteo	69
Ilustración 25. Montaje para recolección de solución	70
Ilustración 26. Burbujeo en las bolsas de solución	71
Ilustración 27. Bolsas de solución con metano acumulado	71

Ilustración 28. Goteo dentro de los catéteres	72
Ilustración 29. Plantilla de Excel para relación C/N 20:1	75
Ilustración 30. Plantilla de Excel para relación C/N 30:1	76
Ilustración 31. Diagrama PFD de montaje	78
Ilustración 32. Montaje final	78
Ilustración 33. pHmetro OHAUS	80
Ilustración 34. Cinta medidora de pH	80
Ilustración 35. Termómetro ambiental	81
Ilustración 36. Termómetro bimetálico	81
Ilustración 37. Combustión del metano producido	101
Ilustración 38. Plantilla de Excel	102
Ilustración 39. Diagrama PFD del proceso en la PTAR	106

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Equilibrio del nitrógeno amoniacal	pág 38
Ecuación 2. Formación de estruvita	40
Ecuación 3. Tiempo de retención	57
Ecuación 4. Área de la base del reactor	57
Ecuación 5. Altura efectiva	57
Ecuación 6. Altura disponible para la campana	58
Ecuación 7. Volumen de biogás esperado	60
Ecuación 8. Relación C/N	63
Ecuación 9. Volumen de líquido	64
Ecuación 10. Volumen de mezcla lodo-gallinaza	64
Ecuación 11. Cálculo de la altura del digestor	103

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Bacterias presentes en lodos	pág 51
Cuadro 2. Hongos presentes en lodos	51
Cuadro 3. Protozoarios presentes en lodos	52
Cuadro 4. Rotíferos presentes en lodos	52
Cuadro 5. Valores propuestos para cada criterio	63
Cuadro 6. Relación de parámetros a modificar	65
Cuadro 7. Parámetros de solver	75
Cuadro 8. Mezclas para la carga de los digestores	79

LISTA DE ANEXOS

	pág
Anexo A. Diagrama PFD Planta de Tratamiento de Aguas residuales Villas del Nuevo Siglo	118
Anexo B. Procedimiento método Walkley-Black y valoración volumétrica	119
Anexo C. Procedimiento método Kjeldahl y valoración volumétrica	120
Anexo D. Procedimiento método 3050 B de la EPA con ácido nítrico y peróxido de hidrogeno y cuantificación mediante absorción atómica por llama	122
Anexo E. Procedimiento método ASTM D1252/06 método B	123
Anexo F. Procedimiento método SM 2540 D. Gravimétrico	124
Anexo G. Instrumentos de medición	125
Anexo H. Materiales para montaje de cuantificación de metano	127
Anexo I. Materiales para construcción de biodigestores	128
Anexo J. Resultados caracterización lodos	129
Anexo K. Resultados caracterización gallinaza	130
Anexo L. Resultados caracterización mezcla lodo-gallinaza	131
Anexo M. Procedimiento ensamblaje digestores	133
Anexo N. Registro de temperatura ambiente, externa e interna digestión 1	134
Anexo O. Registro de temperatura ambiente, externa e interna digestión 2	138
Anexo P. Registro de pH digestión 1	142
Anexo Q. Registro de pH digestión 2	143
Anexo R. Resultados DQO y sólidos totales digestato	144
Anexo S. Monitoreo de cuantificación	148

ABREVIATURAS

Abreviatura	Término
ABS	Alquilo benceno sulfonatos
AGV	Ácidos grasos volátiles
C/N	Carbono/nitrógeno
CAPEX	Capital Expenditure (Gastos en capital)
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EDAR	Estación Depuradora de Aguas Residuales
EPA	Environmental Protection Agency
g/L	Gramo/litro
L	Litro
m	Metro
OPEX	Operational Expenditure (Gastos operacionales)
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
% p/v	Porcentaje peso/volumen
SV	Sólidos Volátiles
TR	Tiempo de Retención

GLOSARIO

AGUAS RESIDUALES: son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado. Se pueden clasificar en: municipales, industriales y domésticas.

BIODIGESTOR: son conocidos también como plantas (productoras o de producción) de biogás, son recintos o tanques cerrados donde la materia orgánica y el agua residual permanecen un periodo de tiempo, para lograr su descomposición, produciendo biogás y bioabono.

BIOGÁS: es una energía alternativa producido por bacterias metanogénicas que transforman material biodegradable en condiciones anaerobias, compuesta de 30-40% dióxido de carbono y de 60-80% metano y de trazas de otras fases, generados por la biodegradación de biomasa, obtenida de la materia orgánica en un ambiente en ausencia de oxígeno.

BIOMASA: se define biomasa como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedente de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales. La biomasa puede clasificarse según su origen, composición y su estado.

DEMANDA TOTAL DE OXÍGENO O DQO: determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua residual, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo.

DIGESTIÓN ANAEROBIA: es un proceso biológico en el cual la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en biogás (CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2S , etc.), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

GALLINAZA: el excremento de gallina varía en riqueza fertilizante con las sustancias más o menos nitrogenadas que el animal ingiere pues su condición es omnívora. La gallinaza, como cualquier otro desecho orgánico, puede ser tratado con biodigestores lo que acelera el proceso de descomposición y hace más efectiva la transformación de sus elementos lo que en el proceso genera biogás.

LODOS RESIDUALES: subproducto compuesto de agua y sólidos (0.25% - 12%), obtenido en estaciones de tratamiento de aguas residuales tanto urbanas como industriales.

METANO: gas, hidrocarburo alcano más sencillo. Su fórmula química es CH_4 y hace parte de la composición del biogás, resultado de la digestión anaerobia.

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR): puede definirse como el conjunto de instalaciones que tienen por objeto la reducción de la contaminación de las aguas residuales hasta límites aceptables para el cauce receptor.

POTENCIAL Z: es el potencial eléctrico que existe en el plano de corte de la partícula, con una distancia corta de la superficie. Las partículas coloidales dispersas en una solución están cargadas eléctricamente gracias a sus características iónicas y características de bipolaridad.

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

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

RESUMEN

En este trabajo de investigación se evaluó la producción de biogás mediante digestión anaerobia a partir de lodos residuales que se obtuvieron de la PTAR Villas del Nuevo Siglo en el municipio de La Mesa ubicado en el departamento de Cundinamarca.

Inicialmente, se realizó una caracterización de propiedades fisicoquímicas del lodo residual con el fin de conocer la composición de este; obteniendo que el contenido de carbono orgánico es de 21,18 % p/v, de nitrógeno total es 0,012 % p/v y de aluminio es de 106,87 mg/g. Se realizó el cálculo de relación carbono-nitrógeno demostrando que era necesario enriquecer el lodo con un sustrato rico en nitrógeno, que, para este caso, se escogió la gallinaza. Como resultado de la composición de la gallinaza se obtuvo que el contenido de carbono orgánico es de 18,57 % p/v, de nitrógeno total es de 13,67 % p/v. Luego se prepararon las mezclas con una relación C/N de 20:1 y de 30:1, obteniendo una relación volumétrica entre lodo y gallinaza de 10,157:0,343 y de 10,276: 0,224 para un volumen de 10,5 L respectivamente.

Posteriormente se construyeron dos sistemas de digestión iguales para realizar la evaluación del proceso y establecer las condiciones de operación, las cuales son pH inicial y relación C/N. En cuanto a los resultados de la producción de biogás se obtuvo para las condiciones de pH inicial de 6,5 y relación C/N de 20:1 y 30:1, un volumen total de 8,144 L y 10,337 L de metano respectivamente. Para las condiciones de pH inicial de 7,5 y relación C/N de 20:1 y 30:1, se obtuvo un volumen total de 8,272 L y de 10,545 L de metano respectivamente. De este modo, los mejores resultados se presentaron bajo las condiciones de pH inicial de 7,5 y relación C/N de 30:1 con un volumen de metano de 10,545 L.

Con respecto a las especificaciones técnicas en la PTAR Villas del Nuevo Siglo para el procesamiento de 21,047 L/día de lodo es necesario un biodigestor de 5000 L y una proporción de materia orgánica de 778,74 L de lodo por 17,006 L de gallinaza para la digestión.

Finalmente, se obtuvo que los costos de inversión para la implementación del proceso de obtención de biogás en la PTAR son de \$31'956,900 y los costos de operación mensual son de 6'112,758.

Palabras claves: Bacterias metanogénicas, biodigestor, biogás, digestión anaerobia, lodos residuales, PTAR, relación C/N.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la energía utilizada a nivel mundial es en gran parte proveniente de combustibles fósiles, una fuente no renovable, por lo cual con el tiempo ha disminuido su reserva en el mundo; este tipo de energía presenta desventajas significativas, tales como, el impacto ambiental negativo que ha provocado el deterioro de los ecosistemas y efectos adversos sobre la salud humana; razón por la cual se hace indispensable la búsqueda de fuentes renovables limpias que permitan suplir la demanda energética que el constante crecimiento de la población mundial requiere.

En la búsqueda de dichas fuentes se encuentra una oportunidad en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en las cuales, posterior a los tratamientos físicos, químicos y biológicos que se realizan al agua, se producen lodos residuales, donde en condiciones normales de operación deben ser tratados antes de su disposición lo que conlleva varios problemas (altos costos de operación y de inversión, alta producción de CO₂). En el tratamiento de los lodos la etapa más importante es la estabilización, proceso en el que se reduce el volumen, olores, organismos patógenos y la atracción de vectores; los métodos más comunes son la digestión aerobia y anaerobia.

Sin embargo, los problemas en el tratamiento y disposición de los lodos pueden traer beneficios tanto a la PTAR como a la población del municipio si se hace un adecuado uso de estos. Los lodos pueden ser utilizados como fuente de energía por medio de la digestión anaerobia donde se obtiene biogás como producto del proceso, que al ser alimentado a motores reciprocantes de combustión internas, turbinas o microturbinas es transformado en energía eléctrica¹ que puede suplir parcialmente los requerimientos energéticos de la PTAR y la energía térmica para mantener la temperatura en el biodigestor.

En la Provincia del Tequendama departamento de Cundinamarca, se encuentra ubicado el municipio de La Mesa a 65 Km de la capital del país (Bogotá), cuenta con 31,350 habitantes y una extensión de 148 Km², limita al norte con los municipios de Quipile, Cachipay y Zipacón, por el este con los municipios de Bojacá y Tena, por el sur con los municipios de El Colegio y Anapoima y por el oeste con los municipios de Anapoima y Quipile.

En el casco urbano del municipio de La Mesa está situada la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas (PTAR) Villas del Nuevo Siglo, la cual tiene un caudal de diseño de 20 litros/seg, opera 30 días del mes las 24 horas, el caudal actual de procesamiento promedio es de 1,218 litros/seg.

¹ MORALES, Adrián. Propuesta de eficiencia energética utilizando cogeneración con microturbinas. Ciudad Juárez. 2013. Trabajo de grado para optar al título de Maestro en ciencias en energías renovables. Centro de Investigación de Materiales Avanzados A.C. p 11.

Los lodos producidos en la PTAR Villas del Nuevo Siglo, están siendo almacenados en una PTAR aledaña (La Chorrera) ya que no son tratados luego de su extracción del proceso de depuración de aguas, razón por la cual no pueden ser aprovechados; este subproducto contiene componentes de difícil tratamiento, como metales pesados, contaminantes orgánicos y patógenos así como; componentes útiles, como materia orgánica, macronutrientes y micronutrientes, cuya composición es ideal para su utilización como materia prima en la producción de biogás.

Para el desarrollo de este proyecto se realiza un proceso de digestión anaerobia puesto que el proceso aerobio no tiene como producto final el metano debido a que las bacterias metanogénicas son microorganismos anaerobios estrictos, razón por la cual no se puede obtener metano mediante una digestión aerobia y no se da la valorización económica esperada de este residuo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la producción de biogás mediante digestión anaerobia a partir de lodos residuales de la PTAR Villas del Nuevo Siglo en La Mesa - Cundinamarca.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar los lodos residuales de la PTAR Villas del Nuevo Siglo.
- Determinar las condiciones de operación para la obtención de biogás.
- Establecer especificaciones técnicas para el aprovechamiento de lodos en la PTAR.
- Establecer los costos de inversión y de operación del proceso de digestión anaerobia.

1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este capítulo se desarrollaran los conceptos principales para el entendimiento y desarrollo del proceso de digestión anaerobia de lodos residuales.

1.1 AGUAS RESIDUALES

Son aquellas aguas cuyas características originales han sido modificadas por actividades humanas y que por su calidad requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo natural de agua o descargadas al sistema de alcantarillado.²

Se pueden clasificar de la siguiente manera³:

- Aguas residuales municipales: Se pueden definir como la mezcla de aguas de drenaje pluvial o aguas residuales industriales que deben contar con tratamiento previo para su disposición en la red de alcantarillado, con aguas residuales de origen doméstico.
- Aguas blancas: Esta clase de aguas se caracterizan por ser provenientes de la naturaleza sin ningún tipo de tratamiento o alteración por parte del ser humano, en su mayoría provienen de la lluvia, nieve, riego y limpieza de lugares públicos.
- Aguas residuales industriales: Son derivadas de algún tipo de actividad relacionada con procesos productivos, por ejemplo, industria agrícola, energética, minera, entre otras.
- Aguas residuales domésticas: Son producto de las actividades domésticas o comerciales, con alto contenido de desechos fisiológicos, detergentes, grasas y desechos orgánicos, entre otros.

1.2 TRATAMIENTO DE AGUAS

Una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) puede definirse como el conjunto de instalaciones que tienen por objeto la reducción de la contaminación de las aguas residuales hasta límites aceptables para el cauce receptor⁴.

² OEFA- Organismo de evaluación y fiscalización ambiental-. Fiscalización ambiental en aguas residuales. 2014. p 2.

³ ESPIGARES, M. PEREZ, J A. Aguas residuales. Composición. Curso de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR's). Universidad de Salamanca. España. 2007. p 2.

⁴ GRANADOS, Inmaculada Concepción., Generación, Caracterización Y Tratamiento De Lodos De Edar. Universidad de Córdoba. España. 2015. p 11.

Con respecto a lo anterior, la planta de Villas del Nuevo Siglo utiliza un tratamiento de hiperoxidación catalítica; este proceso desestabiliza los coloides presentes en el agua y modifica el potencial Z; se oxidan los compuestos sulfurosos, las macromoléculas presentes que contaminan el agua. La hiperoxidación se acompaña de reacciones auto catalizadas que oxidan la materia orgánica e inorgánica oxidable que se encuentra presente en formación soluble en el agua, inactiva o destruye agentes biológicos presentes en el agua residual.

En el anexo A se presenta el diagrama de flujo de proceso del tratamiento de aguas residuales en la planta, el cual inicia con unas rejillas que tienen diferente espesor y una canaleta Parshall (ver ilustración 1), de esta manera la basura es retenida.

Ilustración 1. Entrada PTAR



Fuente: elaboración propia

La línea de agua cruda es bombeada al sistema de hiperoxidación en acero inoxidable (ver ilustración 2), con baffles internos para dar tiempo de reacción, en cuya entrada se realiza la inyección del hidroxocloruro de aluminio.

Ilustración 2. Reactor de hiperoxidación



Fuente: elaboración propia

Posteriormente la línea de agua oxidada es conducida a un reactor DAF circular (ver ilustración 3) donde ya floculada es sometida a presión para introducir aire comprimido y agitar hasta lograr la dilución del aire en el agua. Paso seguido se despresuriza el agua, desprendiéndose gran cantidad de micro burbujas de aire. Estas se adhieren a los floculos en cantidades suficientes para que su fuerza ascensional supere el reducido peso de los floculos y estos sean elevados a la superficie, de donde son retirados (ver ilustración 4).

Ilustración 3. DAF circular



Fuente: elaboración propia

Ilustración 4. Extracción de lodos del reactor DAF



Fuente: elaboración propia

En esta etapa del tratamiento son generados los lodos secundarios a razón de 21,047 L/día. Estos son conducidos mediante tuberías de PVC a lechos de secado que cuentan con grava y arena, donde se realiza su deshidratación y adición de hidróxido de calcio para reducción de olores (ver ilustración 5).

Ilustración 5. Lechos de secado



Fuente: elaboración propia

La línea de agua clarificada continua a dos tanques de filtración convencional con grava y arena; seguido a esto se conduce a un sistema de filtrado de membranas que opera a presiones inferiores a 250 psi, con una tasa de filtración entre un 85% a 95% y un tamaño de poro hasta de 20Å (ver ilustración 6).

Ilustración 6. Sistema de ultrafiltración de membrana



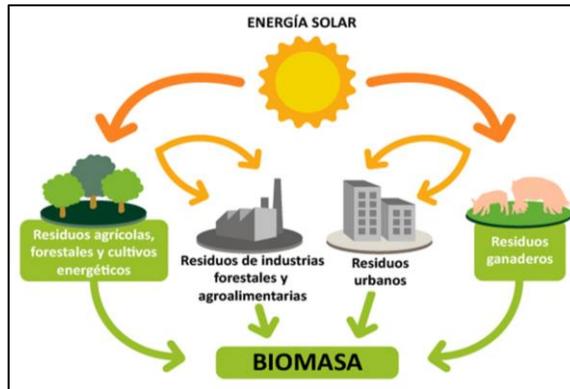
Fuente: elaboración propia

1.3 BIOMASA

Se define biomasa como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedente de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales⁵ (ver ilustración 7).

⁵ DE LUCAS, Ana Isabel; DEL PESO TRONCO, Carlos. Biomasa, biocombustible y sostenibilidad. Ministerio de educación, cultura y deporte del gobierno español. 2012. p 12.

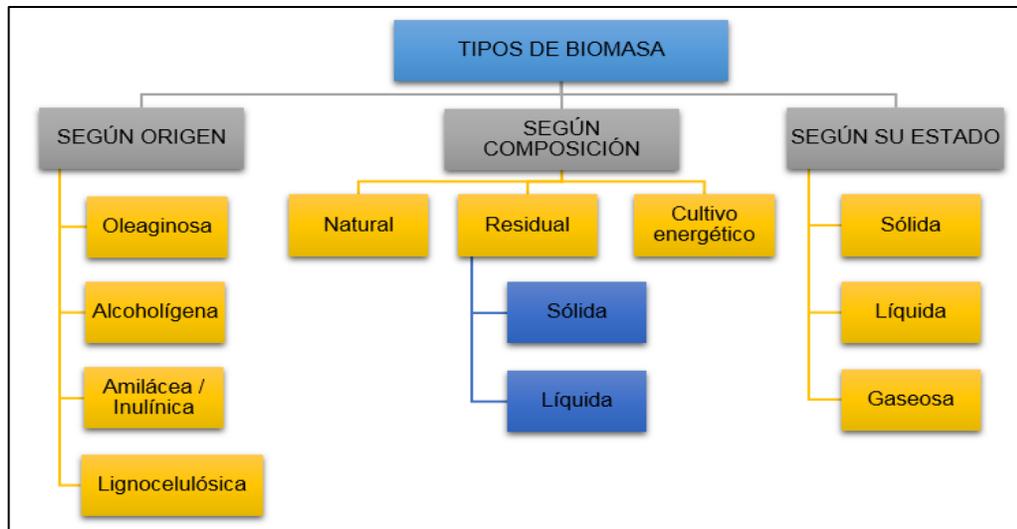
Ilustración 7. Producción de biomasa



Fuente: EBA, estructuras bioclimáticas avanzada S.L. “La biomasa: producir energía con un sistema ecológico”. <http://ebasl.es/producir-energia-con-la-biomasa/>

La biomasa se puede clasificar de diferentes maneras dependiendo de su origen, composición o estado como se puede observar a continuación (Ver ilustración 8).

Ilustración 8. Clasificación de la biomasa



Fuente: elaboración propia.

1.3.1 Biomasa residual. Biomasa residual hace referencia a los subproductos que se derivan de las transformaciones naturales o industriales que se llevan a cabo en la materia orgánica. Algunos ejemplos de biomasa son los residuos de las cosechas, las podas de zonas verdes urbanas, los efluentes ganaderos, los lodos de los sistemas de tratamientos de aguas residuales y los residuos orgánicos de plazas de mercado⁶. Los centros urbanos generan los denominados residuos sólidos urbanos que provienen de diferentes actividades y los cuales constituyen su fracción orgánica.

Cuando su fracción orgánica se descompone, estos residuos generan compuestos volátiles como el metano y el dióxido de carbono, que contribuyen a aumentar el efecto invernadero. Por su composición fisicoquímica se considera que los residuos sólidos orgánicos poseen un considerable valor energético⁷.

1.3.2 Procesos de transformación de la biomasa. La biomasa es la única fuente de energía renovable que puede ser transformada en combustibles gaseosos, líquidos o sólidos, mediante procesos de conversión térmicos y biológicos. La transformación energética de la biomasa genera principalmente biocombustibles y biogás, a partir de los cuales se puede obtener calor, electricidad o fuerza motriz⁸.

Existen diferentes métodos que transforman la biomasa en energía aprovechable, los más utilizados en este momento, los termoquímicos y los biológicos.

- a) **Métodos termoquímicos:** Estos métodos están muy desarrollados para la biomasa seca y están basados en el uso de calor para su transformación. Se utilizan los procesos de:
- **Combustión:** Es la oxidación de la biomasa por el oxígeno del aire, en esta reacción se libera agua y gas carbónico.
 - **Pirolisis:** Es una combustión incompleta a altas temperaturas en condiciones anaerobias.
- b) **Métodos biológicos:** Se basan en la utilización de diversos tipos de microorganismos que degradan las moléculas a compuestos más simples de alta densidad energética. Son métodos adecuados para la biomasa de alto contenido en humedad, los más conocidos son⁹:

⁶ UPME. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Colombia. 2008. p 118.

⁷ Ibid., p. 122.

⁸ MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. Reino Unido, Elsevier Science Ltda. 2001.

⁹ CHUNGANDRO, Kléber R.; MANITIO, Guido J., Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas. Escuela Politécnica Nacional. Tesis de grado. Ecuador. 2010. p 4.

- Fermentación alcohólica: Fermentación que transforma la biomasa en etanol (biocombustible) mediante la fermentación de azúcares.
- Fermentación metánica: Es la digestión anaerobia de la biomasa por bacterias para la obtención de metano¹⁰.

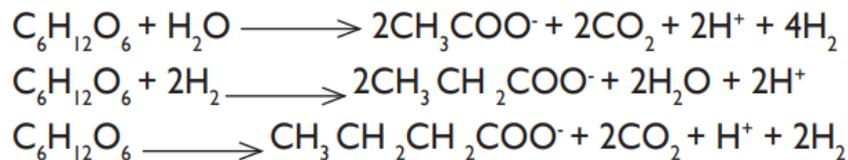
1.4 DIGESTIÓN ANAEROBIA

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y mediante la acción de un grupo de bacterias específicas, se descompone en biogás (CH₄, CO₂, H₂, H₂S, etc.), y en digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

La digestión satisfactoria depende de dos grupos distintos de bacterias, unas constituidas por organismos llamados saprofitos que atacan las sustancias orgánicas complejas y las transforman en compuestos orgánicos sencillos y de un segundo grupo de organismos que son las bacterias formadoras de metano¹¹.

1.4.1 Etapas de la digestión anaerobia. El proceso de digestión anaerobia se lleva a cabo en cuatro etapas donde ocurren diferentes procesos biológicos.

- **Hidrólisis:** En esta etapa, los sustratos complejos (celulosa, proteínas, lípidos) son hidrolizados en compuestos solubles (azúcares, aminoácidos y grasas) por la acción de enzimas extracelulares de las bacterias¹².
- **Acidogénesis:** En esta etapa, los compuestos solubles son fermentados a ácidos grasos volátiles (acético, propiónico, butírico), alcoholes, hidrogeno y CO₂. Esta etapa se conoce también como fermentativa. Es decir, es un periodo de producción intensiva de ácidos, que se inicia con los alimentos y compuestos de más fácil descomposición, como las grasas, donde hay una alta producción de dióxido de carbono (CO₂), ácido sulfhídrico (H₂S), ácidos orgánicos y bicarbonatos; su pH se encuentra en la zona ácida, con valores entre 5.1 y 6.8¹³.



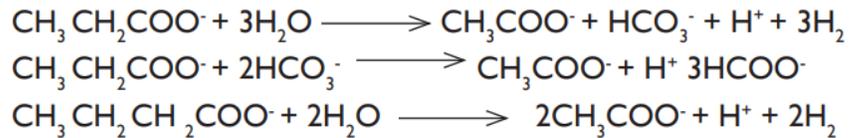
¹⁰ CORONA, Iván. Biodigestores. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México. 2007. p 12.

¹¹ LITUMA, Paula. Biodigestión anaerobia de lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucabamba. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. México.2010. p 29.

¹²OLAYA, Yeison. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Colombia. 2009. p 9.

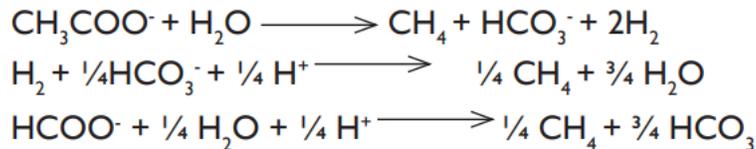
¹³ Ibid., p 9

- **Acetanogénesis:** Esta etapa ocurre cuando las bacterias acetogénicas oxidan el ácido propiónico y el butírico hasta acético e hidrogeno, que son los verdaderos sustratos metanogénicos. Es decir, es un periodo donde se producen ataques a los ácidos orgánicos y compuestos nitrosos, en pequeñas cantidades hay producción de dióxido de carbono (CO₂) nitrógeno e hidrogeno, bicarbonatos y de compuestos amoniacales; se caracteriza por presentar mal olor debido a la presencia de ácido sulfhídrico (H₂S), flotación de gran parte de sus sólidos, y un pH aún en la zona ácida con valores entre 6.6 y 6.8¹⁴.



- **Metanogénesis:** En esta etapa, los últimos compuestos son tomados dentro de las células bacterianas metanogénicas convirtiéndolos en metano y excretándolo fuera de la célula. Este es un periodo de digestión intensiva, de carácter de fermentación alcalina, en el cual hay una digestión de las materias resistentes, como las proteínas, los aminoácidos y la celulosa; esta etapa se caracteriza por la producción de sales de ácidos orgánicos y volúmenes de gas, en una mezcla donde hay un alto porcentaje de metano, y el resto corresponde a dióxido de carbono (CO₂) y nitrógeno. Como características del material digerido, están el olor a alquitrán, hay pequeñas cantidades de sólidos flotantes y el pH se ubica en la zona alcalina, con valores entre 6.9 y 7.4¹⁵.

Las bacterias metanogénicas sólo pueden usar un número limitado de sustratos para la formación de metano, estos son CO₂, H₂; acetato, metanol, metilamina y monóxido de carbono; las reacciones de conversión más usuales en la producción de energía que involucran estos compuestos son:



¹⁴ Ibid., p 10

¹⁵ Ibid., p 10

1.4.2 Parámetros del proceso. Es de gran importancia examinar algunos de los factores importantes que gobiernan el proceso metanogénico. Los microorganismos, especialmente los metanogénicos, son altamente susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales. Muchos investigadores evalúan el desempeño de un sistema anaeróbico en función de la tasa de producción de metano, porque la metanogénesis se considera un paso limitante del proceso¹⁶. Por esta razón es necesario mantener las condiciones óptimas que permitan la realización tanto de las reacciones químicas dentro de la matriz líquida del reactor, como las reacciones bioquímicas intracelulares que dan vida a los organismos en juego.

1.4.2.1 Tiempo de retención. El tiempo de retención es definido como el periodo de tiempo que permanece la materia orgánica dentro del sistema de digestión para alcanzar la degradación. El tiempo de retención está directamente relacionado con la temperatura ambiente¹⁷.

En ausencia de inhibidores, altas cargas orgánicas proporcionan altas producciones volumétricas de biogás aunque también aumenta el riesgo de sobrecargas puntuales que conllevan a la acidificación del reactor¹⁸.

1.4.2.2 Temperatura. La temperatura es una de las variables más importantes, debido a que este parámetro influye en el tiempo de degradación del proceso lo cual implica que los microorganismos se puedan adaptar al proceso de digestión. La velocidad de crecimiento de los microorganismos está ligada directamente al aumento de la temperatura, la cual incrementa la velocidad de reacción en el proceso de digestión, con el fin de incrementar la producción de biogás¹⁹. De acuerdo con la organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura se establecen tres rangos de temperaturas (ver tabla 1) para los diferentes grupos de organismos y el tiempo de fermentación que se estima para la generación de biogás de acuerdo a estos intervalos. Un cambio brusco en la temperatura en el digestor puede llegar a ocasionar la desestabilización del proceso. Por ello, es necesario mantener un rango controlado de temperatura en el digestor. En la mayoría de los casos se opera con un régimen mesófilo debido a que maneja un rango medio de temperatura²⁰.

¹⁶ MINISTERIO DE ENERGÍA. Manual del biogás. Proyecto CHI/00/G32. Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. Chile. 2011. p 29.

¹⁷ OLAYA, op. cit., p 11.

¹⁸ Ibid. p 42.

¹⁹ SILVA, Pablo. Evaluación de un digestor para efluentes porcinos con fines de saneamiento y producción de energía. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 1991. p 68.

²⁰ MINISTERIO DE ENERGÍAS, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. p 38-40.

Tabla 1. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrófilos	4 - 10 °C	15 - 18 °C	20 - 25 °C	Alrededor de 100 días
Mesófilos	15 - 20 °C	25 -35 °C	35- 45 °C	30 - 60 días
Termófilos	25 - 45 °C	50 -60 °C	75 - 80 °C	10 - 15 días

Fuente: LAGRANGE, B. 1979. Biomethane. Principes, techniques, utilization. Vol.2. Edisual / Energies Alternatives. p 249.

1.4.2.3 **pH y alcalinidad.** El proceso anaeróbico es afectado adversamente con pequeños cambios en los niveles de pH que se encuentran fuera del rango óptimo. Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica. Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. El rango óptimo de pH para el buen funcionamiento del sistema de digestión se presenta entre 6.5 y 7.5²¹.

Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano y, por tanto, tiene menores cualidades energéticas. Debido a que la metanogénesis se considera la etapa limitante del proceso, es necesario mantener el pH del sistema cercano a la neutralidad. Los acidogénicos son significativamente menos sensibles a valores más extremos de pH²².

1.4.2.4 **Macronutrientes y micronutrientes.** Al igual que en todas las operaciones bioquímicas, se requieren macronutrientes (carbono, nitrógeno y fósforo) y micronutrientes (minerales traza) en el proceso anaeróbico para la síntesis de nueva biomasa. Sin embargo, una de las ventajas de los procesos de digestión anaerobia, frente a los procesos aerobios, es su baja necesidad de nutrientes derivada de los bajos índices de producción de biomasa que presentan los microorganismos anaerobios. Se han identificado metales traza esenciales para los microorganismos anaerobios tales como hierro, cobalto, molibdeno, calcio, magnesio, zinc, cobre a niveles de mg/L y la vitamina B₁₂ en niveles µg/L, ya que se ha demostrado que mejoran la producción de metano²³.

Los metales trazas más importantes y su rol en el proceso de digestión se muestran a continuación:

²¹ OLAYA, op. cit., p 11.

²² MINISTERIO DE ENERGÍA, op. cit., p 43.

²³ Ibid., p 46.

Níquel: el Ni es particularmente importante para los metanogénicos debido a que es un constituyente estructural del factor F430, el cual se encuentra exclusivamente en las bacterias metanogénicas. El níquel participa en hidrogenasas, enzimas que captan o liberan H₂.

Cobalto: El Co es importante debido a que también es un constituyente estructural de la vitamina B₁₂, la cual cataliza la metanogénesis. El níquel, cobalto y otros minerales traza son esenciales para la degradación del metanol en un reactor bajo condiciones mesofílicas.

Amoniaco: Este parámetro es importante cuando se utilizan determinados materiales que contienen un alto porcentaje, como es el caso de los estiércoles de aves. Es recomendable para un correcto funcionamiento del biodigestor, que los niveles dentro del sistema deben mantenerse por debajo de los 2000 mg/l, para lo cual se aumentan las diluciones de entrada del material²⁴.

El **manganeso** (Mn) es un cofactor de ciertas enzimas, y a veces puede sustituir al Mg⁺⁺. El **cobalto** (Co) se requiere casi exclusivamente para la vitamina B₁₂. El **zinc** (Zn) interviene en la estabilización de complejos enzimáticos como las ADN- y ARN-polimerasas. El **molibdeno** (Mo) participa en las llamadas molibdoflavoproteínas, implicadas en la asimilación de nitratos. También participa como cofactor en el complejo nitrogenasa.

Nitrógeno: Es un nutriente esencial para los seres vivos, ya que es uno de los constituyentes principales de compuestos vitales como aminoácidos, proteínas, enzimas, nucleoproteínas, ácidos nucleicos, así como también de las paredes celulares y clorofila en los vegetales.

1.4.2.5 **Relación Carbono/Nitrógeno.** Los materiales de fermentación están compuestos en su mayor parte por carbono (C) y también contienen nitrógeno (N), entonces se establece la relación entre ellos (C/N), la cual influye sobre la producción de gas. Una relación de 20:1 a 30:1 es aceptable; mezclas de materiales de fermentación con alto contenido de nitrógeno con material de fermentación con alto contenido de carbono generan una elevada producción de gas. Se muestra en la tabla 2 las relaciones C/N para varios productos residuales:

²⁴ OLAYA, op. cit., p 7.

Tabla 2. Relación C/N de varios productos residuales.

Sustancia	Relación C/N
Orina	0.80
Estiércol equino	25
Estiércol vacuno	18
Aserrín	511
Estiércol de aves	32
Pasto	27
Estiércol ovino	29
Estiércol porcino	13
Excretas humanas frescas	2.90

Fuente: OLAYA, Y. 2009. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Colombia. p 6.

El exceso de cualquiera de los dos componentes conlleva a una situación de carencia. Si el sustrato de partida es rico en carbono y pobre en nitrógeno, la fermentación será lenta, la temperatura no se eleva y el carbono se perderá en la producción de dióxido de carbono (CO₂). Para el caso contrario, en altas concentraciones de nitrógeno, este se acumula en sus formas amoniacales, inhibiendo la actividad biológica del medio²⁵.

1.4.2.6 Contenido de agua de la mezcla. Las bacterias y otros microorganismos no pueden funcionar efectivamente cuando el contenido de agua de la mezcla es demasiado bajo, y la cantidad de biogás producido será pequeña. Cuando la mezcla es demasiado diluida, se puede digerir relativamente poca materia orgánica y la producción del biogás es limitada. El uso primordialmente de excreta humana y orina, estiércol animal y desechos de agricultura como alimento para el digestor, deberá tener una razón de biomasa a agua entre 1:1 y 1:3. Cuando el material de alimento consta principalmente de residuos vegetales, se requiere más agua, en una razón de 1:3 o 1:4²⁶.

²⁵ AMBIENTUM, Enciclopedia medioambiental. Consultado el 21 de febrero de 2019. p 1. Disponible línea: <https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/relacion_carbono_nitrogeno.asp>.

²⁶ Ibid., p 7.

1.4.2.7 **Inhibición.** El proceso de digestión anaerobia es inhibido por la presencia de sustancias tóxicas en el sistema, estas sustancias pueden formar parte de las materias primas que entran al digestor, pueden ser subproductos o coproductos de la actividad metabólica de los microorganismos que intervienen en el proceso. Para contrarrestar el efecto tóxico de una sustancia es posible, sólo en algunos casos, realizar aclimatación de la población de microorganismos, ya que muchas de estas sustancias a bajas concentraciones son estimuladoras del proceso fermentativo²⁷.

➤ **Ácidos grasos volátiles.** La concentración de AGV (ácidos grasos de cadena corta (C₂-C₆)) que son productos intermedios mayoritarios del proceso anaerobio es uno de los parámetros más eficientes para evidenciar la evolución del proceso. Cuando el proceso se da en forma adecuada la concentración de AGV en el efluente es relativamente baja usualmente en el rango de 50-250 mg/L. Cuando la relación simbiótica entre acidogénicos y metanogénicos se rompe, los AGV se acumulan. Las formas no ionizadas de AGV inhiben las bacterias metanogénicas cuando presentan concentraciones de 30-60 mg/L. Un aumento en la concentración de ácidos volátiles en el sistema, implica una desestabilización del proceso y, en consecuencia, una disminución de la producción de biogás²⁸.

➤ **Hidrógeno.** Este compuesto es un producto intermedio importante del proceso anaerobio. Su acumulación en el medio provoca la inhibición de la acetogénesis y, consecuentemente, la acumulación de AGV²⁹.

➤ **Nitrógeno amoniacal.** Durante el proceso anaerobio, el nitrógeno orgánico es hidrolizado dando lugar a formas amoniacales. Aunque el nitrógeno amoniacal es un nutriente importante para el crecimiento bacteriano, una concentración excesiva puede limitar su crecimiento. El nitrógeno amoniacal es la suma del ión amonio (NH₄⁺) y del amoníaco (NH₃). Ambas especies se encuentran en equilibrio químico, y la concentración relativa de cada una depende del pH, tal como indica el equilibrio³⁰ (ver ecuación 1).

Ecuación 1. Equilibrio del nitrógeno amoniacal



Fuente: DAGUERRE, Silvana. Recuperación de amoníaco mediante membranas semipermeables a partir de residuos ganaderos. Orihuela. 2015. p 7.

²⁷ MINISTERIO DE ENERGÍA, op. cit., p 46.

²⁸ Ibid., p 47.

²⁹ Ibid., p 47.

³⁰ Ibid., p 47.

La especie que parece inhibir el proceso es el amoniaco libre ya que se ha comprobado experimentalmente que aumenta a pH alcalino. Es de importancia decir que el efecto inhibidor del amoniaco está relacionado también con la temperatura de digestión, se ha reportado que los digestores que operan en un rango de temperatura termófilo son más susceptibles a presentar inhibición que los que operan en un rango mesófilo³¹.

A continuación en la tabla 3 se presentan los rangos de concentración de amoniaco a los cuales se presenta inhibición en la digestión anaerobia.

Tabla 3: Concentración de amoniaco y su efecto en el proceso

Amoniaco-N (mg/L)	Efectos
50 -100	Benéficos
200 - 1000	Sin efectos adversos
1500 – 3000	Efectos inhibitorios a niveles de pH alto
Sobre 3000	Tóxico

Fuente: MCCARTY, P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals. Part III: Toxic materials and their control. Public Works 91–94. 1964.

❖ **Técnicas de extracción de amonio.** Existen varias técnicas para la extracción de amonio. Se pueden dividir en técnicas para la captura de amonio (en vías a una posterior reutilización) y técnicas para la eliminación de amonio (fundamentalmente mediante la formación de N₂ para su posterior emisión a la atmósfera)³².

- Técnicas de recuperación de amonio
- Stripping en forma de amoniaco y absorción: Es un proceso por el cual el nitrógeno amoniacal pasa a una corriente de aire. Este proceso se debe combinar con la absorción posterior de amoniaco en una corriente de agua a fin de que no se emita a la atmosfera. Como resultado de esto se obtiene agua amoniacal o una sal de amonio. El proceso de stripping se ve favorecido si el pH en la entrada del proceso es alto y/o la temperatura es

³¹ Ibid., p 48.

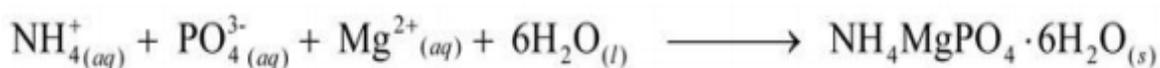
³² DAGUERRE, Silvana. Recuperación de amoniaco mediante membranas semipermeables a partir de residuos ganaderos. Orihuela. 2015. Máster Universitario de Investigación en gestión, tratamiento y valorización de residuos orgánicos. Escuela Politécnica Superior de Orihuela. p 9.

superior a 60 °C. El proceso de absorción requiere que el agua de absorción tenga un pH ácido³³.

- Concentración térmica (evaporación al vacío y secado): Se trata de un proceso por el cual se separa el agua por medio de su evaporación. A fin de que los vapores no causen problemas de contaminación a la atmósfera, la evaporación debe realizarse al vacío, a una temperatura entre 50 °C y 60 °C y con condensación posterior de los vapores³⁴.

Precipitación de sales de amonio (estruvita): La formación de estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) ha sido ampliamente utilizada en el campo de la depuración de efluentes y aguas residuales, tanto para la recuperación de los fosfatos (PO_4^{3-}) como del $N-NH_4^+$ contenidos en las mismas. Esta reacción de precipitación vendría dada por la ecuación 2. El rendimiento del proceso de formación de la estruvita supera en algunos casos porcentajes de recuperación superiores al 90% del contenido inicial de $P-PO_4^{3-}$ y/o $N-NH_4^+$ ³⁵.

Ecuación 2. Formación de estruvita



Fuente: DAGUERRE, Silvana. Recuperación de amoniaco mediante membranas semipermeables a partir de residuos ganaderos. Orihuela. 2015. p 14.

- Técnicas de eliminación de amonio
 - Nitrificación-Desnitrificación (NDN): Este proceso tiene como objetivo básico la eliminación de nitrógeno que hay en un residuo. Se trata de un proceso microbiológico en el cual el amonio es oxidado por bacterias autótrofas a nitrato en presencia de oxígeno y carbono inorgánico (nitrificación) y, a continuación, ese nitrato es reducido por bacterias heterótrofas a nitrógeno molecular gas, en ausencia de oxígeno y carbono orgánico (desnitrificación). El nitrógeno molecular (N_2) es un gas inerte, componente mayoritario de la atmósfera³⁶.
- **Sulfatos y sulfuros.** En presencia de sulfatos, las bacterias metanogénicas compiten con las sulfato-reductoras por los mismos sustratos (acetato e hidrógeno), mostrando éstas últimas ventajas termodinámicas y cinéticas sobre las primeras. El resultado de esta competencia determina la proporción de ácido

³³ Ibid., p 9.

³⁴ Ibid., p 10-11.

³⁵ Ibid., p 13-14.

³⁶ Ibid., p 14-15.

sulfhídrico y metano en el biogás producido. El sulfuro es también un inhibidor para los grupos bacterianos metanogénicos. La forma más tóxica corresponde a la no ionizada (H₂S), por lo que la inhibición se favorece a pH bajo y a bajas temperaturas. La forma ionizada (HS⁻) presenta menor toxicidad³⁷.

➤ **Aluminio.** El aluminio puede causar inhibición a las bacterias anaeróbicas ya que entra en competencia con el hierro y el manganeso los cuales son micronutrientes requeridos por las bacterias para su metabolismo. El aluminio puede adherirse a la membrana o pared microbiana lo que causa mal funcionamiento y por lo tanto afecta negativamente el crecimiento de las bacterias anaerobias³⁸.

En la tabla 4 se pueden apreciar valores de concentraciones de ciertos elementos inhibidores, valores que se deben tomar como orientativos, puesto que las bacterias que intervienen pueden con el tiempo adaptarse a condiciones que en un principio las afectaba de forma muy marcada.

Tabla 4. Elementos inhibidores.

Inhibidores	Concentración inhibidora
SO ₄	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
Nitrato	0.05 mg/L
Cu	100 mg/L
Cr	200 mg/L
Ni	200-500 mg/L
CN	25 mg/L
ABS (Detergente sintético)	25 mg/L
Al	2500 mg/L
Na	20-40 mg/L
K	2500-4500 mg/L
Ca	2500-4500 mg/L
Mg	1000-1500 mg/L

Fuente: CHUNGANDRO NACAZA, Kléber R., MANITIOCAHUATIJO, Guido J. Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas. Escuela Politécnica Nacional. Tesis de grado. Ecuador. 2010. p 23.

³⁷ MINISTERIO DE ENERGÍA, op. cit., p 49.

³⁸ CHENG, Jay. Biomass to renewable energy processes. Boca Raton. CRC Press. 2010. p 173.

1.4.2.8 **Agitación.** La agitación tiene como objetivo los siguientes aspectos³⁹:

- Remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas.
- Mezcla del sustrato fresco con la población bacteriana.
- Evitar que se forme una biopelícula al interior del digestor.
- Establecer una densidad uniforme en la población bacteriana y evitar que deje de existir actividad biológica, que puede inhibir el proceso.

Existen diferentes mecanismos de agitación entre los que se encuentran agitación manual, agitación por medio de la entrada y salida de líquidos que entran al digestor, agitación de tipo electromecánico por medio de un motor eléctrico acoplado a una hélice y por último, existen procesos de recirculación de sustrato por medio de bombas.

1.5 PRODUCTOS FINALES DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA

En un proceso de digestión anaerobia se pueden encontrar dos productos principales como lo son el biogás y el bioabono. El biogás es una mezcla gaseosa principalmente formada por dióxido de carbono (30% - 45%) y metano (55% - 70%), aclarando que también contiene diversas impurezas. La composición del biogás depende de factores como el material digerido y el funcionamiento del proceso.

Por otro lado, también se produce bioabono, en el cual las características cambian dependiendo del tipo de tecnología usada en el proceso o la materia prima inicial. Se debe tener en cuenta que la cantidad de materia orgánica en el bioabono es mucho menor a la existente en la materia inicial ya que una parte de esta es usada en la producción de metano. Por último vale la pena aclarar que el bioabono contiene un alto contenido de nitrógeno amoniacal y un bajo contenido de nitrógeno orgánico, ya que gran parte de la materia orgánica de este producto se mineraliza en el proceso.⁴⁰

Ahondando en el biogás, es necesario tener en cuenta que es un biocombustible capaz de reemplazar otros combustibles como por ejemplo el gas natural. A continuación se muestra en la tabla 5 las características fisicoquímicas de diferentes tipos de gases.

³⁹ CHUNGANDRO, op. cit., p 22.

⁴⁰ VARNERO, Teresa. Manual del biogás. Santiago de Chile, 2011. p 16. ISBN 978-95-306892-0.

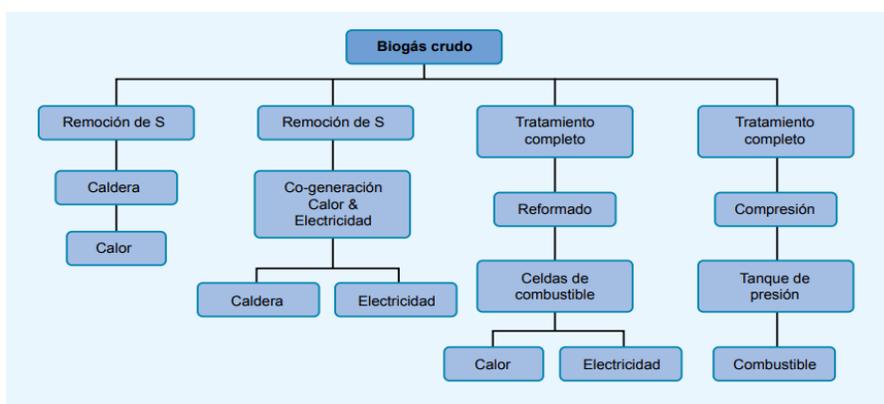
Tabla 5. Características fisicoquímicas de diferentes gases

Parámetro	Unidades	Gas natural	Gas de síntesis	Biogás (70% CH ₄)
Poder calorífico	kWh / m ³	8,83	4,47	6
Densidad	kg / m ³	0,82	0,51	1,21
Velocidad máx. de llama	m / s	0,39	0,7	0,25
Requisito teórico de aire	m ³ aire / m ³ gas	9,53	3,83	5,71
Concentración máxima de CO ₂	% (v)	11,9	13,1	17,8
Punto de condensación	° C	59	60	60 – 160

Fuente: CONAGUA. Guía Técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. 2017. p 43.

Además, el biogás es un producto muy versátil ya que dependiendo del proceso de purificación que se le realice, se puede emplear de diferentes maneras.

Ilustración 9. Alternativas de utilización del biogás y sus requerimientos de purificación.



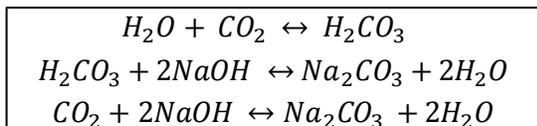
Fuente: MINISTERIO DE ENERGÍA. Manual del biogás. Proyecto CHI/00/G32. Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. Chile. 2011. p 29.

1.6 CUANTIFICACIÓN DE CH₄ POR DESPLAZAMIENTO VOLUMÉTRICO

El método volumétrico se basa en la cuantificación del volumen de metano producido mediante el uso de una sustancia desplazante, como el NaOH o el KOH, en un rango de 15 -20 g/L, por su propiedad de reaccionar con el CO₂ presente en el biogás, permitiendo una medición más aproximada del volumen de metano producido. Se recomienda chequear que el pH del NaOH sea superior a

12 unidades para garantizar que éste secuestre el CO₂ producido⁴¹. En la ilustración 10 se presentan las reacciones que se llevan a cabo:

Ilustración 10. Reacciones llevadas a cabo en la cuantificación



Fuente: PRADA, Abelardo. CORTÉS, Caroll. Experiencias en la captura de los gases de combustión de la cascarilla de arroz con soluciones alcalinas. Grupo de Investigación Gestión Ambiental Sostenible. Universidad de los Llanos. Villavicencio. 2011. p 26.

1.7 BIODIGESTORES

Los biodigestores conocidos también como plantas (productoras o de producción) de biogás, son recintos o tanques cerrados donde la materia orgánica y el agua residual permanecen un periodo de tiempo, para lograr su descomposición, produciendo biogás y bioabono⁴².

Tipos de biodigestores

Existen muchos tipos de biodigestores, pero los más comunes son el de domo flotante, tanque de almacenamiento y cúpula de polietileno, de estructura flexible, pozo séptico y Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB por sus iniciales en inglés, Upflow Anaerobic Sludge Blanket).

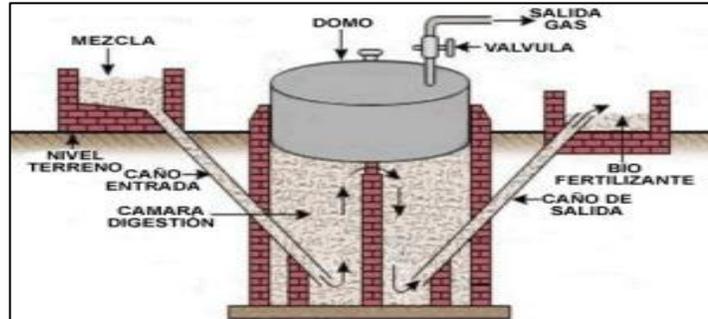
Biodigestor de domo flotante: Presenta una forma de cilindro, siendo lo más característico una cúpula de gas flotante. La cúpula de gas puede flotar sobre el sustrato a digerir o sobre una chaqueta de agua, sobre un soporte que puede ser interno o externo, de modo que el movimiento es ascendente al aumentar la cantidad de biogás, y descendiente al ir disminuyendo la cantidad de gas. Este tipo de reactor ha sido utilizado principalmente para la digestión de excrementos animales y humanos, con alimentación de sustrato continuo, en pequeños a medianos predios, presentando tamaños de reactor de 5 a 15 m³. Sin embargo,

⁴¹ PÉREZ, Andrea. Actividad metanogénica específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. Revista EIDENAR. Ejemplar 9/Enero-Diciembre 2010. Universidad del Valle. Colombia. p 1.

⁴² YANK et al., citado por GARCÉS, Luz.; GUTIERREZ, Paula. Producción de biogás a partir de residuos agrícolas. Proyecto de investigación. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Colombia. 2014. p 13.

estos reactores han sido implementados por instituciones o zonas agrícolas/lecheras, llegando a tamaños de 20 a 100 m³⁽⁴³⁾.

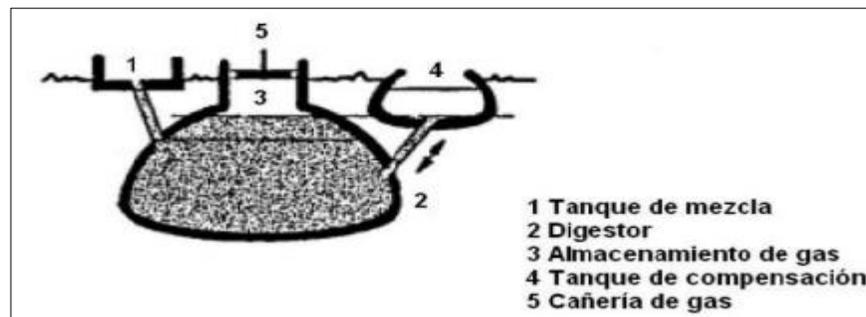
Ilustración 11. Biodigestor de domo flotante



Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE FORMACIÓN DOCENTE. Energía: Características y contextos. Ministerio de Educación. Colombia. 2012. p 159.

Biodigestor de Domo Fijo (Tipo “Chino”): Este reactor se caracteriza por poseer una cúpula rígida en el tope, donde se almacena el biogás generado, y un tanque de compensación, también llamado de desplazamiento. Cuando se inicia la generación de biogás, el sustrato digerido es desplazado al tanque de compensación. Al aumentar el volumen de gas almacenado en la cúpula, aumenta la presión del gas, y, en consecuencia, existe una mayor altura de sustrato digerido en el tanque de compensación⁴⁴.

Ilustración 12. Digestor de domo o campana fija



Fuente: HERNÁNDEZ, Anibal. El potencial de los biodigestores como técnica sostenible para la producción de biogás en la Comunidad Indígena Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Tesis de licenciatura. México D.F. Universidad Autónoma. 2010. p 17.

⁴³ SCHLEENSTEIN, 2009, p 26. Citado por: HERNÁNDEZ, Anibal. El potencial de los biodigestores como técnica sostenible para la producción de biogás en la Comunidad Indígena Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Tesis de licenciatura. México D.F. Universidad Autónoma. 2010. p 18.

⁴⁴ SCHLEENSTEIN, 2009, p 24. Citado por: HERNÁNDEZ, Anibal. El potencial de los biodigestores como técnica sostenible para la producción de biogás en la Comunidad Indígena Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Tesis de licenciatura. México D.F. Universidad Autónoma. 2010. p 17.

Biodigestor de tanque de almacenamiento y cúpula de polietileno: Este tipo de digestor se caracteriza por poseer una cúpula de polietileno semiesférica, en vez de una cúpula fija o móvil, de modo que presenta una disminución significativamente en los costos de inversión. El diseño del digestor sigue la base del tipo “Chino” e “Indio”, pero se diferencia en que se aprovecha una fosa en suelos impermeables, de modo que se recubren las paredes y la base con una delgada capa de cemento. Esto reduce el costo de inversión significativamente pero también su vida útil, estimándose entre dos a cinco años⁴⁵.

Ilustración 13. Tanque almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno



Fuente: VILLEGAS AGUILAR, Pedro. Desarrollo y perspectivas de la tecnología del biogás en los países subdesarrollados. Universidad Cienfuegos. Cuba. 2006. p 5.

Biodigestor de estructura flexible: La planta de balón se compone de un tubular en material plástico (polietileno, PVC, plastilona, entre otros, y una combinación de éstos) completamente sellado, la entrada y la salida están sujetas directamente a las paredes de la planta⁴⁶.

⁴⁵ SCHLEENSTEIN, 2009, p 26. Citado por: HERNÁNDEZ, Anibal. El potencial de los biodigestores como técnica sostenible para la producción de biogás en la Comunidad Indígena Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Tesis de licenciatura. México D.F. Universidad Autónoma. 2010. p 21.

⁴⁶ BOTERO, PRESTON. 1986. Citado por: OLAYA, Yeison. Op. cit., p 15.

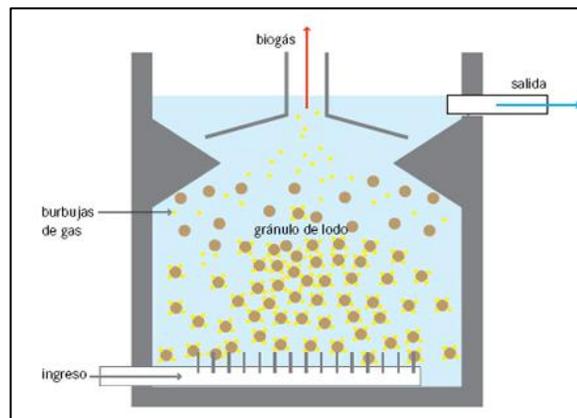
Ilustración 14. Biodigestor de estructura flexible



Fuente: CASTILLOS, Ana. Experiencias de construcción y utilización de biodigestores de flujo continuo en Uruguay. {En línea}. {15 de Diciembre de 2018}. Disponible en <http://biodigestoresflujocontinuoouruguay.blogspot.com/2011/08/experiencias-de-construccion-y.html>

UASB: El reactor anaerobio de flujo ascendente, también llamado “RAFA” se caracteriza por su forma tubular y su operación en flujo ascendente, es decir, posee una entrada de carga en la parte inferior, y por la parte superior se encuentra la salida del biogás.

Ilustración 15. Reactor UASB



Fuente: PROGRAMA APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS URBANOS EN MÉXICO. Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. 1er. Edición, 2017. p 48.

Regímenes de alimentación

En función de los flujos de entrada y salida, la operación de un biorreactor puede ser de tres modos distintos⁴⁷:

- Lote o discontinuo (Batch): Se cargan de una vez en forma total, descargándose cuando han dejado de producir biogás o la biomasa está suficientemente degradada. Consisten en tanques herméticos con una salida de gas conectada a un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás. Este sistema es aplicable en situaciones particulares, como de materia orgánica a procesar está disponible en forma intermitente. En estos casos normalmente se usa varios digestores cargados en diferentes tiempos para mantener la continuidad del suministro de gas.
- Lote alimentado o semicontinuo (Fed-Batch): Es el tipo de digestores más usado en el medio rural, cuando se trata de sistemas pequeños para uso doméstico.
- Continuo: Fueron desarrollados principalmente para el tratamiento de aguas negras, extendiéndose su uso, en la actualidad, al manejo de otros sustratos. En general son plantas muy grandes en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación, así como para su control. Por lo tanto, este tipo genera una gran cantidad de biogás el que a su vez es aprovechado en aplicaciones de las grandes industrias o en la demanda de gas de una población, colocándolos dentro de la red de la ciudad.

1.8 LODOS

Inicialmente es necesario aclarar que no todos los sólidos que entran en una planta de tratamiento son orgánicos y biodegradables, razón por la cual se encuentran los lodos inorgánicos y los lodos orgánicos.

El termino lodo hace referencia a un subproducto compuesto de agua y solidos (0,25% - 12%), obtenido en estaciones de tratamiento de aguas residuales tanto urbanas como industriales. Los sólidos en esta mezcla se refieren a una porción del lodo compuesta por microorganismos, compuestos inorgánicos y orgánicos, oligoelementos y nutrientes.⁴⁸

⁴⁷ BAUTISTA, Alejandro. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos. Proyecto de grado. Universidad Carlos III De Madrid Escuela Politécnica Superior. Nicaragua. 2010. p 40.

⁴⁸ CONAGUA. Manual de agua potable, alcantarillados y saneamiento: Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Coyoacán, México, 2010. p 3. ISBN 978-607-8246-90-8.

Las características de los lodos pueden variar dependiendo de su origen, de su edad, del tipo de proceso del cual vienen y de la fuente original del mismo; por dicha razón existen dos formas de clasificar los lodos que se encuentran en una planta de tratamiento.

En el caso del proceso de tratamiento biológico de aguas residuales, cada etapa da como resultado tipos diferentes de lodos, los cuales se pueden clasificar en:

- **Lodo primario:** Se producen en la sedimentación primaria, en la cual se remueven sólidos sedimentables. La cantidad depende de la carga superficial o tiempo hidráulico de retención. En la sedimentación primaria con químicos se produce más lodo, producto de una mayor remoción y de la precipitación química de la materia coloidal. Este es un fluido denso con un porcentaje de agua que varía entre 92% y 96%⁴⁹.
- **Lodo secundario o activado:** Para obtener como resultado este tipo de lodo, es necesario realizar un tratamiento biológico en donde interactúan distintos tipos de bacterias y microorganismos para iniciar con la eliminación de la materia orgánica disuelta y los nutrientes en el agua. Éste lodo está generalmente en forma de floculo que contienen biomasa viva, los cuales son sedimentados para separar así el agua limpia y el lodo restante debe ser bombeado al tanque de aireación para continuar con el proceso.⁵⁰
- **Lodo terciario:** Es el lodo resultante de un tratamiento terciario, el cual solo se efectúa si se exige una alta calidad en el efluente de una EDAR. En este proceso se eliminan sustancias solubles en el agua ya que es llamado también como proceso de desinfección.⁵¹

En la tabla 6 se presentan algunas características de los lodos residuales según su tipo.

⁴⁹ LIMÓN, Juan. Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o recurso?. México. 2013. p 10.

⁵⁰ WINKLER, Michael. Tratamiento biológico de aguas de desecho. México D.F. Limusa, 2000.

⁵¹ AGUILAR, Manuel. Efectos agronómicos de la aplicación de lodos de depuradora compostados en suelo de Olivar. Tesis Doctoral. Córdoba, Argentina: Universidad de Córdoba. 2001. p 5.

Tabla 6. Características de lodos según tipo

	Unidades	Lodo primario	Lodo primario digerido	Lodo secundario
Concentración de sólidos	%	5-9	2-5	0.8-1.2
Sólidos volátiles	% de ST	60-80	30-60	59-88
pH	u. pH	5-8	6.5-7.5	6.5-8
Contenido de agua	%	92-96	94-97	97.5-98

Fuente: LIMÓN, Juan. Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o recurso?. México. 2013. p 10.

Los lodos presentes en una PTAR suelen tener composiciones similares como los que se muestran en la tabla 7:

Tabla 7. Composición de lodos residuales.

Componente	% Composición
Carbono	50% - 70%
Hidrogeno	6,5% - 7,3%
Oxigeno	21% - 24%
Nitrógeno	15% - 18%
Fosforo	1% - 1,5%
Sulfuro	0% - 2,4%

Fuente: LENTECH, Componentes de los lodos.
<https://www.lennotech.es/lodos-componentes.html>

1.9 MICROBIOLOGÍA DE LODOS RESIDUALES

El floculo en el tratamiento de aguas residuales es el componente principal en los lodos residuales, los cuales contienen células y partículas orgánicas e inorgánicas. Entre los organismos más importantes encontramos las bacterias, los hongos, los protozoarios y los rotíferos.

- **Bacterias:** Son el organismo más abundante en los lodos además de ser las responsables de la oxidación de la materia orgánica y de los nutrientes. Existen más de 300 especies encontradas en los floculos, las cuales ayudan a producir polisacáridos que ayudan a la floculación de la biomasa (ver cuadro 1)⁵².

⁵² MOELLER, Gabriela. Microbiología de lodos activos. IDEAM. Colombia. 2004. p 165.

Cuadro 1. Bacterias presentes en lodos.

BACTERIAS	<i>Zooglea</i>
	<i>Pseudomonas</i>
	<i>Flavobacterium</i>
	<i>Alcaligenes</i>
	<i>Bacillus</i>
	<i>Achromobacter</i>
	<i>Corynebacterium</i>
	<i>Comomonas</i>
	<i>Brevibacterium</i>
	<i>Acineto bacter</i>
	<i>Sphaerotilus</i>
	<i>Nitrosomonas</i>
	<i>Rhodospirillaceae</i>

Fuente: Moeller, Gabriela. Microbiología de lodos activos. IDEAM, Bogotá. 2004.

- **Hongos:** Las condiciones con las que cuentan los lodos no son las más ideales para el crecimiento de los hongos, sin embargo, algunos sobreviven en este medio ya que algunas veces se dan condiciones de pH bajo, toxicidad y deficiencia de nitrógeno (ver cuadro 2).

Cuadro 2. Hongos presentes en lodos.

HONGOS	<i>Geotrichium</i>
	<i>Penicillium</i>
	<i>Cephalosporium</i>
	<i>Cladosporium</i>
	<i>Alternaria</i>

Fuente: Moeller, Gabriela. Microbiología de lodos activos. IDEAM, Bogotá. 2004.

- **Protozoarios:** Estos organismos son pertenecientes al reino protista y son predadores de bacterias. En este grupo se encuentran los Ciliados, Flagelados y Rhizopoda o Amiboidea (ver cuadro 3)⁵³.

⁵³ MOELLER, op. cit, p 166.

Cuadro 3. Protozoarios presentes en lodos.

PROTOZOARIOS	Ciliados	Libres	<i>Chilodonella</i>
			<i>Colpidium</i>
			<i>Blepharisma</i>
			<i>Euplotes</i>
			<i>Paramecium</i>
			<i>Leontus</i>
			<i>Trachelophylum</i>
			<i>Spirostomum</i>
		Trepadores	<i>Aspidisca</i>
			<i>Euplotes</i>
	Anclados	<i>Vorticella</i>	
		<i>Corchesium</i>	
		<i>Opercularia</i>	
		<i>Epystilis</i>	
	Flagelados	<i>Bodo</i>	
<i>Pleuromonas</i>			
<i>Monosiga</i>			
Rhizopoda o Amiboidea	<i>Amoeba</i>		
	<i>Thecamoeba</i>		

Fuente: Moeller, Gabriela. Microbiología de lodos activos. IDEAM, Bogotá. 2004.

- Rotíferos: Son organismos multicelulares que ayudan a remover las bacterias suspendidas no floculadas y contribuir con sus desechos a la formación el floculo (ver cuadro 4)⁵⁴.

Cuadro 4. Rotíferos presentes en lodos.

Rotíferos	Bdeloidea	<i>Philodina</i>
		<i>Habrotocha</i>
	Monogononta	<i>Lecane</i>
		<i>Notomata</i>

Fuente: Moeller, Gabriela. Microbiología de lodos activos. IDEAM, Bogotá. 2004.

Esta recopilación de microorganismos encuentran en los lodos, las condiciones ideales para su supervivencia y su multiplicación, entre las cuales encontramos principalmente la temperatura en un rango entre los 20 °C y los 30 °C, se encuentra también el pH, el cual permanece cercano a la neutralidad, y por último se encuentran la humedad y la carga orgánica, que en el medio usado (lodos residuales), se encuentran en abundancia.

⁵⁴ MOELLER, op. cit, p 167.

1.10 GALLINAZA

Se llama gallinaza al excremento o estiércol de las gallinas. Este excremento se considera como un excelente abono calculándose su efecto superior en unas cuatro veces al estiércol normal de la cuadra. El excremento de gallina varía en riqueza fertilizante con las sustancias más o menos nitrogenadas que el animal ingiere pues su condición es omnívora. La gallinaza, como cualquier otro desecho orgánico, puede ser tratado con biodigestores lo que acelera el proceso de descomposición y hace más efectiva la transformación de sus elementos lo que en el proceso genera biogás (ver tabla 8).

Tabla 8. Composición nutrientes gallinaza

Nutriente	Gallinaza
Nitrógeno	34.7
Fósforo	30.8
Potasio	20.9
Calcio	61.2
Magnesio	8.3
Sodio	5.6
Sales solubles	56

Fuente: INTAGRI. La gallinaza como fertilizante.
<https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/gallinaza-como-fertilizante>

Producción de gallinaza

La cantidad de gallinaza producida depende de diversos factores, como se describe a continuación⁵⁵:

- Edad del ave: las aves jóvenes producen menos excretas, debido a su bajo consumo de alimento en sus primeras etapas de vida.
- Línea: en pollos de engorde la situación es compleja debido a que la cantidad de gallinaza producida es una mezcla de deyecciones y del material utilizado como cama.

Desde el punto de vista puramente teórico, hay que tener en cuenta que por cada kilo de alimento consumido las gallinas producen alrededor de 1,1 a 1,2 kg de deyecciones frescas, con el 70 –80% de humedad. En deyecciones totalmente secas ello supondría unos 0,2 – 0,3 kg por ave y por kilo de alimento consumido.

⁵⁵ESTRADA, Mónica María, Manejo y procesamiento de la gallinaza. Revista Lasallista de investigación [en línea] 2005, 2 (enero-junio): [Fecha de consulta: 30 de febrero de 2019] Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520108> ISSN 1794-4449.

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto será dividido en cinco etapas, la primera en la que se hará la caracterización fisicoquímica de los lodos; en la segunda, se hará la selección del tipo de biodigestor a emplear, el cálculo de los parámetros de diseño, el dimensionamiento y construcción de los dos biodigestores; en la tercera, de acuerdo a los biodigestores construidos se establecerán las condiciones de operación para cada uno de los ellos y puesta en marcha de los dos digestores simultáneamente; a continuación se realizó la cuantificación del metano producido en cada biodigestor y por último se evidenció el proceso de elaboración de las especificaciones técnicas para la PTAR Villas del Nuevo Siglo.

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LODOS, GALLINAZA Y MEZCLA LODO-GALLINAZA

En esta sección se presenta el procedimiento para la toma de muestras y los parámetros fisicoquímicos evaluados de los sustratos usados en el proceso de digestión.

2.1.1 Toma de muestras. El proceso de muestreo de los lodos producidos en la PTAR se realizó bajo la NTC 5667-2⁵⁶, que constituye una guía sobre técnicas de muestreo utilizadas con el fin de obtener los datos necesarios para hacer análisis con propósitos de control de calidad, caracterización de aguas residuales y lodos.

El proceso de preservación y transporte se realizó bajo la NTC 5667-3⁵⁷ la cual suministra directrices generales sobre las precauciones que se deben tomar para preservar y transportar muestras de agua. Estas directrices son adecuadas, en particular cuando una muestra no se puede analizar en el sitio y debe ser transportada para analizarla en el laboratorio.

La PTAR Villas del Nuevo Siglo cuenta con tres lechos de secado donde se acumulan los lodos extraídos del proceso de tratamiento de aguas residuales, para el desarrollo del proyecto se utilizó un lecho en donde después de alcanzada su capacidad máxima; se realizó el muestreo para la caracterización (ver ilustración 5).

El muestreo para la caracterización se realizó siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

1. Se seleccionaron recipientes plásticos de 500 ml y de color opaco ya que presentan baja contaminación para la muestra.

⁵⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Calidad del agua, muestreo, técnicas generales de muestreo. Colombia. 1995.

⁵⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Calidad del agua, muestreo, Directrices para la preservación y manejo de las muestras. Colombia. 2004.

2. Se llevó a cabo proceso de esterilización con detergente y luego con agua caliente para retirar cualquier exceso de detergente.
3. Se realizó el llenado hasta el borde de los recipientes para evitar contacto con el aire.
4. Posteriormente las muestras se mantuvieron en enfriamiento entre 2°C a 4°C para inhibir cualquier tipo de actividad microbológica, mientras se transportaron las muestras al laboratorio de la Universidad ECCI.

Para el lodo sobrante se hizo una cubierta de plástico que se puso sobre el lecho luego de estabilizar la superficie del lodo con cal (CaOH) para ser usados posteriormente como sustrato en el proceso de digestión. En cuanto a la gallinaza, fue adquirida en la plaza de mercado del municipio de La Mesa.

2.1.2 Parámetros fisicoquímicos evaluados. Se realizaron análisis de laboratorio para conocer la composición de nutrientes presentes en el sustrato y de los parámetros que garantizaron que el proceso de digestión se llevó a cabo de manera correcta. Los análisis a realizar fueron carbono orgánico por el método Walkley-Black y valoración volumétrica (ver anexo B); el análisis de nitrógeno se realizó por el método Kjeldahl y valoración volumétrica (ver anexo C); se evaluó el porcentaje de aluminio presente en el lodo, ya que en el proceso de tratamiento de la PTAR se adiciona hidroxiclورو de aluminio y este metal traza tiene efectos inhibitorios sobre el proceso, este análisis se realizó por el método 3050 B de la EPA con ácido nítrico y peróxido de hidrogeno posterior cuantificación mediante absorción atómica por llama (ver anexo D); se evaluó también DQO por el método ASTM D1252/06 método B (ver anexo E); por último se realizó análisis de sólidos volátiles (SV) por método 2540 D del Standard Methods (ver anexo F).

El análisis de DQO y sólidos volátiles se realizó tanto al inicio del proceso como al final.

2.2 DISEÑO DE LOS DIGESTORES ANAEROBIOS

En esta sección se realizó la selección del tipo de digester a construir, de acuerdo a esto, se establecieron parámetros de diseño, se procede con el dimensionamiento y posterior construcción de los digestores.

2.2.1 Selección de los biodigestores. Para la selección del tipo de biodigestor se tuvo en cuenta que era necesario que contara con las siguientes características:

- El contenedor principal debía ser hermético, con el fin de impedir la entrada de aire y la salida del biogás producido.

- Se debían evitar cambios bruscos de temperatura.
- Se debía contar con medios para realizar carga y descarga del sistema.
- Se debía contar con un medio para mezclar el contenido del tanque.

Cabe aclarar que además de estos factores, también debía primar el ideal de costos bajos, tanto en operación como de inversión, además de tener en cuenta que un bajo consumo de energía sería un valor agregado del proyecto.

Teniendo en cuenta lo anterior, se seleccionó un reactor batch o discontinuo para el proceso de tratamiento de lodos para obtención de biogás ya que cuenta con ventajas predominantes principalmente en la parte económica, puesto que el costo de la inversión inicial y de operación es baja en comparación con la mayoría de los procesos, requiere un consumo pequeño de energía eléctrica, se mantiene con bajos requerimientos nutricionales, es de fácil operación, puede manejar cargas orgánicas variables, se conservan sin alimentación por largo tiempo, logra eficiencias de remoción entre el 60% y el 80% de DQO y en la mayoría de los casos obtiene concentraciones de metano por encima del 70%, lo cual habla de la buena calidad del biogás obtenido. Por último, vale la pena decir que la fermentación ácida y metánica, así como la sedimentación tienen lugar en el mismo tanque, por lo cual las plantas son muy compactas para efectos de ahorro de espacio en lugares reducidos.⁵⁸

2.2.2 Parámetros de diseño. En este inciso se muestran los parámetros de diseño, como lo son el volumen del contenedor principal y tiempo de retención; estos eran necesarios para la construcción del biodigestor previamente escogido (Batch).

2.2.2.1 Volumen del reactor. El volumen de este tipo de reactor estuvo dado por la cantidad de lodos a tratar, sin embargo, en este caso era de mayor utilidad escoger un volumen genérico ya existente en el mercado y realizar los cálculos pertinentes con base en ese volumen. Se debe tener en cuenta que según la literatura, el biodigestor debió ser llenado hasta un 70% de la capacidad total (volumen efectivo).

⁵⁸ MÁRQUEZ, Marjorie; MARTÍNEZ, Sergio A. op. cit. p 23.

2.2.2.2 **Tiempo de retención.** Es un dato que indica el tiempo que necesita la mezcla de biomasa en el interior de los reactores para que ocurra la fermentación completa.⁵⁹ El periodo de digestión se calculó con la ecuación 3⁶⁰, la cual está relacionada con la temperatura ambiente. Esta ecuación es válida para diferentes tipos de biorreactores ya que sólo depende de la temperatura ambiente donde se realice la digestión.

Ecuación 3. Tiempo de retención

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

2.2.3 **Dimensionamiento de los biodigestores.** En esta sección se lleva a cabo el dimensionamiento tanto del tanque de fermentación como de la campana de recolección para el biogás producido.

2.2.3.1 **Tanque de fermentación.** En cuanto al dimensionamiento del digestor es importante tener en cuenta que las medidas del bidón de volumen de 60 L son:

- Diámetro del digestor: 30 cm
- Altura del digestor: 85 cm

Teniendo el diámetro y altura del tanque se inicia con el cálculo del área de la base del reactor según la ecuación 4.

Ecuación 4. Área de la base del reactor.

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

Posteriormente se realiza el cálculo de la altura efectiva del reactor con la ecuación 5, puesto que es necesaria para establecer el tamaño puede tener la campana.

Ecuación 5. Altura efectiva

$$H_E = \frac{V_E}{\pi r^2}$$

⁵⁹ HAMED M., Zeeman G.; WILKO K.P, Gerard P. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure. Faculty of Agriculture, Mansoura University, E1-Mansoura, Egypt. Bioresource Technology 95. 2004. p 191.

⁶⁰ UPME. Formulación de un programa básico de normalización para aplicaciones de energías alternativas y difusión. Documento ANC-0603-19-01. Marzo 2003.

Siendo;

H_E : Altura efectiva (m)

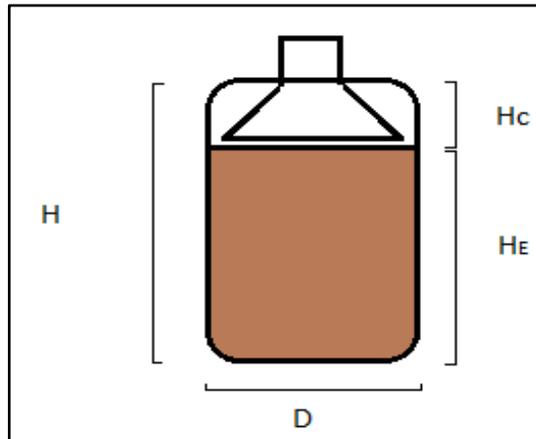
V_E : Volumen efectivo (m^3)

r : Radio del contenedor (m)

2.2.3.2 **Campana Fija.** En el caso de la campana para la recolección y extracción del biogás producido se utilizó un embudo de un tamaño regular en el mercado con características geométricas similares a las usadas en un digestor de un volumen de 60 L.

Para el digestor construido se utilizó un volumen efectivo de 42 L, razón por la cual se calculó la altura que podía tener la campana para realizar la recolección del biogás, tal como se muestra en la ilustración 16.

Ilustración 16. Altura de la campana



Fuente: elaboración propia

***Nota:** H es la altura del digestor; Hc es la altura disponible para la campana; D es el diámetro del digestor y H_E es la altura efectiva.

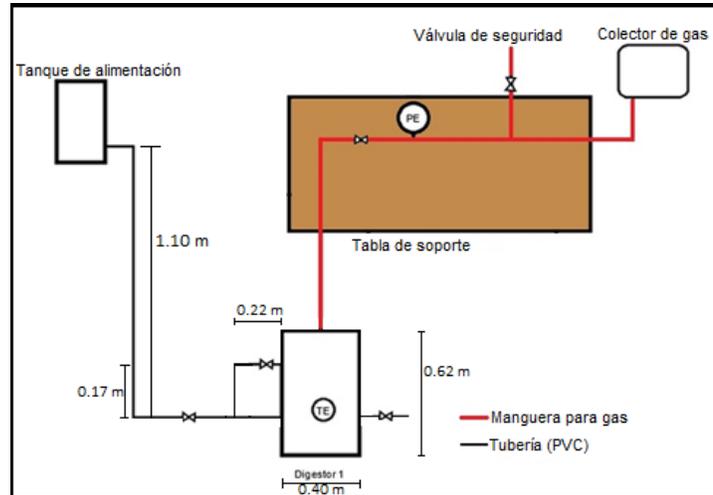
Para el cálculo de la altura disponible para la campana se utiliza la ecuación 6.

Ecuación 6. Altura disponible para la campana

$$H_C = H - H_E$$

2.2.4 Construcción de los biodigestores. Inicialmente fue necesario realizar un plano del prototipo que se iba a construir (ver ilustración 17), teniendo en cuenta la ubicación de las válvulas, termómetros y manómetros, necesarias para hacer las mediciones de las variables durante el proceso de digestión. A partir de esto, fue posible determinar los materiales requeridos para la construcción (ver anexo I) del prototipo según el procedimiento descrito en el anexo M.

Ilustración 17. Plano del prototipo



Fuente: elaboración propia.

2.2.4.1 Selección del tipo de almacenamiento para el biogás. El tipo de almacenamiento del gas para un proyecto puede variar dependiendo de las características que tenga el gas. En el caso de este proyecto se produjo un biogás con parte de metano, el cual fue recolectado con el fin de saber su composición y su cantidad. Este recipiente debió ser sellado herméticamente para evitar el escape del gas.

Para la recolección del gas se decidió usar un cistoflo (ver ilustración 18), que es una bolsa de uso médico para la recolección de orina, con el fin de apreciar el llenado del contenedor (cistoflo) y para disminuir costos. Este cuenta con una entrada y una salida controlada de su contenido, la cual permite abrir y cerrar cuando se desee, este detalle es importante ya que para la entrada va conectado a través de una manguera adaptada a la salida final del gas desde el bidón y en el caso de la salida, se puede habilitar o cerrar el paso de gas con el fin de hacer la cuantificación de metano por medio del sistema de desplazamiento volumétrico. En este caso se debe aclarar que al ser el cistoflo un artículo de uso médico viene esterilizado para evitar la contaminación del gas extraído del lodo.

Ilustración 18.
Recolector de biogás



Fuente: elaboración propia

2.2.4.2 **Volumen de biogás esperado.** Para poder hacer una evaluación de la eficacia del proceso fue necesario tener datos de comparación de experimentos realizados previamente. En este caso se usó la ecuación 7, la cual se basa en los sólidos volátiles presentes en la mezcla y un factor de producción de biogás puesto en función de la literatura al respecto.⁶¹

Ecuación 7. Volumen de biogás esperado

$$V_{Biogas} = SV * f * V_E$$

Siendo;

SV: Sólidos volátiles mg/L

V_E: Volumen efectivo del reactor L

F: Factor promedio para la producción de biogás a partir de lodos residuales 0.09⁶²

2.3 DIAGNÓSTICO DE LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS

En esta sección se describe como se realizó la preparación de las mezclas de alimentación de los digestores, la selección de variables a evaluar, las variables a medir durante el proceso de digestión y la puesta en marcha de los digestores.

⁶¹ GUEVARA VERA, Antonio. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaerobios rurales: Producción de gas y saneamiento de efluentes. Lima: División de salud y ambiente. Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. 1999.

⁶² HERRERO, Jaime M. Biodigestores familiares, guía de diseño y manual de instalación. Cooperación técnico alemana. Bolivia. 2008.

2.3.1 Adecuación de lodos. De acuerdo a la información expuesta en la sección 1.4.2.5 donde se describe la importancia de la relación C/N del sustrato en el proceso de biodigestión, el rango óptimo es de 20:1 a 30:1⁶³. Según la revisión bibliográfica realizada^{(64) (65)} se sabe que los lodos no cumplen esta condición ya que son ricos en carbono, por lo que se hizo necesario buscar otro sustrato para realizar una mezcla que sí cumpliera con el requerimiento nutricional que demanda el proceso de biodigestión. Tomando como base de búsqueda del otro sustrato, la bibliografía antes mencionada, se tienen diferentes tipos de sustratos ricos en nitrógeno (ver tabla 9).

Tabla 9. Relación C/N de materiales ricos en nitrógeno

Sustancia	C/N
Purines frescos	5:1
Gallinaza pura	7:1
Estiércol porcino	10:1
Desperdicios de cocina	14:1
Gallinaza camada	18:1

Fuente: ROMÁN, Pilar. MARTÍNEZ, María. Manual de compostaje del agricultor. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Chile. 2013. p 53.

Para seleccionar el mejor sustrato para la mezcla, fue necesaria una revisión bibliográfica y construir una matriz que permitió la selección del sustrato presentada en la tabla 10.

⁶³ OLAYA, Yeison. Op. cit., p 5.

⁶⁴ Ibid., p 6.

⁶⁵ ROMÁN, Pilar. MARTÍNEZ, María. Manual de compostaje del agricultor. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Chile. 2013. p 53.

Tabla 10. Matriz de selección

Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
	Estiércol porcino	Gallinaza camada	Desechos de cocina	Purines frescos
Disponibilidad	2	1	2	3
Costos	1	1	1	1
Recolección	2	1	2	2
Transporte	2	1	1	2
Total	7	4	6	8

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta la descripción de cada criterio y su valor (ver cuadro 5) en la matriz de selección:

- Disponibilidad: Se refiere a la facilidad de conseguir el sustrato, la cantidad disponible en la zona aledaña a la PTAR.
- Costos: Dentro de este criterio se encuentran los costos de transporte, de recolección y de adecuación para realizar la mezcla (tamizado, trituración).
- Recolección y Manejo: Se refiere a la facilidad de recolección por el estado físico en el que se encuentra (los líquidos son de difícil recolección), en cuanto al manejo, se hace referencia a la adecuación del sustrato para realizar la mezcla con el lodo.
- Transporte: Está ligado principalmente a la distancia a la que está disponible la materia prima de la PTAR.

Cuadro 5. Valores propuestos para cada criterio

Disponibilidad		Recolección y Manejo	
1	Alta > 100 kg al mes	1	Fácil
2	Media Entre 20 y 100 Kg al mes	2	Difícil
3	Baja < 20 kg al mes		

Costos		Transporte	
1	Bajo < \$5.000 por kg	1	Fácil Cerca a la PTAR
2	Medio Entre \$5.000 y \$20.000 por kg	2	Difícil Lejanía a la PTAR
3	Alto > \$20.000 por kg		

Fuente: elaboración propia

Se realizó la elección del sustrato con menor valor en la matriz para hacer la mezcla con los lodos, luego se procedió con el cálculo de la relación C/N por medio de la ecuación 8:

Ecuación 8. Relación C/N

$$R = \frac{Q_1 * (C_1 * (100 - M_1)) + Q_2 * (C_2 * (100 - M_2))}{Q_1 * (N_1 * (100 - M_1)) + Q_2 * (N_2 * (100 - M_2))}$$

Fuente: ROMÁN, Pilar. MARTÍNEZ, María. Manual de compostaje del agricultor. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Chile. 2013. p 52.

Siendo;

Q: Cantidad en kg

C: Cantidad de carbono en % en peso

N: Cantidad de nitrógeno en % en peso

M: Humedad relativa

Además de la relación C/N se consideró el cálculo de la cantidad de materia orgánica. Para el cálculo de este parámetro fue necesario conocer el volumen del reactor, puesto que se debe considerar que la mezcla debe ocupar sólo el 70% del volumen y el 30% restante es para el biogás que se genera⁶⁶. Según lo reportado en la literatura⁶⁷ para que se lleve a cabo el proceso de forma satisfactoria, se debe manejar una relación 1:3 (lodo-gallinaza:agua) para asegurar el crecimiento

⁶⁶ YANK, Marina. Estudio de la producción de biogás en función de la cantidad de residuos de madera en un biodigestor tipo de carga única o batch. Universidad Nacional de Nordeste. Grupo de investigación en Energías Renovables (GIDER). Argentina. 2005. p 2.

⁶⁷ AMBIENTUM. Op. cit. p 7.

bacteriano en el reactor y posterior degradación de la materia orgánica. Se utilizan las ecuaciones 9 y 10 para el cálculo del volumen de la mezcla.

Ecuación 9.

Volumen de líquido

$$V_L = 0,75V_{RE}$$

Ecuación 10.

Volumen de mezcla lodo-gallinaza

$$V_M = 0,25V_{RE}$$

Siendo;

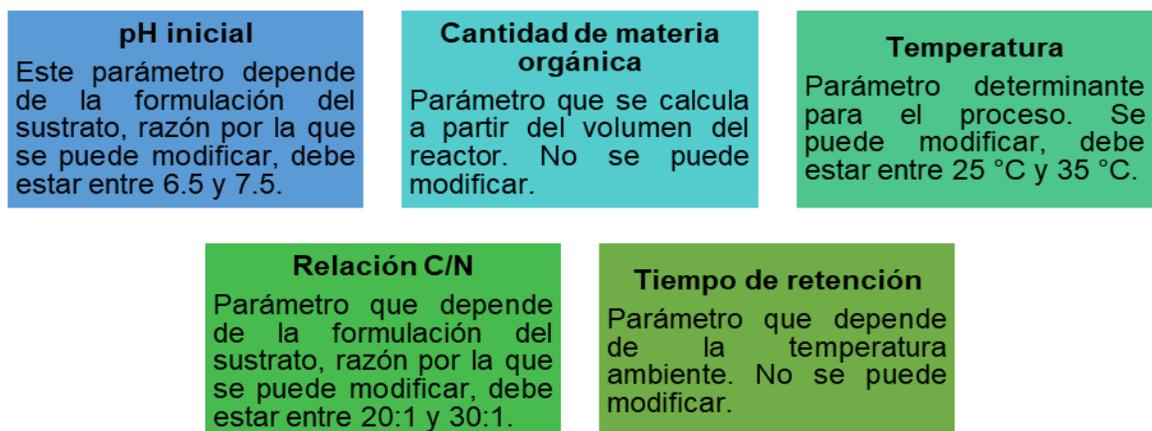
V_L : Volumen de líquido (L)

V_{RE} : Volumen reactor efectivo (L)

V_M : Volumen mezcla lodo-gallinaza (L)

2.3.2 Variables a modificar en la evaluación del proceso. Considerando los parámetros expuestos en la sección anterior, fue necesario hacer un análisis de cada uno (ver ilustración 19), con el fin de establecer cuáles de ellos se van a modificar en el proceso de biodigestión que se va a evaluar.

Ilustración 19. Parámetros que influyen en el proceso de biodigestión.



Fuente: elaboración propia

Dentro de los parámetros no modificables se encuentran la cantidad de materia orgánica (al depender del volumen del reactor no puede ser variado a gusto, además debe cumplir con la relación establecida de 1:3 con la cantidad de agua) y está el tiempo de retención (depende de la temperatura ambiente del medio en el que se encuentra el digestor, ya que la temperatura interna del sistema llega a un equilibrio con la temperatura externa, si la temperatura ambiente (externa) no es modificada abruptamente el TR se puede calcular con la ecuación 3).

En cuanto a los parámetros modificables están la relación C/N (al realizarse un proceso de digestión con una mezcla entre dos sustratos (lodo-gallinaza) se puede modificar este parámetro variando la cantidad de cada uno de ellos, manteniendo su valor entre el rango óptimo que está entre 20:1 y 30:1); el pH inicial (este parámetro se relaciona con la formulación del sustrato o mezcla alimentada al biodigestor, debe estar en un rango de 6,5 y 7,5); finalmente, se encuentra la temperatura (como se expuso anteriormente este parámetro es el más importante en el proceso, se puede modificar implementando un sistema que aumente la temperatura interna del reactor). Se descarta la alteración de la temperatura por dos razones principales; la primera, la adecuación de un serpentín o un sistema para aumentar la temperatura en el reactor genera costos adicionales tanto de inversión como de operación. En segunda instancia, como no se va a considerar el proceso de transformación de biogás a energía eléctrica y térmica sino sólo su obtención, no es posible hacer una integración térmica, razón por la cual el aumento de la temperatura representa un gasto energético que no es admisible para el desarrollo del proyecto.

Se decide modificar la relación C/N y el pH inicial (ver cuadro 6) ya que dependen solamente de la formulación del sustrato, dando como resultado un diseño factorial 2x2. Respecto a la modificación del pH se realiza con ácido acético e hidróxido de calcio.

Cuadro 6. Relación de parámetros a modificar

Digestión 1				Digestión 2			
Digestor 1		Digestor 2		Digestor 1		Digestor 2	
Ph	6,5	pH	6,5	pH	7,5	pH	7,5
Relación C/N	20:1	Relación C/N	30:1	Relación C/N	20:1	Relación C/N	30:1

Fuente: elaboración propia

2.3.3 Puesta en marcha de los digestores. Para la puesta en marcha de los digestores fue necesario realizar una prueba de fugas, tanto en el digestor como en la conexión para el almacenamiento del biogás, llenando en su totalidad el reactor con agua para evidenciar si alguna conexión de accesorios quedó con algún tipo de escape. En cuanto a la conexión para el almacenamiento de biogás, se cubrieron el exterior de la manguera y las válvulas con agua y detergente, luego fue necesario exhalar con fuerza desde un extremo de la manguera para hacer pasar aire y verificar que no se hicieran burbujas en la parte exterior.

Posterior a la prueba de fugas, se procedió con la carga de los digestores que operan bajo régimen discontinuo para la realización de la primera digestión, al término de la primera digestión se desocuparon los digestores, se tomaron muestras para los análisis de laboratorio, se lavó el sistema de digestión y se dio un tiempo de 10 días para volver a cargar los digestores y llevar a cabo la segunda digestión de la misma manera.

2.3.4 Condiciones de operación. En esta sección se describen las variables de operación que se tuvieron en cuenta como el pH y temperatura, ya que como se mencionó en la sección 1.4.2., estos parámetros son definitivos para el funcionamiento del reactor batch. A continuación, se indica el procedimiento para el monitoreo de estas variables.

- pH: De acuerdo a la revisión bibliográfica es necesario que el proceso de biodigestión se lleve a cabo con un sustrato que cuente con un pH inicial entre 6,5 – 7,5⁶⁸. Se realizaron mediciones de pH cada dos días.
- Temperatura: Es un factor determinante en el proceso ya que afecta el crecimiento bacteriano que da lugar a la producción de biogás. De acuerdo con la sección 1.4.2.2. se establece que un rango de temperatura óptimo está entre 25°C y 35°C, en el régimen mesófilo que es en el cual se llevará a cabo el proceso de biodigestión en la PTAR Villas del Nuevo Siglo. En cuanto a la medición de temperatura, se realizó todos los días de digestión a cuatro horas diferentes.

⁶⁸ OLAYA, op. cit., p 11.

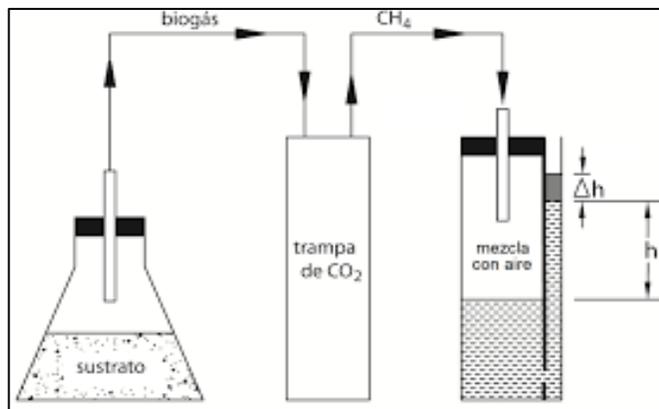
2.3.5 **Digestato.** Como se mencionó en el apartado 1.5 como producto de la digestión anaerobia además de producirse biogás también se produce el digestato. Posterior al proceso de digestión se realizó análisis de DQO y sólidos volátiles en los laboratorios de Agrilab para ser comparados con los iniciales. Para esto fue necesario realizar un muestreo según la norma NTC 5667-2⁶⁹ y en cuanto al transporte se realizó bajo la norma NTC 5667-3⁷⁰.

Por último, es necesario realizar un tratamiento químico de lixiviación ácida y posterior neutralización con el fin de extraer el aluminio existente en el efluente para garantizar su aprovechamiento como bioabono.

2.4 CUANTIFICACIÓN DE METANO

Teniendo en cuenta que el producto de interés del proceso es el biogás más específicamente el metano, en esta etapa se realizó la identificación del método más idóneo para la correcta cuantificación del metano producido en cada digester y en cada una de las digestiones, el método que se utilizó fue el desplazamiento volumétrico. A continuación en la ilustración 20 se muestra el esquema del montaje de cuantificación de metano.

Ilustración 20. Esquema de cuantificación de metano



Fuente: ROJAS, Teresa, VAQUERANO, Nicolás. Cuantificador automático de metano para la estimación del potencial energético de un sustrato celulósico. Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. 2016. p 7.

⁶⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Calidad del agua, muestreo, técnicas generales de muestreo. Colombia. 1995.

⁷⁰ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Calidad del agua, muestreo, Directrices para la preservación y manejo de las muestras. Colombia. 2004.

Los materiales necesarios para hacer el montaje para la técnica están relacionados en el anexo H.

Con referencia a lo anterior se describe el procedimiento para realizar el montaje y adecuación del sistema que permitirá la cuantificación de metano:

1. Preparar 1000 ml de solución de NaOH (sosa cáustica) al 3%. Se midió el pH para corroborar que estuviera por encima de 12 (ver ilustración 21).

Ilustración 21. pH de la solución de NaOH



Fuente: elaboración propia

2. Vaciar las bolsas de policloruro de vinilo y proceder a llenarlas con la solución de NaOH (ver ilustración 22).

Ilustración 22. Bolsa llena con solución de NaOH



Fuente: elaboración propia

3. Conectar a cada una de las salidas (tapones) de la bolsa un equipo para administración de soluciones de goteo (ver ilustración 23).

Ilustración 23. Conexión bolsa de solución- equipos de goteo



Fuente: elaboración propia

4. Un equipo de administración de soluciones se conecta a la manguera, como se muestra en la ilustración 24, que conduce el biogás al recipiente de almacenamiento y el otro equipo de goteo queda libre para la salida de la solución de carbonato de sodio.

Ilustración 24. Conexión manguera- equipo de goteo



Fuente: elaboración propia

5. La manguera que queda libre para la salida de la solución se posiciona sobre la probeta plástica o vaso de precipitados para medir el volumen de solución desplazado por el metano como se muestra en la ilustración 25.

Ilustración 25. Montaje para recolección de solución



Fuente: elaboración propia

Procedimiento del método y recolección de datos

Los reactores poseen una bolsa de policloruro de vinilo con solución de NaOH, esta contiene dos catéteres que se encuentran cerrados. Cada vez que se realizaba el monitoreo, se abrió el primer catéter que pone en contacto el digestor con la solución, esto permitía el paso del biogás generado y acumulado en el digestor hacia la solución. Al ingresar el biogás se cierra el catéter. Una vez que reacciona la solución con el biogás comienza a burbujear (ver ilustración 26), el reactivo empieza a secuestrar dióxido de carbono dejando libre gas metano, el cual ejerce presión dentro de la bolsa aumentando así la presión de la solución (ver ilustración 27) y por diferencia de presiones entre la solución y la atmósfera, la disolución comienza a gotear en los dos catéter (ver Ilustración 28), terminado este procedimiento se empezó a vaciar en el vaso de precipitado, obteniendo así un volumen referencial en ml del gas generado en cada reactor. La cantidad de goteo hace referencia a la cantidad de gas que se encontró acumulada en las bolsas, dicho goteo culminó cuando la presión tanto de la bolsa como la atmosférica se igualaron⁷¹.

⁷¹ MANOBANDA, Santiago. HERAS. Cuantificación del metano utilizando la técnica de actividad metanogénica específica en lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental. Ecuador. Universidad de Cuenca. Facultad de Ciencias Químicas. 2015. p 60.

Ilustración 26. Burbujeo en las bolsas de solución



Fuente: elaboración propia

Ilustración 27. Bolsas de solución con metano acumulado



Fuente: elaboración propia

Ilustración 28. Goteo dentro de los catéteres



Fuente: elaboración propia

El paso de biogás se habilitó cada 2 días, durante el tiempo de retención de cada digestión para realizar la toma de datos. Los volúmenes acumulados se grafican en función del tiempo de monitoreo (cada dos días), obteniendo datos de acumulación de biogás que indican la producción máxima de biogás generada en esos días de monitoreo. Para el análisis de la técnica se realizó una gráfica de volumen acumulado vs tiempo.

La forma idónea de demostrar que se generó biogás es extraer gas acumulado de las bolsitas en jeringas y quemarlo en una flama pequeña⁷².

2.5 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA PTAR VILLAS DEL NUEVO SIGLO

En esta sección se llevara a cabo el escalamiento del proceso de obtención para el procesamiento de los lodos producidos en la PTAR, estableciendo los parámetros de diseño, posteriormente, se hizo el dimensionamiento, haciendo uso de las ecuaciones mostradas en la sección 2.2.3 y se establecieron los materiales más adecuados para hacer una selección de equipos para el proceso. Además se determinó el procedimiento de adecuación de lodos para este proceso y se establecieron condiciones de operación para la digestión.

⁷² MANOBANDA, Santiago. HERAS. Cuantificación del metano utilizando la técnica de actividad metanogénica específica en lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucubamba. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental. Ecuador. Universidad de Cuenca. Facultad de Ciencias Químicas. 2015. p 61.

3. RESULTADOS

En este capítulo se muestra de forma detallada los resultados obtenidos para cada una de las etapas del proyecto; inicialmente se presenta la caracterización fisicoquímica de los sustratos utilizados; en la segunda, de acuerdo al tipo de digestor seleccionado se realizó el diseño y construcción de los digestores; en la tercera parte, se presenta la adecuación del sustrato de alimentación de los digestores para su puesta en marcha y las condiciones de operación del proceso en cada uno de los digestores; a continuación, se muestra la cuantificación del metano producido y por último, se presenta el escalamiento del proceso para la PTAR Villas del Nuevo Siglo.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LODOS, GALLINAZA Y MEZCLA LODO-GALLINAZA

La caracterización fisicoquímica de los sustratos se llevó a cabo en dos etapas. En la primera etapa se realizaron análisis de carbono orgánico, nitrógeno total y humedad para la gallinaza y los lodos, información necesaria para el cálculo de la relación C/N. Para los lodos se realizó también una cuantificación de aluminio para determinar si la cantidad remanente en el lodo luego del tratamiento químico realizado en la PTAR es suficiente para inhibir el proceso de digestión.

Con estos primeros resultados se realizó el cálculo de la cantidad de lodo y gallinaza requerida para realizar la mezcla que cumpla con la relación C/N escogida para cada reactor, este cálculo se presenta en la sección 3.3.1.

Para la segunda etapa, fue necesario preparar las mezclas lodo-gallinaza y a estas mezclas se les realizaron análisis de DQO y sólidos volátiles, información necesaria para evaluar el proceso de producción de biogás.

A continuación, se presentan los resultados de forma condensada de los análisis de laboratorio realizados en la tabla 11, los reportes de cada uno de los laboratorios están disponibles en los anexos J, K y L.

Tabla 11. Resultados caracterización

Parámetros	Unidades	Lodo	Gallinaza	Lodo-Gallinaza	
				Muestra 1	Muestra 2
Humedad	%	17,45	21,43	-	-
Carbono orgánico	% p/v	21,18	18,57	20,97	21,04
Nitrógeno total	% p/v	0,012	13,67	1,08	0,73
Aluminio	mg/g	106,87	-	-	-
Sólidos volátiles	mg/L	-	-	8591	9428
DQO	mg O2/L	-	-	13725	14943

Fuente: elaboración propia

La muestra 1 en la tabla anterior, se refiere a mezcla de lodo-gallinaza con relación C/N igual a 20:1, la muestra 2 se refiere a una mezcla con relación C/N igual a 30:1.

Para establecer el contenido de carbono orgánico y nitrógeno total en las mezclas preparadas se realizó un balance de masa dando como resultado los resultados reportados en la tabla 11.

3.1.1 Adecuación de lodos. De acuerdo con la información expuesta en la sección 2.3.1 y la tabla 8 se determinó que el sustrato apropiado para realizar la mezcla de alimentación de los digestores es la gallinaza, este sustrato además de ser ampliamente utilizado en procesos de digestión, en este caso, es de alta disponibilidad ya que la zona rural del municipio de La Mesa es productor de gallinas (según la Alcaldía, el municipio cuenta con alrededor de 850 fincas productoras de gallinas), además se estima que cada galpón produce 40 Kg de gallinaza por camada (20 aves y 60 días de producción), debido a su alta disponibilidad es un producto de bajo costo. Adicional a esto, es de fácil recolección y transporte por su estado sólido.

Luego de determinar que el sustrato adecuado es la gallinaza, se procede con el cálculo de la cantidad necesaria de cada uno de los sustratos para cumplir con cada relación C/N establecida. Para determinar la proporción de cada sustrato en la mezcla, primero es necesario hacer el cálculo de la cantidad de materia orgánica en volumen que debe entrar al digestor con el uso de la ecuación 10:

$$V_M = 0,25 * 42 L$$

$$V_M = 10,5 L$$

De acuerdo con la bibliografía consultada⁷³ se establecieron los valores de relación C/N (20:1 y 30:1) para realizar la evaluación de la producción de biogás. Para determinar la proporción de cada uno de los sustratos en la mezcla, fue necesario resolver los cálculos con la ayuda de la herramienta de Excel “solver” ya que era fundamental que se cumplieran la relación C/N y la relación entre materia orgánica y agua.

Con relación a la ejecución del solver se establecieron los siguientes parámetros (ver cuadro 7):

Cuadro 7. Parámetros de solver

	Relación C/N 20:1	Relación C/N 30:1
Función Objetivo	Relación C/N (Ecuación 8)	Relación C/N (Ecuación 8)
Para	Valor de 20	Valor de 30
Celdas variables	Q1 y Q2	Q1 y Q2
Restricción	Volumen de mezcla igual a 10,5 L	Volumen de mezcla igual a 10,5 L

Fuente: elaboración propia

A continuación, en la ilustración 29 y 30 se presentan las plantillas que se elaboraron en Excel para obtener la proporción de sustratos para la mezcla de alimentación de los digestores.

Ilustración 29. Plantilla de Excel para relación C/N 20:1

	Densidad	Volumen	Volumen mezcla
Lodo (1)	0.77	10.1564637	
Gallinaza (2)	1.97	0.34273133	10.5

Q1	7.82047701
Q2	0.67518072
C1	21.18
C2	18.57
N1	0.012
N2	13.67
m1	17.45
m2	21.43

Q= cantidad en kg
C = Cantidad de carbono en % en peso
N= Cantidad de nitrógeno en % en peso
m= humedad relativa

Función Objetivo	20
-------------------------	----

Fuente: elaboración propia

⁷³ OLAYA, Yeison. Op. cit., p 5.

Como resultado de la ejecución del solver para una relación C/N de 20:1 se obtuvo que la mezcla de alimentación debe ser preparada con una proporción de 0,34 L de gallinaza por cada 10,15 L de lodo.

Ilustración 30. Plantilla de Excel para relación C/N 30:1

	Densidad	Volumen	Volumen mezcla
Lodo (1)	0.77	10.2756076	
Gallinaza (2)	1.97	0.22439238	10.5

Q1	7.91221787
Q2	0.44205299
C1	21.18
C2	18.57
N1	0.012
N2	13.67
m1	17.45
m2	21.43

Q= cantidad en kg
C = Cantidad de carbono en % en peso
N= Cantidad de nitrógeno en % en peso
m= humedad relativa

Función Objetivo	30
-------------------------	----

Fuente: elaboración propia

En cuanto a la mezcla de relación C/N 30:1 se obtuvo una proporción de 0,22 L de gallinaza por cada 10,27 L de lodo.

3.2 DISEÑO DE LOS BIODIGESTORES

En esta sección basándonos en la selección del tipo de digestor se presentan los resultados obtenidos para el dimensionamiento y posterior construcción de los digestores.

3.2.1 Parámetros de diseño. De acuerdo con el inciso 2.2.2 donde se explicaron los parámetros necesarios para iniciar con la construcción del biodigestor, además de su importancia y sus respectivas ecuaciones, se procede con la estipulación de estos, donde se incluyen el volumen del contenedor principal y tiempo de retención (TR).

3.2.1.1 Volumen del reactor. En el caso del volumen del reactor, teniendo en cuenta que se podía elegir la cantidad de materia orgánica a tratar y el volumen del bidón podía ser uno existente en el mercado, el contenedor elegido fue de 60 L, razón por la que el volumen efectivo del bidón sería de 42 L.

3.2.1.2 **Tiempo de retención.** Para el tiempo de retención también se explicó previamente su uso y su respectiva ecuación en el inciso 2.2.2.2, sin embargo, en este caso se hará el respectivo cálculo de la ecuación 3.

$$TRH = -51.22 \ln(28^\circ C) + 206.72 = 36.04 \text{ dias}$$

3.2.2 **Dimensionamiento de los digestores.** De acuerdo a la sección 2.2.3 se realizó el cálculo del área de la base del reactor según la ecuación 4 y la altura efectiva según la ecuación 5.

$$A_R = \frac{\pi (0,3 \text{ m})^2}{4} = 0,070 \text{ m}^2$$

$$H_E = \frac{0,042 \text{ m}^3}{\pi (0,15 \text{ m})^2} = 0,59 \text{ m}$$

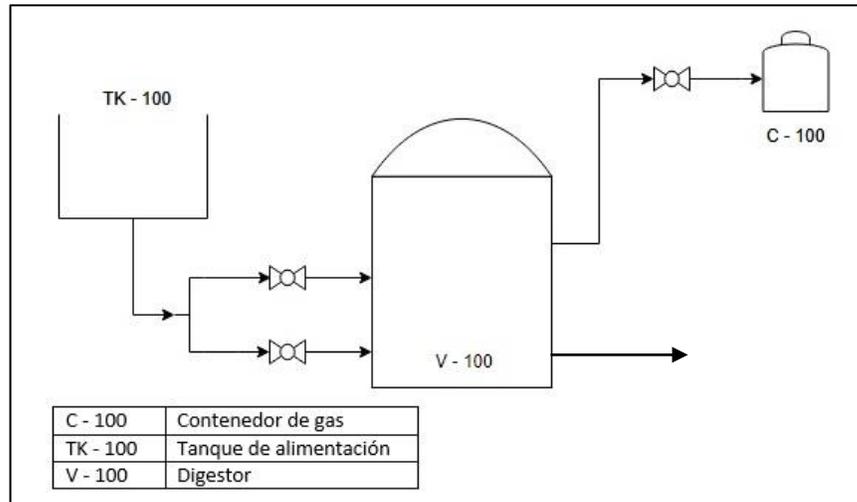
En el caso de la campana fija se utiliza la ecuación 6 como se muestra a continuación:

$$H_C = 0,85 \text{ m} - 0,59 \text{ m} = 0,26 \text{ m}$$

En consecuencia, la altura disponible para la campana es de 26 cm, sin embargo, se debe tener en cuenta que es necesario un espacio entre la superficie de la mezcla y la campana, razón por la que se utilizó un embudo comercial de 24 cm de altura y 25 cm de ancho.

3.2.3 **Construcción de los digestores.** Para la construcción de los digestores se realizó un diagrama PFD, tal como se observa en la ilustración 31 con el fin de establecer los materiales requeridos (ver anexo I), para el ensamblaje. Así mismo las especificaciones en cuanto al procedimiento de construcción se muestra en el anexo M.

Ilustración 31. Diagrama PFD de montaje



Fuente: elaboración propia

De acuerdo con el procedimiento del anexo L en la ilustración 32 se muestra el montaje final de los dos digestores ensamblados en la PTAR Villas del Nuevo Siglo.

Ilustración 32. Montaje final



Fuente: elaboración propia

3.2.3.1 **Volumen de biogás esperado.** El cálculo para el volumen de biogás esperado se realizó con la ecuación 6 obteniendo para el digestor 1 como resultado $0,01648 \text{ m}^3$ y para el digestor 2 se obtuvo un volumen de biogás de $0,01807 \text{ m}^3$.

$$V_{\text{Biogás LD1}} = 8,591 * 0,09 * 42 \text{ L} = 32,47 \text{ L} = 0,03247 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Biogás LD2}} = * 9,428 * 0,09 * 42 L = 35,64 L = 0.03564 m^3$$

De acuerdo a la revisión bibliográfica y con lo expuesto en la sección 1.5, teóricamente el porcentaje de metano está entre 50% y 70%⁷⁴; sin embargo, como es un valor teórico igual que el volumen de biogás esperado se asumió que el porcentaje de metano era del 70%.

$$V_{\text{metano digestor 1}} = 0,03247 m^3 * 0.7 = 0,0227 m^3$$

$$V_{\text{metano digestor 2}} = 0,03564 m^3 * 0.7 = 0,0249 m^3$$

3.3 DIAGNÓSTICO DE LA OBTENCIÓN DE BIOGÁS

En esta sección se muestran las condiciones de operación y su influencia en el proceso de digestión.

3.3.1 Puesta en marcha de los digestores. Inicialmente se procede con la carga de los digestores con cada una de las mezclas previamente acondicionadas, en el cuadro 8 se especifica la proporción de cada sustrato para la preparación de cada mezcla.

Cuadro 8. Mezclas para la carga de los digestores

	Digestión 1		Digestión 2	
	pH 6.5		pH 7.5	
	Relación C/N		Relación C/N	
	20:1	30:1	20:1	30:1
Volumen lodo (L)	10.16	10.28	10.16	10.28
Volumen gallinaza (L)	0.34	0.22	0.34	0.22
Volumen agua residual (L)	31.5	31.5	31.5	31.5
Volumen total (L)	42	42	42	42

Fuente: elaboración propia

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

En el transcurso de las digestiones se midieron parámetros como temperatura ambiente, temperatura externa (temperatura bajo la cobertura de plástico de

⁷⁴ VARNERO. Op cit., p 16.

invernadero), temperatura interna de los digestores, presión y pH, en el anexo G se encuentran las especificaciones de cada instrumento de medición.

pH: Para realizar la medición de este parámetro se cuenta con un pHmetro OHAUS portátil (ver ilustración 33) y cinta medidora de pH (ver ilustración 34). Estos dos instrumentos de medición se ponen en contacto directo con la mezcla para lo cual no es necesario realizar diluciones.

Ilustración 33. pHmetro OHAUS



Fuente: elaboración propia

Ilustración 34. Cinta medidora de pH



Fuente: elaboración propia

Temperatura: Las mediciones de temperatura se dividieron en dos: la temperatura externa y la temperatura interna de los digestores. En cuanto a la temperatura externa se utilizó un termómetro ambiental (ver ilustración 35) que mide de 20°C a 60°C. Para monitorear la temperatura interna de los digestores se utilizaron termómetros bimetálicos (ver ilustración 36) que cuentan con un rango de medición entre -40°C a 70°C adaptados a cada uno de los digestores. Cada una de las mediciones se realiza 4 veces por día (a las 8 am, 2 pm, 6 pm y 2 am) todos

los días, se escogen estos horarios ya que son las horas donde la temperatura ambiente tiene sus picos más altos y bajos.

Ilustración 35. Termómetro ambiental



Fuente: elaboración propia

Ilustración 36. Termómetro bimetalico



Fuente: elaboración propia

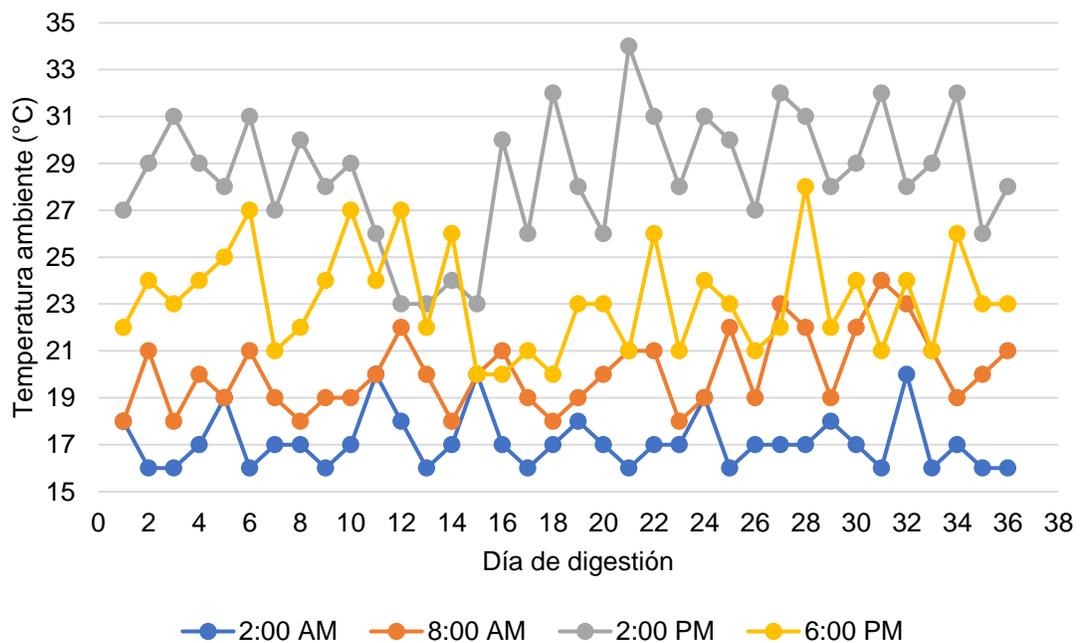
Para el registro de la temperatura ambiente se tomó la que registra el IDEAM en su página web a la hora de cada medición.

A continuación se presentan los resultados de cada una de las digestiones y cada uno de los digestores:

3.3.2.1 **Digestión 1.** Para el digestor 1 se realizó la carga con una mezcla que tiene relación C/N 20:1, se realizó la medición de pH dando como resultado un valor de 7,3 por lo cual fue necesario adicionar ácido acético al 3% para acidificar un poco la mezcla hasta llegar a pH de 6,5. Para el digestor 2 la mezcla cargada tenía una relación C/N 30:1, al realizar la medición de pH el resultado fue 7,8 razón por la que se acidificó la mezcla con ácido acético al 3% hasta obtener un pH de 6,5.

Temperatura: Como se mencionó anteriormente se tomó el valor de la temperatura en los dos digestores a la misma hora. A continuación, se presentan las gráficas 1, 2, 3 y 4 necesarias para analizar el comportamiento de la temperatura. En el anexo N, se encuentran los registros tomados de temperaturas con los que se elaboraron las gráficas.

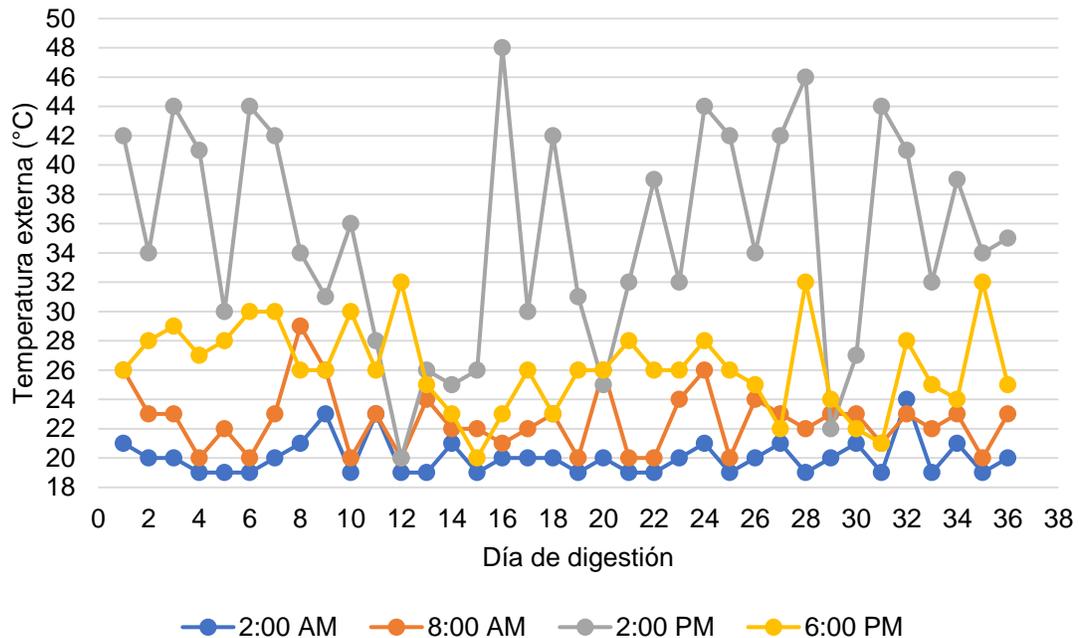
Gráfica 1. Temperatura ambiente digestión 1



Fuente: elaboración propia

Observando la gráfica 1, se evidencia que la temperatura ambiente en la PTAR Villas del Nuevo Siglo osciló entre 16 °C y 34°C, revelando que la temperatura promedio a las 2 am fue de 16,67°C donde se presentó el pico más bajo en todo el día con un valor de 16°C; en cuanto a la temperatura promedio a las 8 am fue de 20,83 °C; igualmente la temperatura promedio a las 2 pm fue de 28,5 °C presentando el pico más alto de temperatura con un valor de 34°C; por último, la temperatura promedio a las 6 pm fue de 23,19°C.

Gráfica 2. Temperatura externa digestión 1

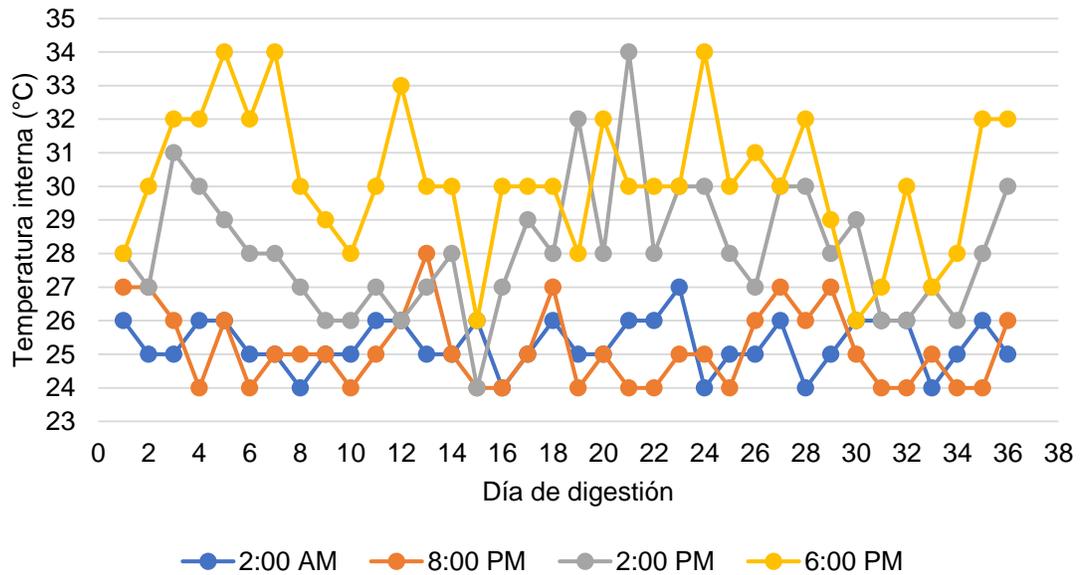


Fuente: elaboración propia

Con respecto a la temperatura externa (bajo el toldo) se puede observar en la gráfica 2 que osciló entre 19 °C y 48 °C, revelando que la temperatura promedio a las 2 am fue de 20,05 °C donde se presentó el pico más bajo en todo el día con un valor de 19°C; en cuanto a la temperatura promedio a las 8 am fue de 22,55 °C; igualmente la temperatura promedio a las 2 pm fue de 35,11 °C presentando el pico más alto de temperatura con un valor de 48 °C; por último, la temperatura promedio a las 6 pm fue de 26,22 °C.

Después de las consideraciones anteriores, se puede concluir que la temperatura bajo el toldo plástico en comparación con la temperatura ambiente registrada por el IDEAM es considerablemente más alta, ya que el plástico de invernadero posee una alta conductividad térmica razón por la cual retiene el calor manteniendo la temperatura externa por encima de la ambiental.

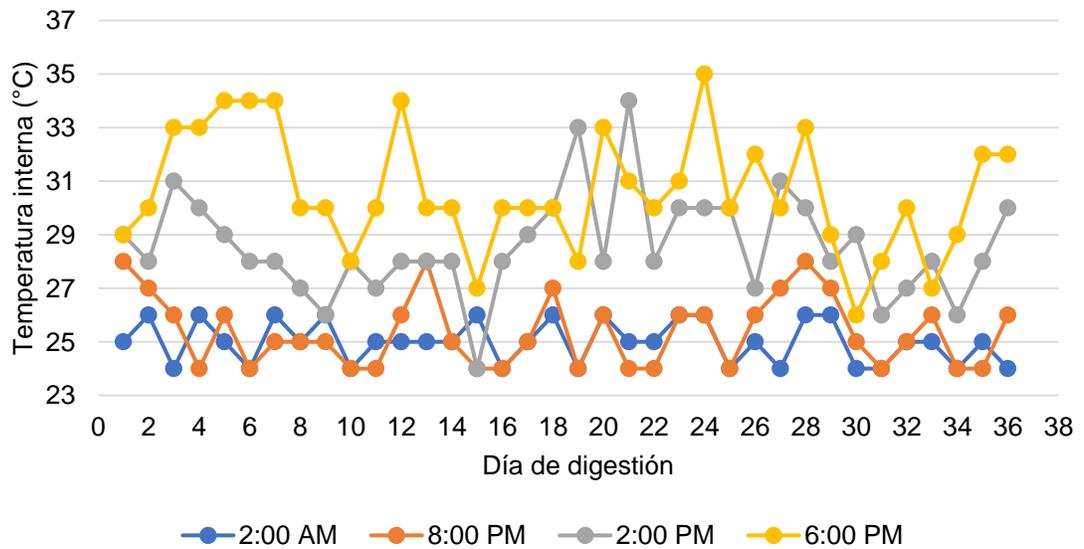
Gráfica 3. Temperatura interna digestor 1- digestión1



Fuente: elaboración propia

Considerando la gráfica 3 se puede extraer que la temperatura interna del digestor 1 varió entre 24 °C y 34 °C, revelando que la temperatura promedio a las 2 am fue de 25,3 °C; en cuanto a la temperatura promedio a las 8 am fue de 25,16 °C; igualmente la temperatura promedio a las 2 pm fue de 28,13 °C; por último, la temperatura promedio a las 6 pm fue de 30,6 °C.

Gráfica 4. Temperatura interna digestor 2- digestión 1



Fuente: elaboración propia

Considerando la gráfica 4 se puede extraer que la temperatura interna del digestor 2 varió entre 24 °C y 35 °C, revelando que la temperatura promedio a las 2 am fue de 25,08 °C; en cuanto a la temperatura promedio a las 8 am fue de 25,36 °C; igualmente la temperatura promedio a las 2 pm fue de 28,58 °C; por último, la temperatura promedio a las 6 pm fue de 30,6 °C.

Teniendo en cuenta la tabla 12 donde se presentan las temperaturas promedio a cada hora de medición en los digestores se evidencia que el cambio es no es mayor a 0,45 °C, razón por la cual en esta primera digestión la influencia de la temperatura no es significativa en el proceso de producción de biogás.

Tabla 12. Promedio de temperatura interna

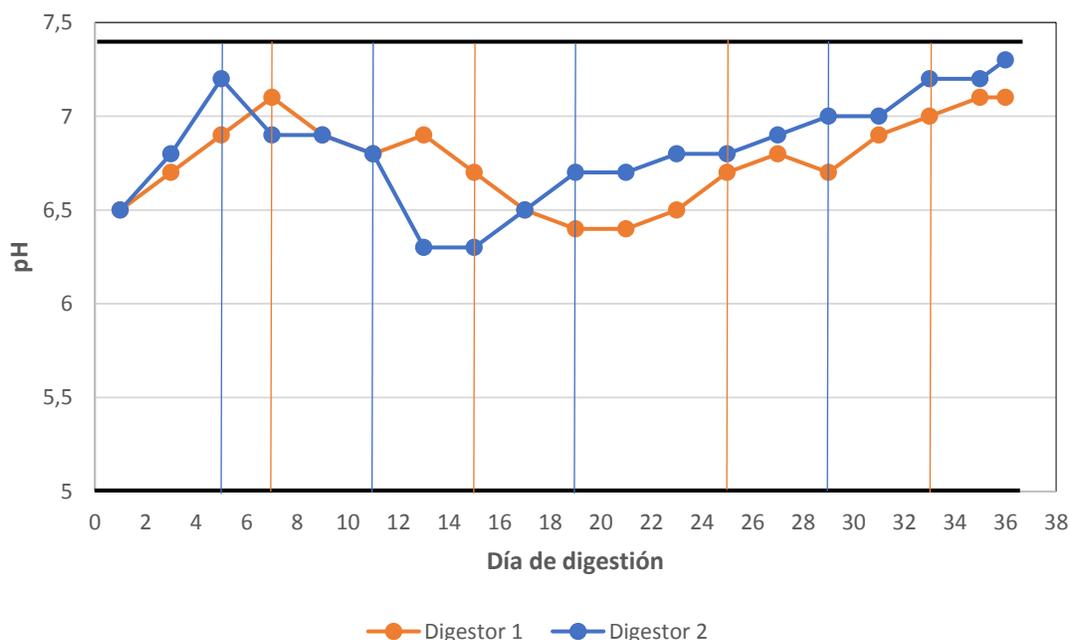
Hora	Digestor 1	Digestor 2
	Tprom (°C)	Tprom (°C)
2:00 AM	25,3	25,08
8:00 AM	25,16	25,36
2:00 PM	28,13	28,58
6:00 PM	30,6	30,6

Fuente: elaboración propia

Según se expuso en la sección 1.4.2.2 el rango óptimo de temperatura para realizar la digestión en régimen mesofílico es de 25 °C a 35 °C, se puede entonces corroborar que la temperatura en los digestores no se alejó del rango óptimo de operación. Es de resaltar que el material escogido para la construcción de los digestores propició que la temperatura no tuviera cambios drásticos.

pH: Este parámetro fue medido cada dos días durante el procesos de digestión, la razón principal fue observar según la variación de pH que etapa del proceso de digestión se estaba desarrollando en cada digestor. Las tablas con los registros de pH se encuentran en el Anexo P.

Gráfica 5. pH de los digestores digestión 1



Fuente: elaboración propia

***Nota:** pH inicial de 6.5. Digestor 1 con relación C/N de 20:1. Digestor 2 con relación C/N de 30:1

En la gráfica 5 se puede observar que el pH inicial en los digestores fue de 6,5. En el caso del digestor 1 el pH más alto fue de 7.1 en los días 7, 35 y 36 y el más bajo fue de 6,4 en los días 19 y 21. Para el digestor 2 el pH más alto fue de 7,3 en el día 36 y el más bajo fue de 6,3 en los días 13 y 15.

A continuación, se presenta de forma resumida cada una de las etapas de la digestión y el rango de pH en el cual se desarrolla (ver Tabla 13):

Tabla 13. Rango de pH según etapa de digestión

Fase de la digestión	Rango de pH
Fase hidrolítica	7.0 – 7.2
Fase acidogénica	5.1 – 6.8
Fase acetanogénica	6.6 – 6.8
Fase metanogénica	6.9 – 7.4

Fuente: OLAYA, Yeison. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Colombia. 2009. p 9.

A partir de la gráfica 5 y la tabla 13 se puede evidenciar de acuerdo a la variación de pH en el tiempo, en qué momento se está llevando a cabo cada una de las fases de la digestión, en el caso del digestor 1 para el día 7 el valor de pH fue de

7,1 haciéndose visible la fase hidrolítica, donde por acción de las hidrolasas las macromoléculas se están descomponiendo en moléculas más pequeñas; de la misma manera el día 15 el valor de pH fue de 6,7 haciendo visible la fase acidogénica, en la cual los productos intermedios se convierten en ácido acético, hidrogeno y dióxido de carbono; luego en el día 25 el valor de pH fue de 6,7 poniendo en evidencia la fase acetanogénica, en la que se produce acetato; y por último, el día 31 el valor de pH fue de 6,9 mostrando la fase metanogénica, donde a partir del acetato se produce el metano.

Así mismo en el digestor 2 se observaron las cuatro fases de la siguiente manera; la fase hidrolítica se reflejó el día 5 con un pH de 7,2, la fase acidogénica el día 11 con un pH de 6,8, la fase acetanogénica el día 19 con un pH de 6,7 y la fase metanogénica el día 27 con un pH de 6,9.

Se debe tener en cuenta que la producción de metano en una biodigestión siempre será mejor cuando el pH de la mezcla se encuentra cercano a la neutralidad (7,0), ya que valores bajos de pH generan menor producción de metano además de requerir un mayor tiempo de asimilación de la materia orgánica por parte de los microorganismos⁷⁵. De acuerdo a la información antes mencionada, se espera que la producción de biogás tanto en el digestor 1 como en el 2 sea buena, ya que la variación de pH en los digestores no muestra una desviación alta de la neutralidad.

Se ha reportado que en condiciones de pH menores a 6,0 el biogás producido es pobre en la cantidad de metano presente y por tanto su capacidad energética disminuye⁷⁶, razón por la que se espera que el biogás producido en esta digestión posea una buena capacidad energética, aunque en el digestor 1 se presentó un pico de pH cercano a 6.0 en los días 13 y 15 con un valor de 6,3 lo que hace pensar que el biogás producido pueda tener un bajo contenido de metano y por tanto su capacidad energética se vea afectada. También es importante aclarar que un pH ácido provoca que los microorganismos presentes en los digestores aceleren la fase acidogénica generando una acumulación de ácidos grasos volátiles y como consecuencia una acidificación del medio produciendo una menor cantidad de metano en el biogás.

DQO y sólidos volátiles: Estos parámetros se determinaron mediante análisis de laboratorio al inicio y al final de cada digestión con el objetivo de comprobar si el funcionamiento del sistema diseñado para el proceso de digestión fue acertado. Teniendo en cuenta que la DQO está relacionada de modo directo con la actividad de degradación de la materia orgánica y la producción de metano, ya que la digestión anaerobia es un proceso de transformación y no de destrucción de la

⁷⁵ VAZQUES, Franco. Influencia del pH sobre la digestión anaeróbica de biorresiduos de origen municipal. Informe de un grupo científico de la U.D.C.A. Bogotá. 2014. p 135.

⁷⁶ VILLANUEVA, Juan. NÁJERA, Hugo. Generación, caracterización y uso del biogás, producto de la digestión anaerobia de las excretas de ganado bovino. En: Lacandonia. Diciembre.2011. Vol 5. No. 2. p 149-158.

materia orgánica⁷⁷. A continuación, en la tabla 14 se presentan los resultados obtenidos para estos dos parámetros, los resultados de laboratorio se pueden encontrar en el anexo R.

Tabla 14. Resultados DQO y sólidos volátiles digestión 1

Parámetro	Unidad	Digestor 1	Digestor 2
Sólidos Volátiles	mg/L	3007	4149
DQO		4728	6750

Fuente: elaboración propia

Con respecto al digestor 1 el DQO disminuye en un 65,55% lo que se puede comparar con el porcentaje de remoción teórico del digestor escogido, que se encuentra entre el 60% y el 80%⁷⁸, razón por la que se corrobora que este tipo de digestor es el adecuado para el tratamiento de los lodos de la PTAR y se confirma que sí se llevó a cabo una degradación de materia orgánica en el proceso.

Para el digestor 2 el DQO disminuye un 54,82%, inicialmente comparándolo con el porcentaje de remoción del digestor 1 es menor, adicional a esto, en relación con el porcentaje teórico también se encuentra fuera del rango óptimo, esto puede deberse a que el proceso de degradación no se desarrolló bien dentro del digestor 2 razón por la que se espera una producción baja de metano en este digestor.

Con relación a los sólidos volátiles se puede decir que en el digestor 1 se obtuvo un porcentaje de remoción del 64,99 % y para el digestor 2 un porcentaje de 55,99%. Realizando un análisis de los parámetros de DQO y sólidos volátiles entre los dos digestores se puede encontrar una semejanza en los resultados ya que la variación en el % de remoción de DQO es de 0,56 % y la de sólidos totales es de 1,17 %; razón por la cual es evidente entonces que el porcentaje de remoción de DQO está ligado al porcentaje de remoción de sólidos volátiles.

3.3.2.2 Digestión 2. Para el digestor 1 se realizó la carga con una mezcla que tiene relación C/N 20:1, se realizó la medición de pH dando como resultado un valor de 7,3 por lo cual fue necesario adicionar hidróxido de calcio (cal) para alcalinizar un poco la mezcla hasta llegar a pH de 7,5.

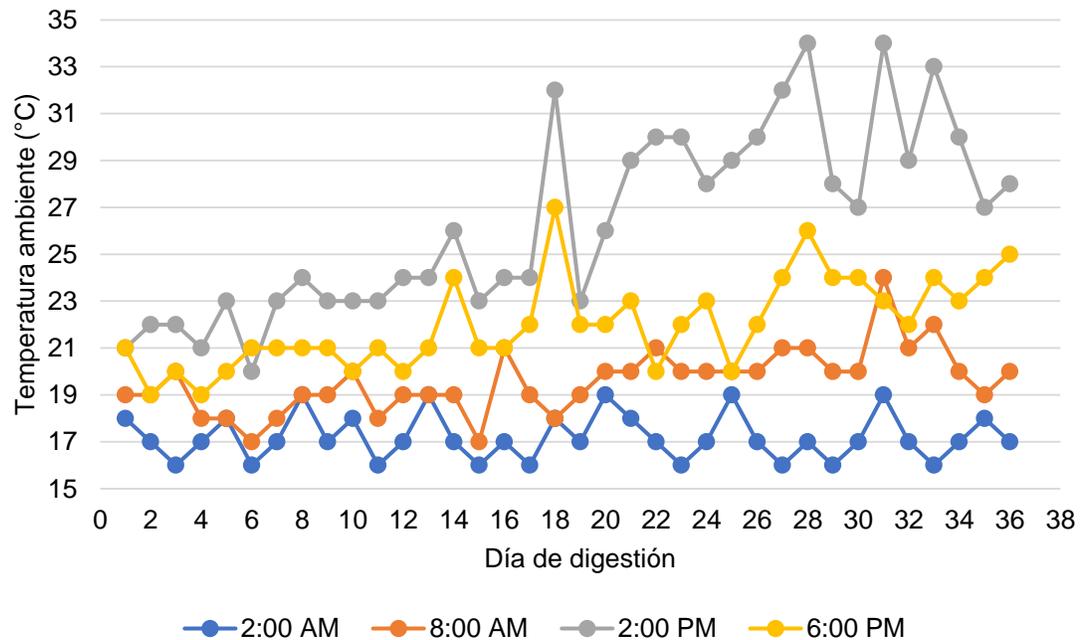
Para el digestor 2 la mezcla cargada tenía con una relación C/N 30:1, al realizar la medición de pH el resultado fue 7,8 razón por la que se acidifico la mezcla con ácido acético al 3% hasta obtener un pH de 7,5.

⁷⁷ GARCÍA, Olivina. PEDROZA, Aurelio. Evaluación de fuentes de materia orgánica fecal como inóculo en la producción de metano. En: Tecnología y ciencias del agua. Marzo. México. 2015. Vol 6. No. 2. p 35-49.

⁷⁸ MÁRQUEZ, Marjorie; MARTÍNEZ, Sergio A. op. cit. p 23.

Temperatura: A continuación, se presentan las gráficas 6, 7, 8 y 9 necesarias para analizar el comportamiento de la temperatura. En el anexo O se encuentra disponible la tabla con los datos del monitoreo.

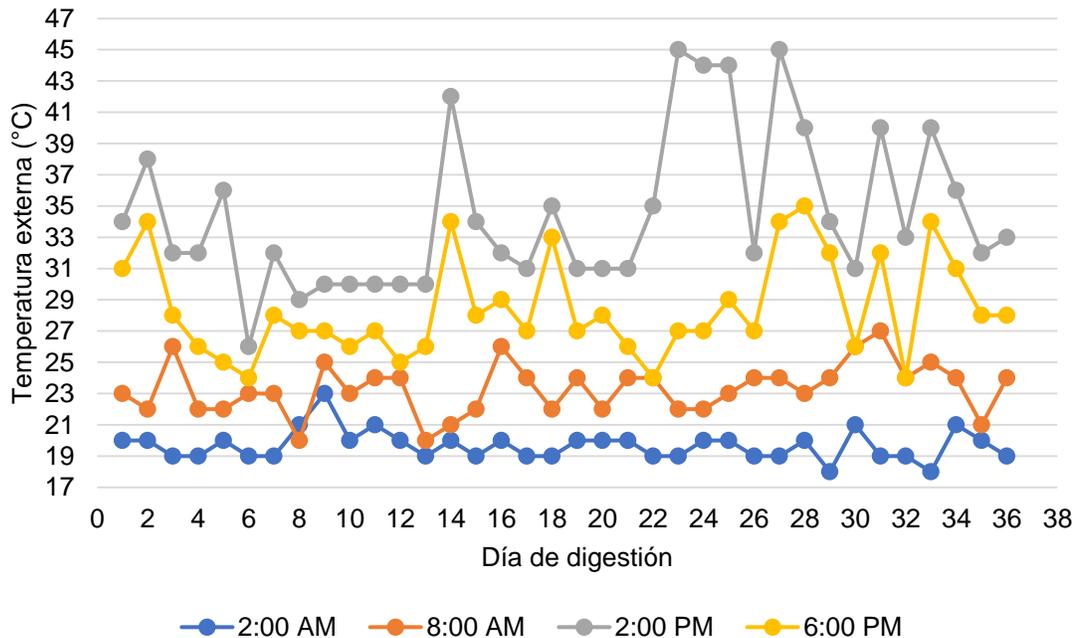
Gráfica 6. Temperatura ambiente digestión 2



Fuente: elaboración propia

Observando la gráfica 6, se evidencia que la temperatura ambiente en la PTAR Villas del Nuevo Siglo osciló entre 16 °C y 34 °C, revelando que la temperatura promedio a las 2 am fue de 17,19 °C donde se presentó el pico más bajo en todo el día con un valor de 16 °C; en cuanto a la temperatura promedio a las 8 am fue de 19,58 °C; igualmente la temperatura promedio a las 2 pm fue de 26,36 °C presentando el pico más alto de temperatura con un valor de 34 °C; por último, la temperatura promedio a las 6 pm fue de 22,02 °C.

Gráfica 7. Temperatura externa digestión 2

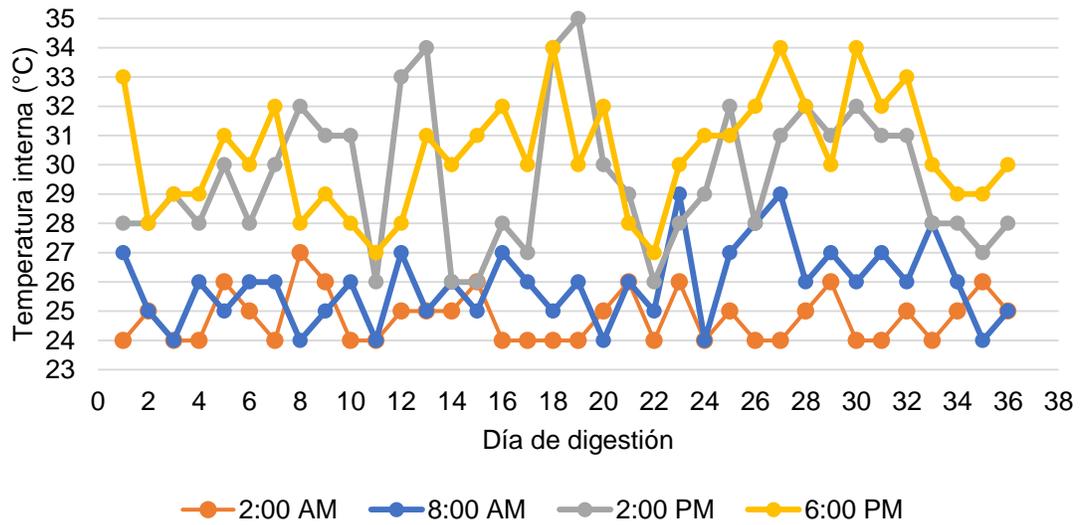


Fuente: elaboración propia

Con respecto a la temperatura externa (bajo el toldo) se puede observar en la gráfica 7 que osciló entre 18 °C y 45 °C, revelando que la temperatura promedio a las 2 am fue de 19,67 °C donde se presentó el pico más bajo en todo el día con un valor de 18 °C; en cuanto a la temperatura promedio a las 8 am fue de 23,30 °C; igualmente la temperatura promedio a las 2 pm fue de 34,44 °C presentando el pico más alto de temperatura con un valor de 45 °C; por último, la temperatura promedio a las 6 pm fue de 28,44 °C.

Después de las consideraciones anteriores, se puede concluir que la temperatura bajo el toldo plástico en comparación con la temperatura ambiente registrada por el IDEAM es considerablemente más alta, ya que el plástico de invernadero posee una alta conductividad térmica razón por la cual retiene el calor manteniendo la temperatura externa por encima de la ambiental.

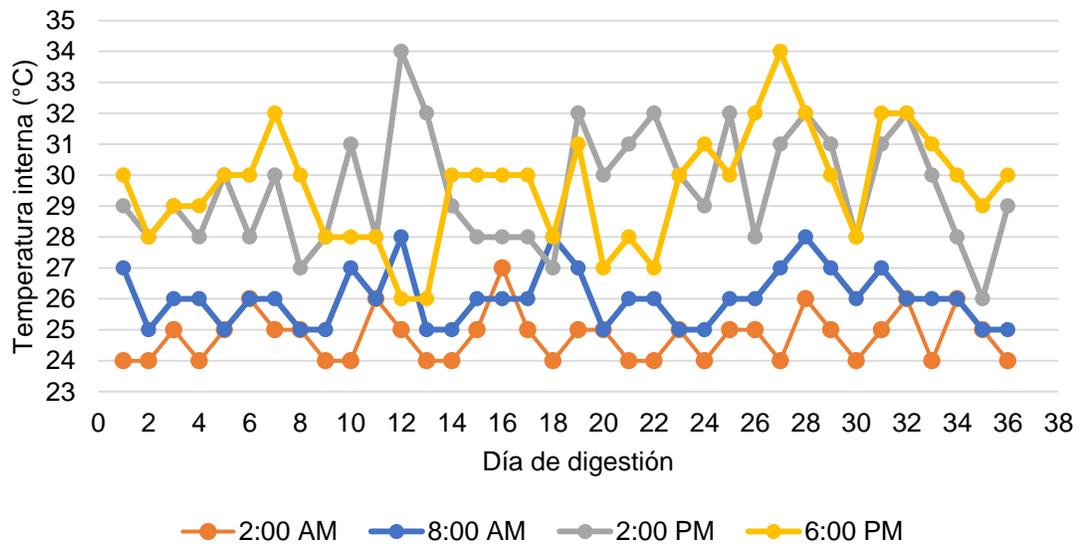
Gráfica 8. Temperatura interna digestor 1- digestión 2



Fuente: elaboración propia

Considerando la gráfica 8 se puede extraer que la temperatura interna del digestor 1 varió entre 24 °C y 35 °C, revelando que la temperatura promedio a las 2 am fue de 24,77 °C; en cuanto a la temperatura promedio a las 8 am fue de 25,88 °C; igualmente la temperatura promedio a las 2 pm fue de 29,58 °C; por último, la temperatura promedio a las 6 pm fue de 30,38 °C.

Gráfica 9. Temperatura interna digestor 2- digestión 2



Fuente: elaboración propia

Considerando la gráfica 9 se puede extraer que la temperatura interna del digestor 2 varió entre 24 °C y 34 °C, revelando que la temperatura promedio a las 2 am fue de 24,77 °C; en cuanto a la temperatura promedio a las 8 am fue de 26,02 °C; igualmente la temperatura promedio a las 2 pm fue de 29,55 °C; por último, la temperatura promedio a las 6 pm fue de 29,61 °C.

Teniendo en cuenta la tabla 15 donde se presentan las temperaturas promedio a cada hora de medición en los digestores se evidencia que el cambio es no es mayor a 0,77 °C, razón por la cual en esta segunda digestión la influencia de la temperatura no es significativa en el proceso de producción de biogás.

Tabla 15. Promedio de temperatura interna

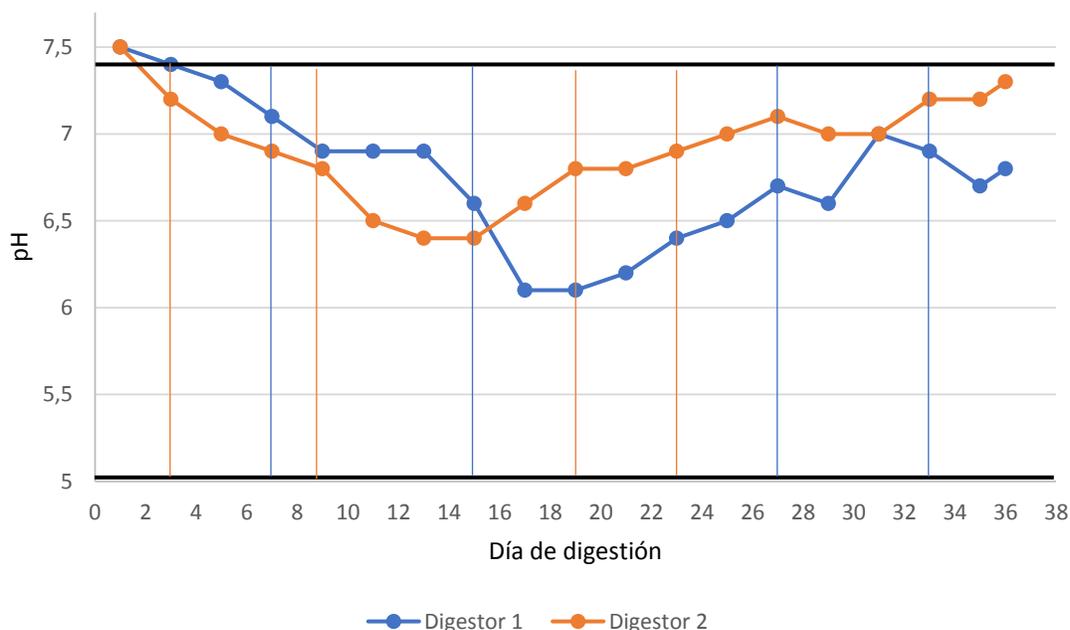
Hora	Digestor 1 Tprom (°C)	Digestor 2 Tprom (°C)
2:00 AM	24,77	24,77
8:00 AM	25,88	26,02
2:00 PM	29,58	29,55
6:00 PM	30,38	39,61

Fuente: elaboración propia

Según se expuso en la sección 1.4.2.2 el rango óptimo de temperatura para realizar la digestión en régimen mesofílico es de 25 °C a 35 °C, se puede entonces corroborar que la temperatura en los digestores no se alejó del rango óptimo de operación. Es de resaltar que el material escogido para la construcción de los digestores propició que la temperatura no tuviera cambios drásticos.

pH: A continuación, se presenta la gráfica 10 del monitoreo de pH en los digestores y adicional en el anexo Q se encuentra los registros de pH.

Gráfica 10. pH de los digestores digestión 2



Fuente: elaboración propia

***Nota:** pH inicial de 6,5. Digestor 1 con relación C/N de 20:1. Digestor 2 con relación C/N de 30:1

En la gráfica 10 se puede observar que el pH inicial en los digestores fue de 7,5. En el caso del digestor 1 el pH más alto diferente al inicial fue de 7,4 en el día 3 y el más bajo fue de 6,1 en los días 17 y 19. Para el digestor 2 el pH más alto diferente al inicial fue de 7,3 en el día 36 y el más bajo fue de 6,4 en los días 13 y 15.

A partir de la gráfica 10 y la tabla 13 se puede evidenciar de acuerdo a la variación de pH en el tiempo, en qué momento se está llevando a cabo cada una de las fases de la digestión, en el caso del digestor 1 la fase hidrolítica se reflejó el día 7 con un pH de 7,1, la fase acidogénica el día 15 con un pH de 6,6, la fase acetanogénica el día 27 con un pH de 6,7 y la fase metanogénica el día 33 con un pH de 6,9.

Así mismo en el digestor 2 se observaron las cuatro fases de la siguiente manera; para el día 3 el valor de pH fue de 7,2 haciéndose visible la fase hidrolítica; de la misma manera el día 9 el valor de pH fue de 6,8 haciendo visible la fase acidogénica; luego en el día 17 el valor de pH fue de 6,6 poniendo en evidencia la fase acetanogénica; por último, el día 23 el valor de pH fue de 6,9 mostrando la fase metanogénica.

De acuerdo a la información mencionada por Vásquez⁷⁹, se espera que la producción de metano tanto en el digestor 1 como en el 2 sea alta ya que la variación de pH en los digestores no muestra una desviación alta de la neutralidad, aunque en el digestor 1 se presentó un pico de pH cercano a 6.0 en los días 17 y 19 con un valor de 6.1 lo que hace pensar que el biogás producido pueda tener un bajo contenido de metano y por tanto su capacidad energética se vea afectada.

DQO y sólidos volátiles: A continuación, en la tabla 16 se presentan los resultados obtenidos para estos dos parámetros. En el anexo R se muestran los resultados de laboratorio.

Tabla 16. Resultados DQO y sólidos volátiles digestión 2

Parámetro	Unidad	Digestor 1	Digestor 2
Sólidos Volátiles	mg/L	2663	2241
DQO		4392	4258

Fuente: elaboración propia

Con respecto al digestor 1 el DQO disminuye en un 68 %, para el digestor 2 el DQO disminuye un 71,5 % lo que se puede comparar con el porcentaje de remoción teórico del digestor escogido, que se encuentra entre el 60% y el 80%⁸⁰, razón por la que se corrobora que este tipo de digestor es el adecuado para el tratamiento de los lodos de la PTAR y se confirma que sí se llevó a cabo una degradación de materia orgánica en el proceso.

Al realizar la comparación del porcentaje de remoción del digestor 2 con el porcentaje del digestor 1 se observa que es menor, adicional a esto, en relación con el porcentaje teórico los dos están dentro del rango esperado para un reactor batch.

Con relación a los sólidos volátiles se puede decir que en el digestor 1 se obtuvo un porcentaje de remoción del 69 % y para el digestor 2 un porcentaje de 76,23 %. Realizando un análisis de los parámetros de DQO y sólidos volátiles entre los dos digestores se puede encontrar una semejanza en los resultados ya que la variación en el porcentaje de remoción de DQO es de 1 % y la de sólidos totales es de 4,73 %; razón por la cual es evidente entonces que el porcentaje de remoción de DQO está ligado al porcentaje de remoción de sólidos volátiles.

⁷⁹ VAZQUES, Franco. Op. cit. p 135.

⁸⁰ MÁRQUEZ, Marjorie; MARTÍNEZ, Sergio A. op. cit. p 23.

Como conclusión podemos afirmar que en la evaluación del proceso de digestión, el porcentaje de remoción de DQO y de sólidos volátiles más alto se dió en la digestión 2 para el digestor 2, razón por la que se espera que la producción de biogás sea alta, puesto que estos porcentajes de remoción están relacionados con el proceso de degradación de materia orgánica. En cuanto al pH se puede concluir que el sustrato de alimentación que presentó mayor degradación de materia orgánica fue el de la digestión 2 con un valor inicial de 7,5, este resultado se da ya que este pH está más cercano al valor en el que se desarrolla la primera etapa de la digestión que está en un rango de 7,0 a 7,2, razón por la que los microorganismos necesitan menos tiempo para su fase de adaptación y por consiguiente se estabiliza el sistema en menor tiempo.

3.4 CUANTIFICACIÓN DE METANO

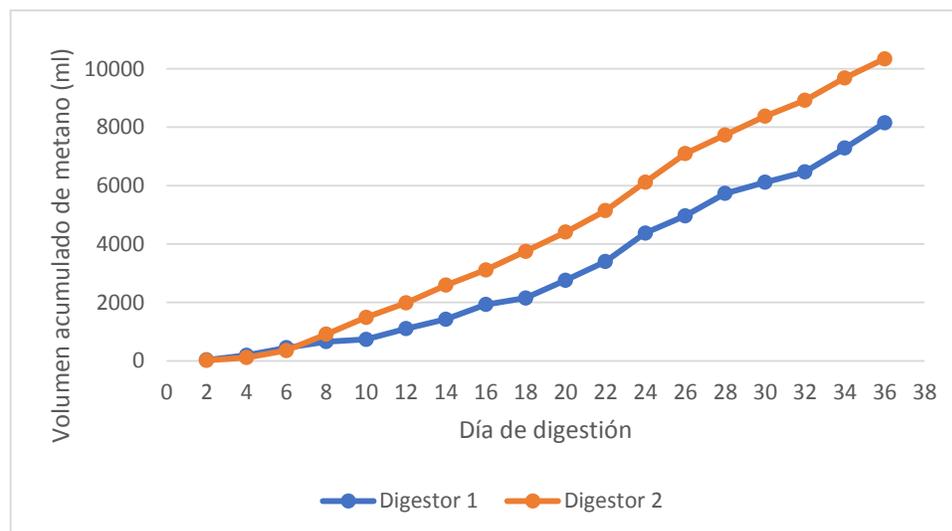
En esta sección se muestran y analizan los resultados obtenidos de la cuantificación de metano en cada digestor.

Para la cuantificación de metano se siguió el procedimiento descrito en la sección 2.4. A fin de emplear esta técnica, se hizo la suposición de que todo el CO₂ presente en el biogás reaccionó con la solución de NaOH y el gas acumulado en la bolsa de policloruro de vinilo era solo metano. De acuerdo a la revisión bibliográfica se determinó que en la composición del biogás no sólo está presente el dióxido de carbono y el metano, sino también impurezas como hidrógeno y ácido sulfhídrico que se encuentran en cantidades menores al 1% en volumen, razón por la cual en este caso se pasaron por alto en la cuantificación.

Es importante decir que en las dos digestiones fue necesario rellenar las bolsas de solución de NaOH cada día de monitoreo con el fin de minimizar el error en la cuantificación debido a que la solución reacciona a medida que se pone en contacto con el CO₂.

3.4.1 Digestión 1. A continuación, en la gráfica 11 se presentan los datos obtenidos en el monitoreo para cada digestión. Las tablas de datos de monitoreo se encuentran en el anexo S.

Gráfica 11. Volumen acumulado vs día de digestión



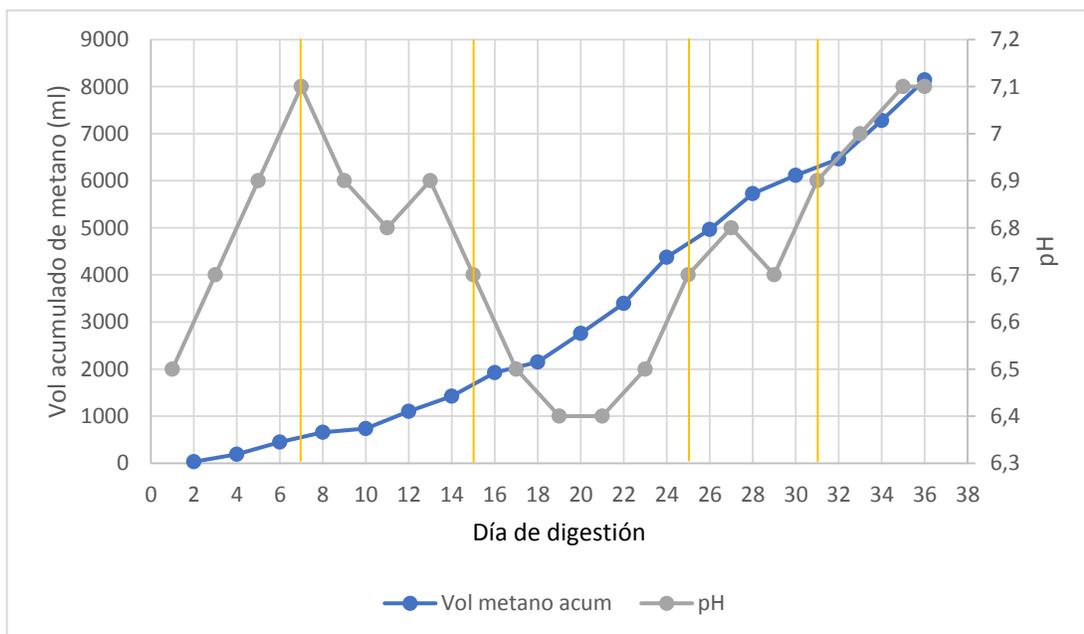
Fuente: elaboración propia

En la gráfica 11 se puede observar que en los primeros tres días de monitoreo los volúmenes de metano acumulado fueron semejantes, ya que en estos primeros días los microorganismos se adaptan al sustrato, pero a partir del día 4 el digestor 2 tuvo una mayor producción, esto se debe a que el pH empieza a acercarse al valor óptimo para la producción. La producción total de metano en el digestor 1 fue de 8,144 L y en el digestor 2 fue de 10,337 L.

Con respecto al volumen esperado de metano para la digestión 1, en la sección 3.2.3.1 se obtuvo que para el digestor 1, es de 22,7 L, el cual en comparación con el volumen producido experimentalmente es un 35,87 % de lo teórico. En el caso del digestor 2, el volumen de metano esperado es de 24,9 L, en comparación con el volumen producido experimentalmente es un 69,42 % de lo teórico.

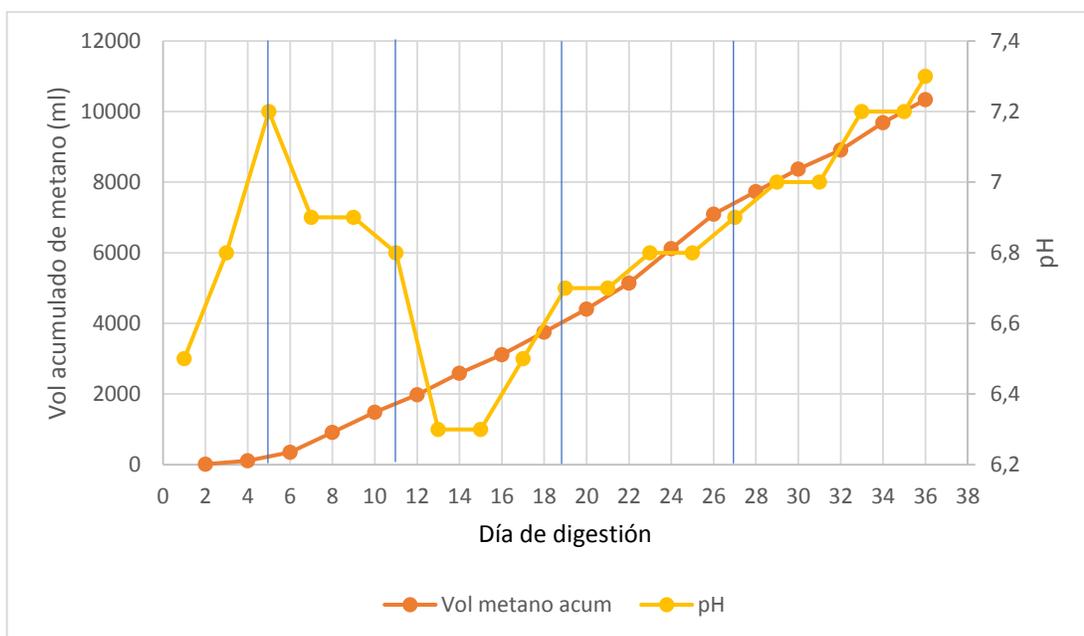
A continuación, se presentan las gráficas 12 y 13 en donde se encuentra la superposición de la gráfica de volumen acumulado y la de pH para establecer el comportamiento de la digestión en el digestor 1 y 2.

Gráfica 12. Comparación volumen acumulado y pH digestión 1- digestor 1



Fuente: elaboración propia

Gráfica 13. Comparación volumen acumulado y pH digestión 1- digestor 2



Fuente: elaboración propia

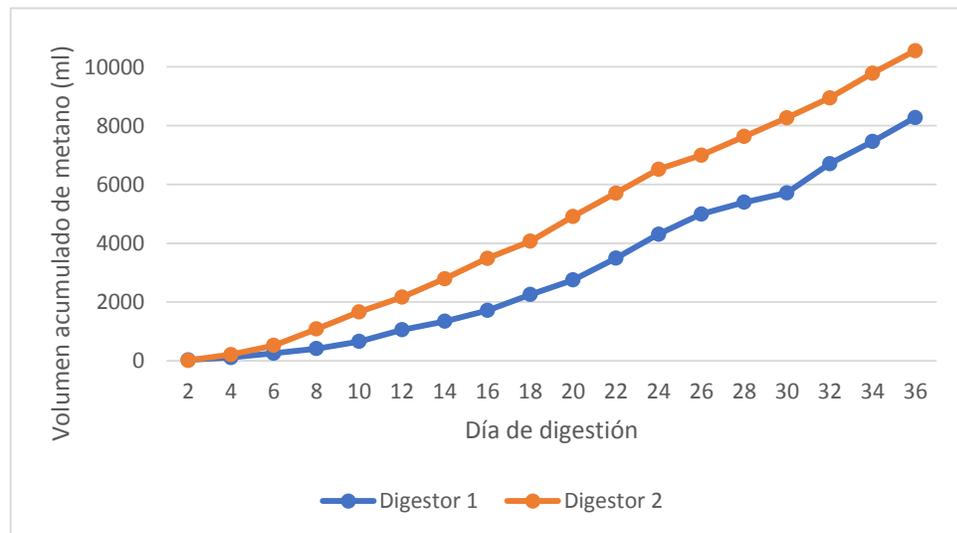
Realizando un análisis de la gráfica 12 a partir del cálculo de las pendientes en cada una de las fases de la digestión se determinó que la pendiente en la fase acidogénica es mayor que en la fase acetanogénica y el pH tiene una caída hasta

un valor muy cercano a 6,0, razón por la que podemos concluir que en esta digestión se evidencia una acumulación de ácidos grasos volátiles y en consecuencia una baja calidad del biogás por la presencia de CO₂ e hidrogeno.

En el caso de la gráfica 13 se observa también una caída de pH en la fase acidogénica, pero a diferencia de la gráfica anterior la pendiente en la fase acetanogénica crece, lo cual significa que los ácidos grasos no se acumulan en el digestor, permitiendo así la producción de una cantidad mayor de metano.

3.4.2 Digestión 2. A continuación en la gráfica 14 se presentan los datos obtenidos en el monitoreo para cada digestión. Las tablas de datos de monitoreo se encuentran en el anexo S.

Gráfica 14. Volumen acumulado vs día de digestión



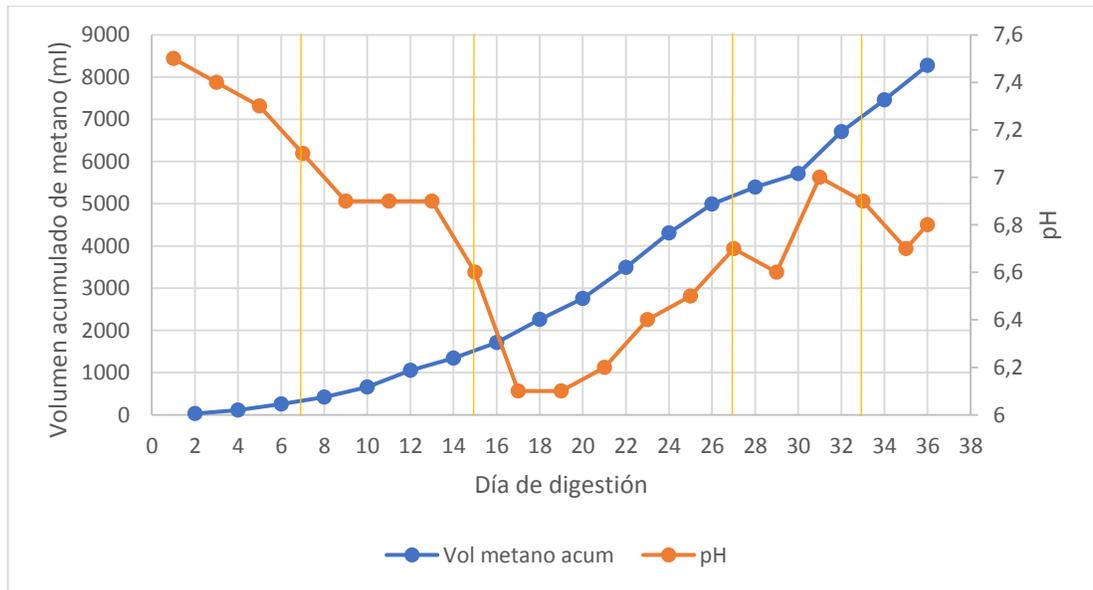
Fuente: elaboración propia

En la gráfica 14 se puede observar que en los primeros tres días de monitoreo los volúmenes de metano acumulado fueron semejantes, ya que en estos primeros días los microorganismos se adaptan al sustrato, pero a partir del día 4 el digestor 2 tuvo una mayor producción, esto se debe a que el pH empieza a acercarse al valor óptimo para el proceso. La producción total de metano en el digestor 1 fue de 8,272 L y en el digestor 2 fue de 10,545 L.

Con respecto al volumen esperado de metano para la digestión 1, en la sección 3.2.3.1 se obtuvo que para el digestor 1, es de 22,7 L, el cual, en comparación con el volumen producido experimentalmente, es un 36,44% del teórico. En el caso del digestor 2, el volumen de metano esperado es de 24,9 L, en comparación con el volumen producido experimentalmente es un 42,35% del teórico.

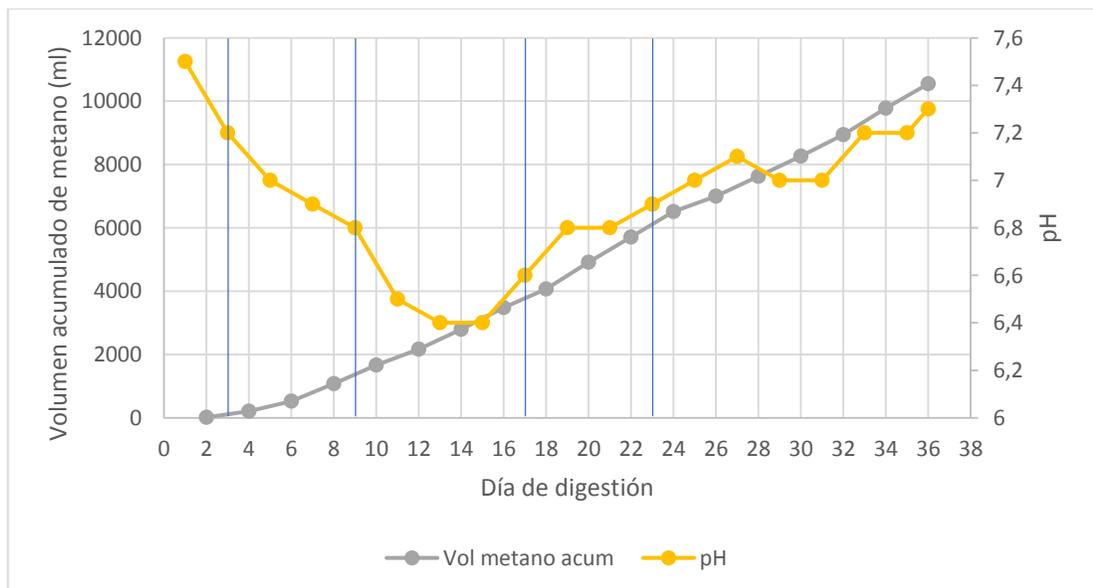
A continuación, se presentan las gráficas 15 y 16 en donde se encuentra la superposición de la gráfica de volumen acumulado y la de pH para establecer el comportamiento de la digestión en el digestor 1 y 2.

Gráfica 15. Comparación volumen acumulado y pH digestión 2- digestor 1



Fuente: elaboración propia

Gráfica 16. Comparación volumen acumulado y pH digestión 2- digestor 2



Fuente: elaboración propia

Realizando un análisis de la gráfica 15 a partir del cálculo de las pendientes en cada una de las fases de la digestión se determinó que la pendiente es similar en la fase acidogénica y en la fase acetanogénica. El pH tiene una caída hasta un valor muy cercano a 6,0 presentándose el pH más bajo en las cuatro digestiones, razón por la que podemos concluir que en esta digestión se evidencia una acumulación de ácidos grasos volátiles y en consecuencia una baja calidad del biogás por la presencia de CO₂ e hidrogeno.

En el caso de la gráfica 16 se observa también una caída de pH en la fase acidogénica, pero a diferencia de la gráfica anterior la pendiente en la fase acetanogénica crece, lo cual significa que los ácidos grasos no se acumulan en el digestor, permitiendo así la producción de una cantidad mayor de metano.

A continuación, se presenta la tabla 17 donde se encuentran condensados los resultados obtenidos para las condiciones de operación y la producción de metano en cada digestor.

Tabla 17. Resultados

		pH	Relación C/N	% Remoción DQO	% Remoción sólidos volátiles	Producción de metano (L)
Digestión 1	Digestor 1	6.5	20:1	65.55	64.99	8.144
	Digestor 2	6.5	30:1	54.82	55.99	10.337
Digestión 2	Digestor 1	7.5	20:1	68.00	69.00	8272
	Digestor 2	7.5	30:1	71.50	76.23	10.545

Fuente: elaboración propia

En síntesis, se puede concluir que el proceso que mejores resultados arrojó fue la digestión 2 con el digestor 2, que se inició con un pH de 7,5 y una relación C/N de 30:1; los resultados que se obtuvieron fueron para porcentaje de remoción de DQO 71,5%, para porcentaje de remoción de sólidos volátiles 76,23%, lo cual indica el mejor proceso de degradación de materia orgánica. Además, se puede decir que para este caso la degradación coincidió con la producción de metano, a partir de este hecho se puede inferir que el proceso de digestión anaerobia en este digestor se llevó a cabo en condiciones óptimas.

Por último, se presenta la ilustración 37 donde se muestra la combustión del metano producido en el digestor con mejor producción de metano.

Ilustración 37. Combustión del metano producido



Fuente: elaboración propia

3.5 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA PTAR VILLAS DEL NUEVO SIGLO

En esta sección se muestran los resultados para el escalamiento del proceso de digestión para la PTAR Villas del Nuevo Siglo, para esto es necesario conocer la cantidad de lodo producido por día en la PTAR. Según registros de la PTAR diariamente se producen 21,047 L de lodo, como el tiempo de retención es de 36 días, la carga del digester se realiza con el lodo acumulado de 37 días, entonces se tiene que la cantidad de lodo a procesar es de 778,74 L, con base en este reporte se realiza el diseño.

3.5.1 Adecuación de lodos. Para el procesamiento de 778,74 L mediante la plantilla de Excel anteriormente utilizada con ayuda de la herramienta solver, se encuentra la cantidad de gallinaza necesaria para garantizar la relación C/N de 30:1.

A continuación, se muestra en la ilustración 38 la plantilla utilizada para ejecutar el solver y en la tabla 18 los parámetros de la herramienta.

Ilustración 38. Plantilla de Excel

	Densidad	Volumen	Volumen mezcla
Lodo (1)	0.77	778.74	
Gallinaza (2)	1.97	17.0056565	795.7
Q1	599.629808		
Q2	33.5011433		
C1	21.18		
C2	18.57		
N1	0.012		
N2	13.67		
m1	17.45		
m2	21.43		
Función Objetivo		30	

Q= cantidad en kg
C = Cantidad de carbono en % en peso
N= Cantidad de nitrógeno en % en peso
m= humedad relativa

Fuente: elaboración propia

Tabla 18. Parámetros de solver

	Relación C/N 30:1
Función Objetivo	Relación C/N
Para	Valor de 30
Celdas variables	Q2
Restricción	Volumen lodo = 778,74 L

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con el resultado de la ejecución del solver, se obtuvo que para 778,74 L de lodo se necesitan 17 L de gallinaza con un volumen de materia orgánica de 795,7 L, por tanto, la cantidad de agua requerida es de 2387,1 L.

3.5.2 Parámetros de diseño. Volumen del reactor: Teniendo en cuenta que el volumen de mezcla es de 3182,8 L y recordando que el 70 % del volumen total del digestor es para la mezcla y el 30 % para biogás, se puede afirmar que el volumen del reactor es de 4547 L. Para efectos de seguridad, se añadirá un 10% del volumen total, por esta razón, se construirá un tanque de fermentación de 5000 L.

Tiempo de retención: Este parámetro como se calculó en el inciso 3.2.1 es de 36 días.

3.5.3 Dimensionamiento de los digestores. El dimensionamiento del digestor se realiza siguiendo la secuencia de cálculo establecida en el inciso 2.2.3.

Para determinar la altura del digestor es necesario utilizar la ecuación 11.

Ecuación 11. Cálculo de la altura del digestor

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

Siendo;

H: Altura del digestor (m)

V_R : Volumen del digestor (m^3)

D: Diámetro del digestor (m)

Con respecto al diámetro del digestor, es necesario tener en cuenta que el área disponible en la PTAR para su diseño es de $6 m^2$, por tanto, se estableció el diámetro del tanque como 1,5 m.

$$H = \frac{5 m^3}{\frac{\pi (1,5 m)^2}{4}} = 2,83 m$$

Se obtiene que la altura del reactor es de 2,83 m.

- Se procede a calcular el área de la base con la ecuación 4.

$$A_R = \frac{\pi (1,5 m)^2}{4} = 1,77 m^2$$

El área de la base del reactor es de $1,77 m^2$

- Posteriormente se calculó la altura efectiva del tanque de fermentación con la ecuación 5.

$$H_E = \frac{3,18296 m^3}{\pi (0,75)^2} = 1,80 m$$

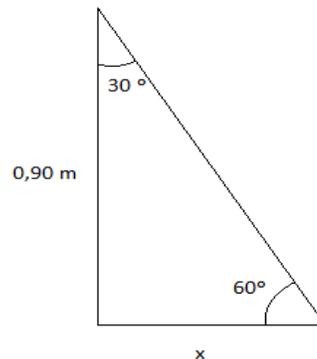
Por último, se realiza el cálculo para la altura disponible para la campana teniendo en cuenta la ecuación 6.

$$H_C = 2,83 \text{ m} - 1,80 \text{ m} = 1,03 \text{ m}$$

En consecuencia, se obtuvo que la altura disponible para la campana es de 1,03 m, teniendo en cuenta que el espacio entre la superficie y la campana debe permitir que el biogás ascienda, se estableció que la altura de la campana sea de 0,90 m.

Según la literatura el ángulo que se recomienda para la construcción es de 60° debido a que ajusta de forma más adecuada a las condiciones de diseño, tanto de la campana como del tubo del reactor⁸¹.

La campana de extracción es de forma cónica, por esta razón, con la altura anteriormente calculada y el ángulo de inclinación establecido teóricamente se procedió con el cálculo del ancho de la campana.



Con ayuda de la relación trigonométrica de tangente se calculó el cateto adyacente para obtener el ancho de la campana.

$$\tan 30^\circ = \frac{\text{cateto adyacente}}{\text{cateto opuesto}} = \frac{x}{0,90 \text{ m}} = 0,52 \text{ m}$$

De esta manera se puede concluir que la campana a construir tiene una altura de 0,90 m y un ancho de 1,04 m.

3.5.4 Construcción de los digestores. Para la implementación del proceso de obtención de biogás partir de lodos en la PTAR Villas del Nuevo Siglo se describirán a continuación los materiales y la construcción del biodigestor.

⁸¹ MÁRQUEZ, Marjorie; MARTÍNEZ, Sergio. Reactores anaerobios de Flujo ascendente (RAFA's o UASB) Antología. Centro Tecnológico Aragón. México. 2011. p 28.

Inicialmente el proceso se realizará en un tanque de polietileno de alta densidad, con una capacidad de 5000 L. En el caso de la campana se pedirá su fabricación de acuerdo a las medidas estipuladas en el punto anterior y los materiales adicionales serán presentados en la tabla 19.

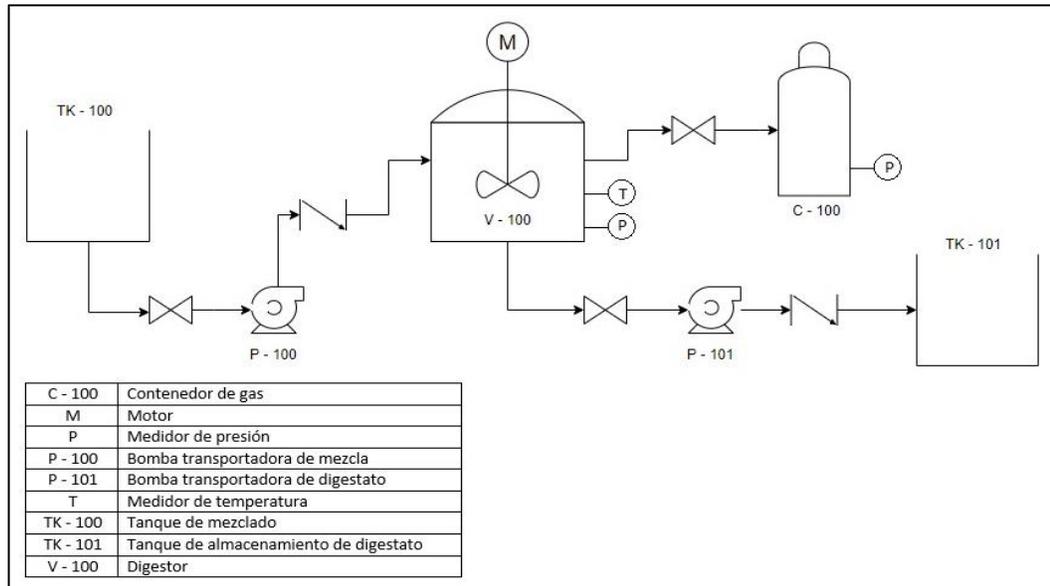
Tabla 19. Materiales para la construcción del biodigestor

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
10	Tubería PVC de 4" * metro
3	Registros de PVC de 4"
1	Tee de PVC de 4"
3	Codos de PVC de 4"
1	Soldadura para PVC * litro
1	Limpiador para PVC * litro
5	Manguera de gas 1/2"
2	Registro de gas 1/2" * metro
3	Flanches de 4"
1	Termómetro bimetalico
1	pHmetro
1	Bomba hidráulica
1	Sistema de agitación mecánica

Fuente: elaboración propia

Así mismo, es necesario tener un tanque que cuente con mínimo el volumen efectivo del digestor, con el fin de realizar allí la mezcla de lodo y gallinaza necesaria para ponerlo en funcionamiento. En la ilustración 39 se muestra el diagrama PFD correspondiente al montaje del proceso de digestión en la PTAR Villas del Nuevo Siglo.

Ilustración 39. Diagrama PFD del proceso en la PTAR



Fuente: elaboración propia

Para el almacenaje del biogás se debe tener un gasómetro que cuente mínimo con capacidad de albergar el volumen de biogás esperada calculada para la PTAR, que en este caso se realiza con la ecuación 7, como se muestra a continuación.

$$V_{Biogas} = 9,428 * 0.09 * 3182.96 L = 2700,80 L$$

3.5.5 Condiciones de operación. En cuanto a las condiciones de operación se tendrán en cuenta el pH inicial, la relación C/N y la temperatura. En el caso del pH inicial debe escogerse el valor de 7,5, ya que según los resultados arrojados es el idóneo para el proceso; por otra parte, para la relación C/N es mejor opción la de 30:1 y por último, en la temperatura no se tiene un valor exacto ya que el de la zona es apropiado para el proceso; sin embargo se debe tener en cuenta que para garantizar la degradación de la materia orgánica por acción de los microorganismos, no se deben permitir cambios drásticos de temperatura dentro del digestor.

4. COSTOS DE INVERSIÓN Y DE OPERACIÓN DEL PROCESO DE DIGESTIÓN PARA LA PTAR VILLAS DEL NUEVO SIGLO

En este capítulo se presenta la estimación de costos de inversión y de operación necesarios para la implementación del proceso de digestión anaerobia en la PTAR Villas del Nuevo Siglo con las especificaciones mencionadas anteriormente. Se desarrolla el análisis de costos de inversión (CAPEX) y de costos de operación (OPEX) para estimar los costos de producción de biogás.

4.1 ANÁLISIS DE INVERSIÓN (CAPEX)

En este análisis se incluirán los costos de inversión generados por el equipamiento necesario para el proceso. A continuación se presenta la tabla 20, donde de acuerdo las especificaciones técnicas obtenidas para la PTAR se hace una lista de materiales y equipos requeridos para realizar el montaje de digestión con el respectivo valor que fue tomado de las cotizaciones realizadas.

Tabla 20. Costos de inversión

Costos de inversión			
Cantidad	Descripción	Costo unitario	Costo total
1	Sistema de agitación mecánica (60 rpm)	\$915.000	\$915.000
2	Bomba Hidráulica (7 HP)	\$3.000.000	\$6.000.000
1	Tanque para biodigestor	\$15.000.000	\$15.000.000
1	Gasómetro	\$1.050.000	\$1.050.000
1	Tanque de mezcla 5000 L	\$2.205.000	\$2.205.000
1	Campana	\$650.000	\$650.000
10	Tubería PVC de 4" x m	\$13.700	\$137.000
3	Registros de PVC de 4"	\$85.000	\$255.000
1	Tee de PVC de 4"	\$11.000	\$11.000
3	Codos de PVC de 4"	\$7.000	\$21.000
1	Soldadura para PVC	\$56.300	\$56.300
1	Limpiador para PVC	\$37.900	\$37.900
1	Cinta teflón	\$6.000	\$6.000
5	Manguera de gas 1/2"	\$12.000	\$60.000
2	Registro de gas 1/2"	\$13.000	\$26.000
3	Flanches de 4"	\$25.900	\$77.700
1	Termómetro bimetálico	\$220.000	\$220.000
1	pHmetro	\$229.000	\$229.000
1	Flete	\$5.000.000	\$5.000.000
VALOR TOTAL			\$31.956.900

Fuente: elaboración propia

Los costos de instalación no se tienen en cuenta en el proyecto ya que es necesario un estudio de obras civiles que no están dentro del alcance del proyecto. De acuerdo con la tabla se determinó que los costos de los materiales establecidos en las especificaciones técnicas son de \$31.956.900.

4.2 ANÁLISIS DE OPERACIÓN (OPEX)

Para la realización de este análisis se tuvo en cuenta los costos de la mano de obra, insumos e implementos, agua de proceso y consumo energético.

4.2.1 **Costos directos de operación.** Hacen referencia a todas las materias primas para la producción de biogás a partir de lodos de la PTAR Villas del Nuevo Siglo. Estos incluyen la gallinaza, cal, ácido acético al 3%. El agua no se tiene en cuenta ya que se utiliza agua residual de la planta.

Tabla 21. Costos directos de operación

Costos directos de operación				
Concepto	Unidad	Valor Unitario	Total/Mes	Total/Año
Gallinaza	kg	\$2,800	\$56,000	\$448,000
Cal	kg	\$1,200	\$1,200	\$9,600
Ácido acético 3%	L	\$72,400	\$72,400	\$579,200
Total/año				\$1,036,800

Fuente: elaboración propia

4.2.2 Costos indirectos de operación

En la tabla 22 se observan los costos indirectos de operación que incluyen la energía eléctrica que consumen los equipos para su funcionamiento y para concluir en la tabla 23 se encuentran los costos de mano de obra.

Tabla 22. Costos energéticos

Costos energéticos				
Concepto	Unidad	Valor Unitario	Total/Mes	Total/Año
Bomba hidráulica	kWh	\$441	\$328,837	\$2,630,694
Agitador	kWh		\$61,271	\$490,170
Total/año				\$3,120,864

Fuente: elaboración propia

Tabla 23. Costos de mano de obra

Costo mano de obra operarios		
	Valor/mes	Costo anual
Sueldo	\$828,116	\$9,937,392
Auxilio de transporte	\$97,032	\$1,164,384
Prima	\$77,096	\$925,152
Vacaciones	\$34,505	\$414,060
Cesantías	\$77,096	\$925,152
Interés a las cesantías	\$9,251	\$111,012
Pensiones (AFP)	\$99,374	\$1,192,488
Salud (EPS)	\$70,390	\$844,680
Riesgos laborales (ARL)	\$36,023	\$432,276
Total	\$1,328,883	\$15,946,596
Costo mano de obra ingeniero		
	Valor/mes	Costo anual
Sueldo	\$3,500,000	\$42,000,000
Auxilio de transporte	-	-
Prima	\$291,667	\$3,500,004
Vacaciones	\$145,833	\$1,749,996
Cesantías	\$291,667	\$3,500,004
Interés a las cesantías	\$35,000	\$420,000
Total	\$4,264,167	\$51,170,004

Fuente: elaboración propia

Para establecer los costos indirectos de operación se tuvieron en cuenta los gastos energéticos generados por los equipos necesarios para la operación del proceso; el gasto energético para la bomba que alimentará el digestor y la que conduce el digestato al contenedor es de 746 kWh lo que conlleva un costo de \$ 328.837 mensual; el sistema de agitación para el reactor implica un costo mensual de \$ 61.271, en consecuencia se determinó que los gastos energéticos adicionales de la implementación son de \$ 390.108. Adicionalmente, se generan gastos por operario, ya que es necesario un operario para supervisar el proceso, este genera un costo adicional de \$ 1'328.883; por último, se calcularon los costos de mano de obra del ingeniero para supervisar el correcto funcionamiento de la producción de biogás que son de \$4'264.167.

En conclusión, se obtiene que el total de la estimación de costos de operación para la producción de biogás equivale a \$6'112.758 mensuales y el costo de la inversión es de \$31'956.900.

Para establecer la viabilidad del proyecto financieramente, es necesario realizar un estudio de factibilidad detallado. En este caso se realizó una comparación entre la

energía producida por el biogás obtenido en el proceso (208 kWh) y la energía consumida en el proceso que corresponde a (885 kWh). Por consiguiente, se puede concluir que el proceso no genera la energía suficiente para suplir su requerimiento energético y por esta razón la implementación de este proceso en la PTAR Villas del Nuevo Siglo no es viable energéticamente. Por último, el digestato obtenido del proceso puede ser utilizado luego de un tratamiento para eliminar los remanentes de aluminio mediante una lixiviación ácida, neutralización y secado, dando opción a la obtención de abono orgánico y posterior venta.

5. CONCLUSIONES

- De acuerdo a la caracterización realizada a los lodos producidos en la PTAR Villas del Nuevo Siglo, se concluyó que la relación C/N es de 1765:1, razón por la que no pueden usarse como sustrato sin enriquecimiento nutricional ya que no cumplen el rango de relación C/N establecido como óptima que debe estar entre 20:1 y 30:1, por consiguiente, después de un análisis de materias primas ricas en nitrógeno se decidió realizar una mezcla con gallinaza obteniendo de esta manera los valores de 20:1 y 30:1 .
- Luego de realizar las digestiones se puede concluir que las condiciones de operación que presentaron mejores resultados fueron, un sustrato inicial de relación C/N de 30:1 y un pH de 7,5.
- Según los datos obtenidos para el porcentaje de remoción de DQO (65,55% 54,82%, 68% y 71,5%) y el porcentaje de remoción de sólidos volátiles (64,99%, 55,99%, 69% y 76,23%) por su estrecha relación con la degradación de materia se puede concluir que la elección del reactor tipo batch para este proceso fue acertada ya que estos porcentajes se acercan al rango de porcentaje de remoción teórico (60% - 80%) para este tipo de reactor.
- Con respecto al volumen de biogás obtenido se puede concluir que aunque en general los digestores no mostraron malos resultados, el digestor 2 de la digestión 2 mostró los niveles más altos de producción de biogás y de metano, quedando por debajo solo en un 16,7% de la producción ideal de gas metano a las condiciones de operación establecidas.
- En cuanto a las especificaciones técnicas se puede concluir que el volumen de biogás esperado por cada digestión en el proceso de la PTAR es de 2700,80 L, posteriormente al realizar la conversión a kWh se obtuvo 209 kWh, dado que el requerimiento energético del proceso es de 885 kWh hace energéticamente inviable el desarrollo del proceso de obtención de biogás a partir de lodos residuales.
- En relación con los costos para la implementación del proceso en la PTAR, se realizó un análisis CAPEX y un análisis OPEX, obteniéndose que los costos de inversión se estiman en \$31'956.900 y los costos de operación en \$6'112.758.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un estudio de posibles materias primas con las cuales enriquecer el lodo, ya que el factor de producción de biogás de este es bajo razón por la que la producción de metano es baja.
- Se recomienda realizar el estudio financiero para evaluar la viabilidad económica de la implementación del proceso en la PTAR Villas de Nuevo Siglo.
- Se recomienda realizar una evaluación del proceso, aumentando la temperatura para analizar si es posible mejorar la producción de metano.
- Se recomienda evaluar el proceso de producción de biogás implementando un sistema de recirculación para analizar si es posible mejorar la producción de metano.
- Se recomienda realizar una cromatografía de gases para conocer con exactitud la composición del biogás producido.
- Se recomienda determinar experimentalmente el poder calorífico del biogás para establecer la calidad del metano producido.
- Se recomienda realizar réplicas de la evaluación del proceso para poder hacer un análisis estadístico de resultados.
- Se recomienda determinar la cantidad de CO₂ captado en la solución alcalina en la cuantificación de metano por método volumétrico.

BIBLIOGRAFÍA

AGUILAR, Manuel. Efectos agronómicos de la aplicación de lodos de depuradora compostados en suelo de Olivar. Tesis Doctoral. Córdoba, Argentina: Universidad de Córdoba. 2001. p 5.

AMBIENTUM, Enciclopedia medioambiental. Consultado el 21 de febrero de 2019. p 1, 7. Disponible línea: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/relacion_carbono_nitrogeno.asp

BAUTISTA, Alejandro. Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos. Proyecto de grado. Universidad Carlos III De Madrid Escuela Politécnica Superior. Nicaragua. 2010. p 40.

CHEMETRICS. Disponible en <https://www.chemetrics.com/index.php?route=product/product/download&file=icodspanish.pdf.5f5e7779d53c4dd9d600174dde2f14aa>>. Consultado el 20/03/2019

CHUNGANDRO, Kléber R.; MANITIO, Guido J., Diseño y construcción de un biodigestor para pequeñas y medianas granjas. Escuela Politécnica Nacional. Tesis de grado. Ecuador. 2010. p 4, 22.

CONAGUA. Manual de agua potable, alcantarillados y saneamiento: Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Coyoacán, México, 2010. p 3. ISBN 978-607-8246-90-8.

CORONA, Iván. Biodigestores. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México. 2007. p 12.

DE LUCAS, Ana Isabel; DEL PESO TRONCO, Carlos. Biomasa, biocombustible y sostenibilidad. Ministerio de educación, cultura y deporte del gobierno español. 2012. p 12.

ESPIGARES, M. PEREZ, J A. Aguas residuales. Composición. Curso de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR's). Universidad de Salamanca. España. 2007. p 2.

ESTRADA, Mónica María, Manejo y procesamiento de la gallinaza. Revista Lasallista de investigación [en línea] 2005, 2 (enero-junio): [Fecha de consulta: 30 de febrero de 2019] Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69520108> ISSN 1794-4449.

GRANADOS, Inmaculada Concepción., Generación, Caracterización Y Tratamiento De Lodos De Edar. Universidad de Córdoba. España. 2015. p 11.

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

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

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

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Calidad del agua, muestreo, técnicas generales de muestreo. Colombia. 1995.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Calidad del agua, muestreo, Directrices para la preservación y manejo de las muestras. Colombia. 2004.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 153 p.

INVEVAR. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andrés. MANUAL DE TÉCNICAS ANALÍTICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y CONTAMINANTES MARINOS.

LIMÓN, Juan. Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o recurso?. México. 2013. p 10.

LITUMA, Paula. Biodigestión anaerobia de lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucabamba. Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. México.2010. p 29.

MANOBANDA, Santiago. HERAS. Cuantificación del metano utilizando la técnica de actividad metanogénica específica en lodos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ucabamba. Trabajo de grado Ingeniero Ambiental. Ecuador. Universidad de Cuenca. Facultad de Ciencias Químicas. 2015. p 60.

MÁRQUEZ, Marjorie; MARTÍNEZ, Sergio. Reactores anaerobios de Flujo ascendente (RAFA's o UASB) Antología. Centro Tecnológico Aragón. México. 2011. p 23, 26.

MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. Reino Unido, Elsevier Science Ltda. 2001

MINISTERIO DE ENERGÍA. Manual del biogás. Proyecto CHI/00/G32. Remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables. Chile. 2011. p 29, 41, 42, 43, 46, 47.

MINISTERIO DE ENERGÍAS, Programa de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Global Environment Facility. p 38-40.

MOELLER, Gabriela. Microbiología de lodos activos. IDEAM. Colombia. 2004. p 165, 166, 167.

NAVARRO, Amado. Blog personal. Disponible en <<http://navarrof.orgfree.com/Docencia/Quimica/Auxiliares/Walkley.pdf>>. Consultado el 20/03/2019.

OEFA- Organismo de evaluación y fiscalización ambiental-. Fiscalización ambiental en aguas residuales. 2014. p 2.

OLAYA, Yeison. Fundamentos para el diseño de biodigestores. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Colombia. 2009. p 5, 6, 9, 7, 11.

PÉREZ, Andrea. Actividad metanogénica específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. Revista EIDENAR. Ejemplar 9/Enero-Diciembre 2010. Universidad del Valle. Colombia. p 1.

PROGRAMA APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS URBANOS EN MÉXICO. Guía técnica para el manejo y aprovechamiento de biogás en plantas de tratamiento de aguas residuales. 1er. Edición, 2017. p 47.

ROMÁN, Pilar. MARTÍNEZ, María. Manual de compostaje del agricultor. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Chile. 2013. p 53.

SILVA, Pablo. Evaluación de un digestor para efluentes porcinos con fines de saneamiento y producción de energía. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 1991. p 68.

TERRY, Adis. Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás. Universidad de oriente. Santiago de Cuba, Cuba. 2015. p 5.

UPME. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. Colombia. 2008. p 118, 122.

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

VARNERO, Teresa. Manual del biogás. Santiago de Chile, 2011. p 16. ISBN 978-95-306892-0.

VAZQUES, Franco. Influencia del pH sobre la digestión anaeróbica de biorresiduos de origen municipal. Informe de un grupo científico de la U.D.C.A. Bogotá. 2014. p 135.

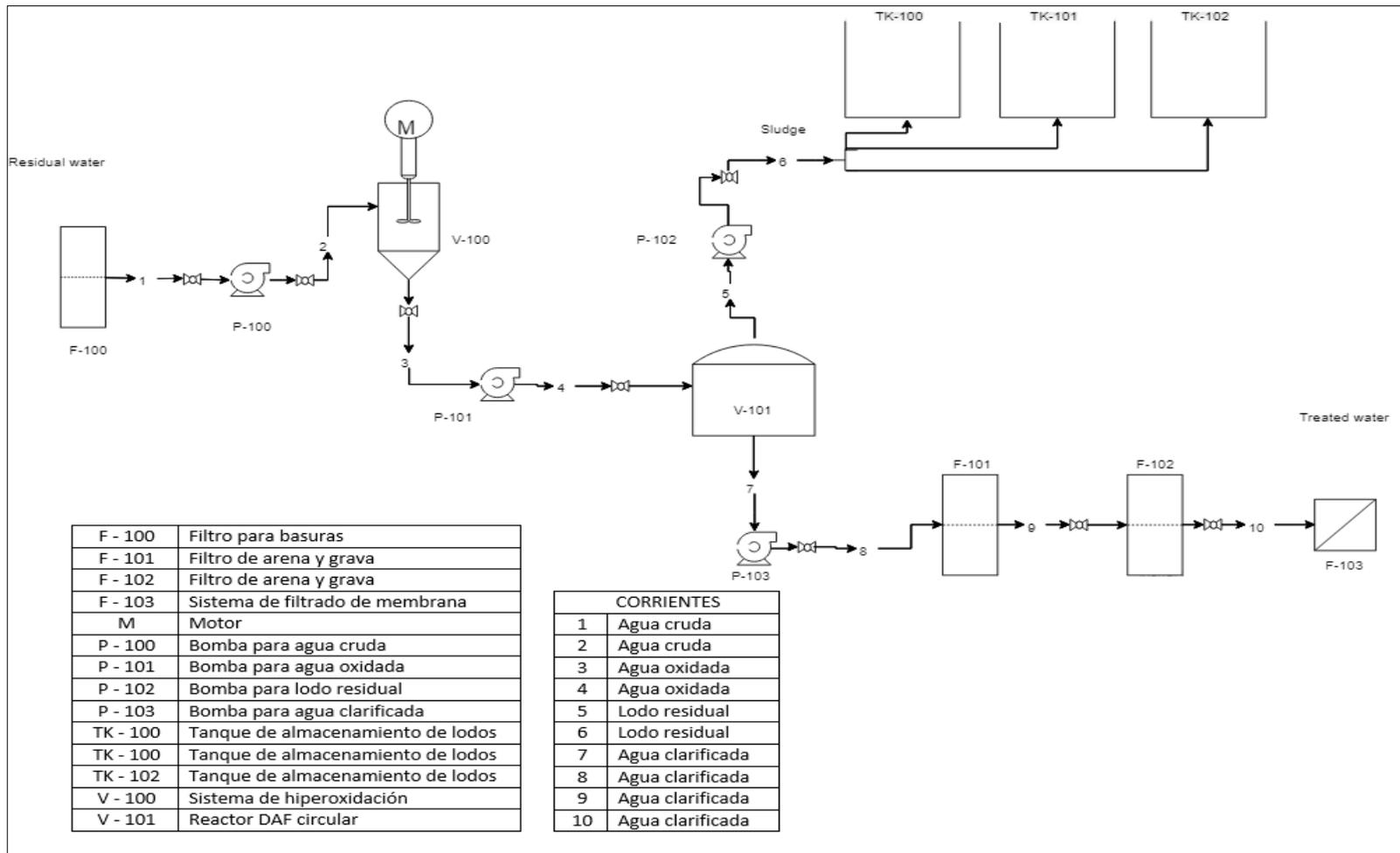
WINKLER, Michael. Tratamiento biológico de aguas de desecho. México D.F. Limusa, 2000.

YANK et al., citado por GARCÉS, Luz.; GUTIERREZ, Paula. Producción de biogás a partir de residuos agrícolas. Proyecto de investigación. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Colombia. 2014. p 13.

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

ANEXOS

**ANEXO A.
DIAGRAMA PFD PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES VILLAS DEL NUEVO SIGLO**



ANEXO B. PROCEDIMIENTO MÉTODO WALKLEY-BLACK Y VALORACIÓN VOLUMÉTRICA

Este método necesita de la dilución de 48.82 de dicromato de potasio en un matraz volumétrico de 1000 ml y luego aforar con agua destilada, la dilución es para evitar interferencias de hierro (Fe_3), también se necesita ácido sulfúrico concentrado y ácido fosfórico concentrado. Un Indicador de difenilamina de los que se disolverán 0,5 g en 20 ml de agua y con 100 ml de ácido sulfúrico concentrado. Además de disolver 278 g de sulfato ferroso 1 M en agua, que ya tiene añadida 80 ml de ácido sulfúrico concentrado.

Lo primero que se necesita hacer del procedimiento es pesar 0.5 g de muestra y pasar por un tamiz de 0.5 mm, luego ponerlo en un Erlenmeyer de 500 ml. Se necesita de igual manera un blanco con reactivos por triplicado. Seguido, adicionar 10 ml de dicromato de potasio 1 N girando el matraz cuidadosamente para que entre en contacto con la muestra. Agregar con cuidado y de una bureta 20 ml de ácido sulfúrico concentrado a la suspensión, no dejar de agitar el Erlenmeyer por un minuto. Se deja reposar por 30 minutos sobre una superficie plana, pero evitando que sean mesas de acero o cemento. Continuo a esto, se añaden 200 ml de agua destilada, 5 ml de ácido fosfórico concentrado y de 5 a 10 gotas de difenilamina, el cual es un indicador. Por último, se titula con la disolución de sulfato ferroso, gota a gota hasta que se obtenga un color verde claro.

Para el cálculo primero se necesita calcular el porcentaje de carbono orgánico.

$$\% \text{Carbono orgánico} = \frac{(B - M) * N * k * k_2}{Pm}$$

Dónde:

- M: Volumen de sulfato ferroso gastado en la titulación de la muestra.
- B: Volumen de sulfato ferroso gastado en la titulación del blanco.
- Pm: Peso de la muestra.
- K: Constante 1. Tasa de mineralización 1-3%.
- K₂: Constante de Walkley Black, 102.

Con la anterior ecuación se calcula el porcentaje de materia orgánica.

$$\% \text{Materia orgánica} = \% \text{C orgánico} * 1.724$$

ANEXO C.
PROCEDIMIENTO MÉTODO KJELDAHL Y VALORACIÓN VOLUMÉTRICA

Primero se selecciona el volumen de muestra de la siguiente:

Nitrógeno orgánico en la muestra mg/L	Volumen de muestra ml
4-40	50.0
8-80	25.0
20-200	10.0
40-400	5.0

Para la muestra de lodos se pesa una porción de muestra húmeda que contenga entre 0.2 y 2 mg de nitrógeno orgánico en un crisol. Se transfiere la muestra al tubo de digestión diluyendo y enjuagando el recipiente de pesaje varias veces con pequeñas cantidades de agua. Que el volumen de agua no exceda los 50 ml.

Para la Digestión, cuidadosamente se agregan 10 ml de reactivo de digestión al balón Kjeldah que contiene la muestra. Luego, se agregan aproximadamente 10 ml de ácido extra. Después, agregar 4 perlas de ebullición para prevenir sacudidas durante la digestión, ajustando cada unidad de calentamiento en el aparato de digestión Kjeldah. Se pone a calentar bajo una campana de extracción o con equipo de remoción de gases y se continúa la ebullición vigorosa hasta que la solución se haga transparente y verde pálido, y se observen copiosos vapores. Por último, calentar al máximo y digerir por 30 minutos adicionales.

Para la Destilación, enfriar y transferir el tubo con la muestra digerida al equipo de destilación, seguido a esto, diluir la muestra digerida con agua destilada hasta aproximadamente 50 ml de volumen total, luego adicionar 50 ml solución de hidróxido de sodio obtener un viraje de color claro a oscuro. Aparte en un erlenmeyer medir entre 50 y 75 ml de solución de ácido bórico y adicionar 2-3 gotas de indicador mixto. Poner el erlenmeyer en el destilador de nitrógeno por debajo del tubo de salida del destilado.

Asegurar que la punta del condensador esté totalmente sumergida dentro del ácido bórico. Después, destilar la muestra hasta obtener un volumen de 150 a 200 ml aproximadamente. La presencia de amoníaco cambia el color de la solución de ácido bórico de azul a verde, cuando se ha empleado el indicador.

La determinación del amoníaco es por importante y se hace por el método acidométrico o titulométrico en la que se ajusta el volumen del destilado a 250 ml y luego se titula el amoníaco en el destilado con el estándar de H₂SO₄ 0.02 N hasta que el indicador cambie a un color lavanda pálido.

$$\frac{mg\ N}{kg} = \frac{(A - B) * 280}{g\ muestra\ seca}$$

Dónde:

A: Volumen de H₂SO₄ 0.02 N gastado en la titulación de la muestra (ml)

B: Volumen de H₂SO₄ 0.02 N gastado en la titulación del blanco (ml)

**ANEXO D.
PROCEDIMIENTO MÉTODO 3050 B DE LA EPA CON ÁCIDO NÍTRICO Y
PERÓXIDO DE HIDROGENO POSTERIOR CUANTIFICACIÓN MEDIANTE
ABSORCIÓN ATÓMICA POR LLAMA**

La digestión de las muestras necesita una alícuota representativa de 1-2 gramos en peso húmedo o 1 gramo peso seco que se digerirán con adiciones repetidas de ácido nítrico (HNO₃) y peróxido de hidrógeno (H₂O₂). Para el análisis de Horno por grafito AA (GFAA) o espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), el digestato resultante se reduce en volumen mientras es calentando o después se diluye hasta un volumen de 100 ml. Para los análisis por Espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES) o absorción atómica de llama (FLAA), se agrega ácido clorhídrico (HCl) al digestor y la muestra se refluye. El digestato puede filtrarse, el papel de filtro y los residuos se enjuagan primero con HCl caliente y luego con agua caliente, esto es opcional. El papel de filtro y el residuo se devuelven al matraz de digestión, reflujados con HCl adicional y luego se filtran otra vez. El digestato se diluye hasta un volumen final de 100 ml. Se secará la alícuota si es necesario, por separado para determinar el porcentaje total de sólidos.

Las técnicas están recomendadas para cada elemento:

FLAA/ICP-ES		GFAA/ICP-MS
Aluminio	Magnesio	Arsénico
Antimonio	Manganeso	Berilio
Bario	Molibdeno	Cadmio
Berilio	Níquel	Cromo
Cadmio	Potasio	Cobalto
Calcio	Plata	Fierro
Cromo	Sodio	Plomo
Cobalto	Talio	Molibdeno
Cobre	Vanadio	Selenio
Fierro	Zinc	Talio
Plomo	Vanadio	

Para el cálculo, las concentraciones determinadas se comunicarán sobre la base del peso real de la muestra. Si se desea un análisis de peso seco también se debe proporcionar el porcentaje de sólidos de la muestra. Y si se desea un porcentaje de sólidos se debe realizar una determinación separada del porcentaje de sólidos en una alícuota homogénea de la muestra.

ANEXO E. PROCEDIMIENTO MÉTODO ASTM D1252/06 MÉTODO B

Para esta prueba lo primero que se requiere es homogeneizar 500 ml de muestra con un mezclador durante 2 minutos. Precalentar el bloque digestor a 150 °C, luego quitar el tapón de un vial de COD. Después, pipetear 2.00 ml de muestra en el vial. El contenido del vial se calentará. Volver a poner el tapón al vial de COD, asegurándolo herméticamente. De inmediato, invertir el vial 10 veces para mezclar bien. Limpiar el vial con una toalla húmeda y ponerlo en el bloque digestor precalentado. Preparar el blanco de reactivo repitiendo los pasos desde el quite del tapón del vial de COD hasta la limpieza del vial. Dejar que los viales se calienten en el bloque digestor a 150°C durante 2 horas. Girar el bloque digestor y deje que los viales permanezcan en la unidad durante 15 a 20 minutos, para enfriarse. Luego, retirar cuidadosamente cada vial del bloque digestor, asegurándose de que el tapón esté bien asegurado. Invertir cada vial varias veces y luego ponerlos en un soporte para que se enfríen a temperatura ambiente. Dejar que pasen al menos 30 minutos para que los viales se enfríen, en oscuridad. Siguiendo a lo anterior, seleccionar la longitud de onda y ajustar a cero el espectrofotómetro.

Rango, mg/L	Longitud de onda	Ecuación de calibración
0-150	420	ppm (mg/L) = (-331)(abs)-0.6
0-1500	620	ppm (mg/L) = (2301)(abs)-3
0-15000	620	ppm(mg/L) = (23010)(abs)-3

Luego, frotar el exterior del vial de blanco de reactivo con un paño hasta que esté limpio y seco. Poner el vial de blanco de reactivo en el compartimiento de muestra del instrumento. Este blanco de reactivo se usa para ajustar a cero al instrumento. Por otro lado, frotar el exterior de un vial de COD de prueba con un paño hasta que esté limpio y seco. Poner el vial en el compartimiento de muestra del instrumento para obtener resultados de prueba. Por último, emplear la ecuación de calibración específica del rango, para convertir los valores de absorbancia en resultados de prueba en mg/l de COD.

CHEMETRICS. Disponible en
<<https://www.chemetrics.com/index.php?route=product/product/download&file=icodspanish.pdf.5f5e7779d53c4dd9d600174dde2f14aa>>. Consultado el 20/03/2019

ANEXO F. PROCEDIMIENTO MÉTODO SM 2540 D. GRAVIMÉTRICO

Para la determinación de sólidos totales, volátiles y fijos, la muestra debe recolectarse en envases de vidrio o plástico de 1 L, refrigerar a 4°C y no dejar pasar 7 días para analizarla.

El método gravimétrico empieza con la preparación de cápsulas, en donde se ponen estas en una mufla a $550 \pm 50^\circ\text{C}$ durante una hora, luego dejar enfriar y pesar antes de usar. Siguiendo a esto, se toma un volumen de muestra homogeneizada de un residuo seco entre 2.5 y 200 mg. Se vierte el volumen medido en la cápsula preparada y evapora con un baño de agua a sequedad. Se debe tener cuidado de no perder muestra por ebullición. Después se pone a secar la muestra en estufa a $103\text{-}105^\circ\text{C}$ durante una hora. Luego, enfriar en desecador y pesar. Se repite el ciclo de secado, enfriado en desecador y pesado hasta que se obtenga un peso constante o que la pérdida de peso sea menor al 4% que el peso previo o menos de 0.5 mg. Como últimos pasos, se calcina la muestra en mufla a $550 \pm 50^\circ\text{C}$ durante una hora. Se enfría de nuevo en desecador y se pesa. El ciclo se repite, hasta que se obtenga un peso constante o que la pérdida de peso sea menor al 4% que el peso previo o menos de 0.5 mg.

$$ST, \frac{mg}{L} = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000}{V}$$

$$STF, \frac{mg}{L} = \frac{(P_3 - P_1) \times 1000}{V}$$

$$STV, \frac{mg}{L} = ST - STF$$

Dónde:

- ST: Sólidos totales en mg/L.
- STF: Sólidos totales fijos en mg/L.
- STV: Sólidos totales volátiles en mg/L.
- P₁: Peso de la cápsula preparada en mg.
- P₂: Peso de la cápsula más el residuo seco a $103\text{-}105^\circ\text{C}$ en mg.
- P₃: Peso de la cápsula más el residuo calcinado a 550°C en mg.
- V: Volumen de muestra tomada en mL.

ANEXO G. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

Termómetro ambiental.

	CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
	Tamaño	Mediano
	Rango de temperatura	+20 a +60°C
	Resolución	2°C
	Tipo de columna	Columna de alcohol rojo
	Tipo de regleta	ABS
	Dimensiones	70x80 mm
	Marca	

Termómetro de punzón.

	CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
	Diámetro de la carátula	2"
	Rango de la temperatura	-40 a +70°C
	Largo del bulbo	5"
	Conexión	Trasera 1/2" NPT
	Ángulo	90°
	Material	Acero inoxidable
	Marca	Tecnik

Manómetro.

	CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
	Referencia	PFP-ZR
	Rango	0 a 30 psi
	Exactitud	2.5": +/- 1.5%
	Conexión	2.5": +/- 1/4" NPT
	Material caja	Acero inoxidable AISI 304
	Material visor	Vidrio
	Material conexión	Acero inoxidable
	Marca	Winters

Cinta medidora de pH.

	CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
	Rango	0.0 a 14.0
	Modo de uso	Manual
	Marca	Universal

pHmetro.

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

**ANEXO H.
MATERIALES PARA MONTAJE DE CUANTIFICACIÓN DE METANO**

CANTIDAD	ELEMENTO	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
2	Jeringas	\$ 700	\$ 1.400
1	Esparadrapo	\$ 7.100	\$ 7.100
4	Difusor de soluciones	\$ 2.000	\$ 8.000
48	Agua destilada L	\$ 2.109	\$ 101.214
1	Soda caustica	\$ 6.000	\$ 6.000
1	Vaso precipitado 1000 ml	\$ 28.000	\$ 28.000
1	Vaso precipitado 500 ml	\$ 6.800	\$ 6.800
1	Probeta 50 ml	\$ 5.000	\$ 5.000
2	Bolsas de suero 1000 ml	\$ 5.300	\$ 10.600
VALOR TOTAL (\$)			\$ 174.114

**ANEXO I.
MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN DE BIODIGESTORES.**

CANTIDAD	ELEMENTO	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
20	Abrazadera Cremallera Inox 7/32" a 4	900	18.000
2	Acople 1/4*1/8	2.500	5.000
2	Acople hembra 1/4*1/4	3.100	6.200
2	Acople macho 3/16*1/8	2.100	4.200
6	Adaptador macho 3/4" PVC	608	3.648
1	Amarres 15 cm	3.300	3.300
2	Balde 5 gal	7.930	15.860
1	Báscula Portable	13.000	13.000
2	Bidón 60 L Hermético	43.250	86.500
8	Chazos 5/16x2	400	3.200
1	Cinta medidora de pH	32.000	32.000
2	Cinta teflón 1/2"x12 m	1.200	2.400
6	Codo 3/4" PVC	800	4.800
10	Cordón x m	500	5.000
2	Cystoflo	8.500	17.000
2	Embudo mediano	24.700	49.400
7	Flanche Tanque 3/4" PVC	6.800	47.600
1	Limpiador PVC 1/128	2.450	2.450
1	Malla x50cm	5.500	5.500
4	Manguera multipropósito 1/4" (metro)	4.200	16.800
2	Manómetro 2" CV 1/4" 30 psi	14.000	28.000
2	Pie de amigo 12x14"	9.900	19.800
1	Pistola para silicona	7.900	7.900
5	Plástico de invernadero x m	3300	16500
2	Pliegos de lija	900	1.800
2	Puntillas	200	400
2	Racor 1/2"	3.500	7.000
20	Racor 1/4"	4.000	80.000
1	Silicona antihongos transparente	7.500	7.500
2	Soldadura PVC 1/128	4.400	8.800
2	Tablas de soporte	40.000	80.000
2	Tapón roscado 3/4" PVC	1.100	2.200
2	Tapón soldado 3/4" PVC	550	1.100
2	Tee 3/4" PVC	1.100	2.200
2	Termómetro de punzón 2"x5" -40 a 7	14.000	28.000
6	Tubo 3/4" PVC x m	2.650	15.900
6	Válvula bola 3/4" PVC	17.350	104.100
4	Válvula bola para gas 1/2" PVC	11.100	44.400
VALOR TOTAL			797.458

ANEXO J. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN LODOS



REPORTE DE RESULTADOS N° 019

Bogotá D.C., septiembre 5 de 2018

Orden N° 020-18

Datos del Cliente

Lina Rocío Baquero Cadena

Identificación de la Muestras

Matriz: Biolodos

Número de Muestras: 1

Lugar de Muestreo: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas Villa del Nuevo Siglo

Fecha de Muestreo: 06/08/2018

Fecha de Recepción de Muestra: 08/08/2018

Fecha de Análisis de Muestra: 17/08/2018 – 04/09/2018

Código de muestra laboratorio	Código de muestra cliente	Humedad, %	Carbón Orgánico CO, %	Nitrógeno Total NT, %	Aluminio Al, mg/g
339	Biolodo 1	17,45	21,18	0,012	106,87

Observaciones:

- El % CO se determinó con el método Walkley-Black y valoración volumétrica.
- El % N se determinó con el método Kjeldahl y valoración volumétrica.
- El aluminio se determinó con el método 3050 B de la EPA con ácido nítrico y peróxido de hidrógeno. La cuantificación fue mediante Absorción Atómica por llama.

Autorizó

Carmen Stella Mosquera V.
Oca. Carmen Stella Mosquera Vivas



PBX: (57 1) 3 53 71 71

info@ecc.edu.co

Cra 19 No. 49 -20 Bogotá D.C. - Colombia

www.ecci.edu.co



Universidad ECCI



@UniversidadECCI



Universidad ECCI

INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR VIGILADA POR EL M.E.N. Resolución No. 13370 de 19 de Agosto de 2014 Otorgada por el M.E.N NIT. 860.401.496-0



ANEXO K. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN GALLINAZA



REPORTE DE RESULTADOS N° 018

Bogotá D.C., septiembre 5 de 2018

Orden N° 020-18

Datos del Cliente

Lina Rocío Baquero Cadena

Identificación de la Muestras

Matriz: Gallinaza

Número de Muestras: 1

Lugar de Muestreo: Plaza de Mercado la Mesa

Fecha de Muestreo: 06/08/2018

Fecha de Recepción de Muestra: 08/08/2018

Fecha de Análisis de Muestra: 17/08/2018 – 04/09/2018

Código de muestra laboratorio	Código de muestra cliente	Humedad, %	Carbón Orgánico CO, %	Nitrógeno Total NT, %
339	Gallinaza1	21,43	18,57	13,67

Observaciones:

- El % CO se determinó con el método Walkley-Black y valoración volumétrica.
- El % N se determinó con el método Kjeldahl y valoración volumétrica.

Autorizó

Carmen Stella Mosquera V.
Cca. Carmen Stella Mosquera Vivas



PBX: (57 1) 3 53 71 71

info@ecc.edu.co

Cra 19 No. 49 -20 Bogotá D.C. - Colombia

www.ecci.edu.co



Universidad ECCI



@UniversidadECCI



Universidad ECCI

INSTITUCIÓN DE EDUCACIÓN SUPERIOR VIGILADA POR EL M.E.N. Resolución No. 13370 de 19 de Agosto de 2014 Otorgada por el M.E.N NIT. 860.401.496-0



ANEXO L. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN MEZCLA LODO-GALLINAZA



INFORME DE RESULTADOS

ÁREA DE ANÁLISIS AMBIENTALES

Informe N°	05467-V1-2018	N° de Laboratorio	AAA-00128-2018		
Información del Cliente					
Remitente	LINA ROCIO BAQUERO CADENA	Responsable	ING. LINA ROCIO BAQUERO		
Propietario	SRA. LINA ROCIO BAQUERO CADENA	Email contacto	lina.baquero@estudiantes.uameric a.edu.co		
Fecha Ingreso	22-08-2018	Fecha Emisión	04-09-2018		
Información de la Muestra enviada por el cliente					
Identificación Suministrada	MEZCLA LG1	Código de Campo	N.S.		
Tipo de Agua	No Especificada	Contrato N°			
Tipo de Muestra	Simple	Condiciones recepción	CONFORME		
ANÁLISIS AREA DE ANÁLISIS AMBIENTALES					
Variable	Expresión/Sigla	Resultados	Unidades	L.C.M.	Extractante/Técnica/Referencia
Demanda Química de Oxígeno (DQO)*	O ₂	13725	mg/L	10 mg/L	Colorimétrico / ASTM D1252:06, Método B
Sólidos Volátiles	SV	8591	mg/L	E.EST	Gravimétrico / SM 2540 D

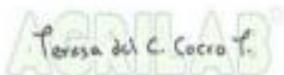
Información de la Muestra enviada por el cliente					
Identificación Suministrada	MEZCLA LG2	Código de Campo	N.S.		
Tipo de Agua	No Especificada	Contrato N°			
Tipo de Muestra	Simple	Condiciones recepción	CONFORME		
ANÁLISIS AREA DE ANÁLISIS AMBIENTALES					
Variable	Expresión/Sigla	Resultados	Unidades	L.C.M.	Extractante/Técnica/Referencia
Demanda Química de Oxígeno (DQO)*	O ₂	14943	mg/L	10 mg/L	Colorimétrico / ASTM D1252:06, Método B
Sólidos Volátiles	SV	9428	mg/L	E.EST	Gravimétrico / SM 2540 D

Observaciones a los resultados:	Convenciones:
	Variable (*): Variable ACREDITADA / E.EST.: En Estimación / L.C.M.: Límite de Cuantificación del Método / N.R. No registra / N.A. No Aplica / Sln. Solución / N.S. No Suministrada / N.D.No Detectado M.I. Muestra Insuficiente / EAA Espectroscopia de Absorción Atómica / EAA Espectroscopia de Emisión Atómica

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 si está 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 la idoneidad y representatividad de la muestra analizada y por ende de sus resultados, es responsabilidad del remitente de la misma.
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 y aceptado por el cliente.
7. La verificación de resultados mediante ensayos de laboratorio, se realizará máximo 15 días hábiles luego de emitido el presente informe de resultados, siempre y cuando las condiciones de estabilidad del análisis en la muestra permitan su reproducibilidad.
8. Los valores de los Niveles Medios corresponden a los reportados en las siguientes referencias: "Fertilización de cultivos en clima frío (1998), Fertilización de cultivos en clima medio (1995) y Fertilización de cultivos en clima cálido, editados por Guerrero R. y publicados por Monómeros Colombo Venezolanos S.A." Su interpretación y aplicación es responsabilidad del profesional de campo responsable de la muestra.
9. En Agrilab estamos interesados en la satisfacción de nuestros clientes. Para conocer sus Peticiones, Quejas, Reclamos o Sugerencias (PQRS) sobre los resultados emitidos y/o los servicios prestados, 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.

Autorizado por:

 **Teresa del C. Cocco T.**

Teresa Cocco
Subgerencia Técnica - Química - PQ 2155

Revisado por:

 **Paola Díaz**

Paola Díaz
Coordinador de Área-Química-PQ 3257

---Fin del informe---

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA E INDUSTRIAL
Calle 79B N° 70-16 Bogotá, D.C. PBX: 7454897 / 223 1999
Para Peticiones, Quejas, Reclamos y/o Sugerencias comuníquese al E-mail:
servicioalcliente@agrilab.com.co <<mailto:servicioalcliente@agrilab.com.co>>
www.agrilab.com.co

ANEXO M. PROCEDIMIENTO ENSAMBLAJE DIGESTORES

Para el procedimiento se emplearon instrumentos detallados en el Anexo H.

- Primero se perforaron los dos bidones de polietileno de 60 L herméticos con tres orificios con diámetro de $\frac{3}{4}$ " a los costados para la entrada (2 agujeros) y salida (1 agujero) del lodo. La tapa del bidón también contaba con un orificio para la salida del biogás.
- Antes de situar la tubería, se instalaron flanches en cada agujero para evitar que hubiera escapes de lodo. Estos flanches también permitieron asegurar la tubería a los bidones.
- Luego, se cortó la tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ " a distintas longitudes como muestra el Plano del prototipo. Se lijaron, limpiaron y se empleó pegamento para PVC, así se unieron a los conectores tipo hembra. A esta tubería también se acoplaron codos de 90° y válvulas con las que se controlaba la entrada y salida de lodo a los bidones. Los agujeros de los tubos se sellaron con silicona fría.
- Se emplearon dos tanques de alimentación al que se le realizaron un agujero al fondo y se conectaron a los bidones. NOTA: Estos tanques se retiraban porque el toldo no cerraba y se ponían cuando se necesitaban.
- Después se empleó un embudo como campana del reactor, por lo que se adecuó en la tapa del bidón con una arandela y silicona fría.
- Se cortó y conectó una manguera para el gas, la conexión con el tanque tenía una arandela grande y silicona fría y la conexión con la manguera para el gas estaba conectada con un racor macho a un racor hembra, y para asegurar se empleó una abrazadera.
- La manguera va conectada a una tee que por un lado tiene un manómetro y, por otro lado, se divide en dos partes, a una válvula de escape y otra al cistoflo.
- Para el termómetro bimetálico se realizó un agujero con una puntilla y se aseguró con una arandela y silicona fría.

ANEXO N.
REGISTRO DE TEMPERATURA AMBIENTE, EXTERNA E INTERNA
DIGESTIÓN 1

Digestión 1					
pH inicial = 6.5				Relación C/N	
Día	Hora	Tamb (°C)	Texterna (°C)	Tinterna (°C)	Tinterna (°C)
1	02:00 a.m.	18	21	26	25
	08:00 a.m.	18	26	27	28
	02:00 p.m.	27	42	28	29
	06:00 p.m.	20	26	28	29
2	02:00 a.m.	16	20	25	26
	08:00 a.m.	18	23	27	27
	02:00 p.m.	29	34	27	28
	06:00 p.m.	20	28	30	30
3	02:00 a.m.	16	20	24	23
	08:00 a.m.	18	23	26	26
	02:00 p.m.	31	44	31	31
	06:00 p.m.	22	29	32	33
4	02:00 a.m.	17	19	26	26
	08:00 a.m.	20	20	24	24
	02:00 p.m.	29	41	30	30
	06:00 p.m.	22	27	32	33
5	02:00 a.m.	19	19	26	25
	08:00 a.m.	19	22	26	26
	02:00 p.m.	28	30	29	29
	06:00 p.m.	24	28	34	34
6	02:00 a.m.	16	19	25	23
	08:00 a.m.	17	20	24	24
	02:00 p.m.	31	44	28	28
	06:00 p.m.	20	30	32	34
7	02:00 a.m.	17	20	25	26
	08:00 a.m.	19	23	25	25
	02:00 p.m.	27	42	28	28
	06:00 p.m.	21	30	34	34
8	02:00 a.m.	17	21	24	25
	08:00 a.m.	18	29	25	25
	02:00 p.m.	30	34	27	27
	06:00 p.m.	22	26	30	30
9	02:00 a.m.	16	23	25	26
	08:00 a.m.	18	26	25	25
	02:00 p.m.	28	31	26	26
	06:00 p.m.	24	26	29	30
10	02:00 a.m.	17	19	25	24
	08:00 a.m.	18	20	24	24
	02:00 p.m.	29	36	26	28
	06:00 p.m.	27	30	28	28

Digestión 1					
pH inicial = 6.5				Relación C/N	
				20:1	30:1
Día	Hora	Tamb (°C)	Texterna (°C)	Tinterna (°C)	Tinterna (°C)
11	02:00 a.m.	20	23	23	25
	08:00 a.m.	18	23	23	24
	02:00 p.m.	26	28	27	27
	06:00 p.m.	24	26	30	30
12	02:00 a.m.	18	19	26	25
	08:00 a.m.	20	20	26	26
	02:00 p.m.	23	20	26	28
	06:00 p.m.	21	32	33	34
13	02:00 a.m.	16	19	25	25
	08:00 a.m.	20	24	28	28
	02:00 p.m.	23	26	27	28
	06:00 p.m.	21	25	30	30
14	02:00 a.m.	17	21	25	25
	08:00 a.m.	18	22	25	25
	02:00 p.m.	24	25	28	28
	06:00 p.m.	26	23	30	30
15	02:00 a.m.	20	19	26	26
	08:00 a.m.	20	22	24	24
	02:00 p.m.	23	26	24	24
	06:00 p.m.	20	20	26	27
16	02:00 a.m.	17	20	24	24
	08:00 a.m.	21	21	24	24
	02:00 p.m.	30	48	27	28
	06:00 p.m.	28	23	30	30
17	02:00 a.m.	16	20	25	25
	08:00 a.m.	19	22	25	25
	02:00 p.m.	26	30	29	29
	06:00 p.m.	21	26	30	30
18	02:00 a.m.	17	20	26	26
	08:00 a.m.	18	23	27	27
	02:00 p.m.	32	42	28	30
	06:00 p.m.	20	23	30	30
19	02:00 a.m.	18	19	23	24
	08:00 a.m.	19	20	24	24
	02:00 p.m.	28	31	32	33
	06:00 p.m.	21	26	28	28
20	02:00 a.m.	17	20	25	26
	08:00 a.m.	20	26	24	24
	02:00 p.m.	26	25	28	28
	06:00 p.m.	23	26	32	33

Digestión 1					
pH inicial = 6.5				Relación C/N	
				20:1	30:1
Día	Hora	Tamb (°C)	Texterna (°C)	Tinterna (°C)	Tinterna (°C)
21	02:00 a.m.	16	19	26	25
	08:00 a.m.	18	20	24	24
	02:00 p.m.	34	32	34	34
	06:00 p.m.	21	28	30	31
22	02:00 a.m.	17	19	26	25
	08:00 a.m.	19	20	24	24
	02:00 p.m.	31	39	28	28
	06:00 p.m.	26	26	30	30
23	02:00 a.m.	17	20	26	26
	08:00 a.m.	18	24	25	26
	02:00 p.m.	28	32	30	30
	06:00 p.m.	21	26	30	31
24	02:00 a.m.	19	21	24	26
	08:00 a.m.	19	26	25	26
	02:00 p.m.	31	44	30	30
	06:00 p.m.	20	28	34	36
25	02:00 a.m.	16	19	25	23
	08:00 a.m.	22	20	24	24
	02:00 p.m.	30	42	28	30
	06:00 p.m.	23	26	30	30
26	02:00 a.m.	17	20	25	25
	08:00 a.m.	19	24	26	26
	02:00 p.m.	27	34	27	27
	06:00 p.m.	20	25	31	32
27	02:00 a.m.	17	21	26	24
	08:00 a.m.	18	23	27	27
	02:00 p.m.	32	42	30	31
	06:00 p.m.	22	22	30	30
28	02:00 a.m.	17	19	24	26
	08:00 a.m.	20	22	26	28
	02:00 p.m.	31	46	30	30
	06:00 p.m.	21	32	32	33
29	02:00 a.m.	18	20	25	26
	08:00 a.m.	19	23	27	27
	02:00 p.m.	28	22	28	28
	06:00 p.m.	20	24	29	29
30	02:00 a.m.	17	21	26	24
	08:00 a.m.	18	23	25	25
	02:00 p.m.	29	27	29	29
	06:00 p.m.	24	22	26	26

Digestión 1					
pH inicial = 6.5				Relación C/N	
				20:1	30:1
Día	Hora	Tamb (°C)	Texterna (°C)	Tinterna (°C)	Tinterna (°C)
31	02:00 a.m.	16	19	26	23
	08:00 a.m.	18	21	24	24
	02:00 p.m.	32	44	26	26
	06:00 p.m.	21	21	27	28
32	02:00 a.m.	20	24	26	25
	08:00 a.m.	17	23	22	22
	02:00 p.m.	28	41	26	27
	06:00 p.m.	24	28	30	30
33	02:00 a.m.	16	19	23	25
	08:00 a.m.	18	22	25	26
	02:00 p.m.	29	32	27	28
	06:00 p.m.	21	25	27	27
34	02:00 a.m.	17	21	25	24
	08:00 a.m.	19	23	24	24
	02:00 p.m.	32	39	26	26
	06:00 p.m.	26	24	28	29
35	02:00 a.m.	16	19	26	25
	08:00 a.m.	17	20	24	24
	02:00 p.m.	26	34	28	28
	06:00 p.m.	23	32	32	32
36	02:00 a.m.	16	20	25	24
	08:00 a.m.	17	23	26	26
	02:00 p.m.	28	35	30	30
	06:00 p.m.	20	25	32	32

**ANEXO O.
REGISTRO DE TEMPERATURA AMBIENTE, EXTERNA E INTERNA
DIGESTIÓN 2**

Digestión 2					
pH inicial = 7.5				Relación C/N	
Día	Hora	Tamb (°C)	Texterna (°C)	Tinterna (°C) 20:1	Tinterna (°C) 30:1
1	02:00 a.m.	18	20	24	24
	08:00 a.m.	19	23	27	27
	02:00 p.m.	21	34	33	29
	06:00 p.m.	21	31	28	30
2	02:00 a.m.	17	20	25	24
	08:00 a.m.	19	22	25	25
	02:00 p.m.	22	38	28	28
	06:00 p.m.	19	34	28	28
3	02:00 a.m.	16	19	24	25
	08:00 a.m.	20	26	24	26
	02:00 p.m.	22	32	29	29
	06:00 p.m.	20	28	29	29
4	02:00 a.m.	17	19	24	24
	08:00 a.m.	18	22	26	26
	02:00 p.m.	21	32	28	28
	06:00 p.m.	19	26	29	29
5	02:00 a.m.	18	20	26	25
	08:00 a.m.	18	22	25	25
	02:00 p.m.	23	36	30	30
	06:00 p.m.	20	25	31	30
6	02:00 a.m.	16	19	25	26
	08:00 a.m.	17	23	26	26
	02:00 p.m.	20	26	28	28
	06:00 p.m.	21	24	30	30
7	02:00 a.m.	17	19	24	25
	08:00 a.m.	18	23	26	26
	02:00 p.m.	23	32	30	30
	06:00 p.m.	21	28	32	32
8	02:00 a.m.	19	21	27	25
	08:00 a.m.	19	20	24	25
	02:00 p.m.	24	29	32	27
	06:00 p.m.	21	27	28	30
9	02:00 a.m.	17	23	26	24
	08:00 a.m.	19	25	25	25
	02:00 p.m.	23	30	31	28
	06:00 p.m.	21	27	29	28
10	02:00 a.m.	18	20	24	24
	08:00 a.m.	20	23	26	27
	02:00 p.m.	23	30	31	31
	06:00 p.m.	20	26	28	28

Digestión 2					
pH inicial = 7.5				Relación C/N	
				20:1	30:1
Día	Hora	Tamb (°C)	Texterna (°C)	Tinterna (°C)	Tinterna (°C)
11	02:00 a.m.	16	21	24	26
	08:00 a.m.	18	24	24	26
	02:00 p.m.	23	30	26	28
	06:00 p.m.	21	27	27	28
12	02:00 a.m.	17	20	25	25
	08:00 a.m.	19	24	27	28
	02:00 p.m.	24	30	33	34
	06:00 p.m.	20	25	28	26
13	02:00 a.m.	19	19	25	24
	08:00 a.m.	19	20	25	25
	02:00 p.m.	24	30	34	32
	06:00 p.m.	21	26	31	26
14	02:00 a.m.	17	20	25	24
	08:00 a.m.	19	21	26	25
	02:00 p.m.	26	42	26	29
	06:00 p.m.	24	34	30	30
15	02:00 a.m.	16	19	26	25
	08:00 a.m.	17	22	25	26
	02:00 p.m.	23	34	26	28
	06:00 p.m.	21	28	31	30
16	02:00 a.m.	17	20	24	27
	08:00 a.m.	21	26	27	26
	02:00 p.m.	24	32	28	28
	06:00 p.m.	21	29	32	30
17	02:00 a.m.	16	19	24	25
	08:00 a.m.	19	24	26	26
	02:00 p.m.	24	31	27	28
	06:00 p.m.	22	27	30	30
18	02:00 a.m.	18	19	24	24
	08:00 a.m.	18	22	25	28
	02:00 p.m.	32	35	34	27
	06:00 p.m.	27	33	34	28
19	02:00 a.m.	17	20	24	25
	08:00 a.m.	19	24	26	27
	02:00 p.m.	23	31	35	32
	06:00 p.m.	22	27	30	31
20	02:00 a.m.	19	20	25	25
	08:00 a.m.	20	22	24	25
	02:00 p.m.	26	31	30	30
	06:00 p.m.	22	28	32	28

Digestión 2					
pH inicial = 7.5				Relación C/N	
				20:1	30:1
Día	Hora	Tamb (°C)	Texterna (°C)	Tinterna (°C)	Tinterna (°C)
21	02:00 a.m.	18	20	26	24
	08:00 a.m.	20	24	26	26
	02:00 p.m.	29	31	29	31
	06:00 p.m.	23	26	28	28
22	02:00 a.m.	17	19	24	24
	08:00 a.m.	21	24	25	26
	02:00 p.m.	30	35	26	32
	06:00 p.m.	20	24	27	27
23	02:00 a.m.	16	19	26	25
	08:00 a.m.	20	22	29	25
	02:00 p.m.	30	45	28	30
	06:00 p.m.	22	27	30	30
24	02:00 a.m.	17	20	24	24
	08:00 a.m.	20	22	24	25
	02:00 p.m.	28	44	29	29
	06:00 p.m.	23	27	31	31
25	02:00 a.m.	19	20	25	25
	08:00 a.m.	20	23	27	26
	02:00 p.m.	29	44	32	32
	06:00 p.m.	20	29	31	30
26	02:00 a.m.	17	19	24	25
	08:00 a.m.	19	24	28	26
	02:00 p.m.	30	32	28	28
	06:00 p.m.	22	27	32	32
27	02:00 a.m.	16	19	24	24
	08:00 a.m.	21	24	29	27
	02:00 p.m.	32	45	31	31
	06:00 p.m.	24	34	34	34
28	02:00 a.m.	17	20	25	26
	08:00 a.m.	21	23	26	28
	02:00 p.m.	34	40	32	32
	06:00 p.m.	26	35	32	32
29	02:00 a.m.	16	18	26	25
	08:00 a.m.	20	24	27	27
	02:00 p.m.	28	34	31	31
	06:00 p.m.	24	32	30	30
30	02:00 a.m.	17	21	24	24
	08:00 a.m.	20	26	26	26
	02:00 p.m.	27	31	32	28
	06:00 p.m.	24	26	34	28

Digestión 2					
pH inicial = 7.5				Relación C/N	
				20:1	30:1
Día	Hora	Tamb (°C)	Texterna (°C)	Tinterna (°C)	Tinterna (°C)
31	02:00 a.m.	19	19	24	25
	08:00 a.m.	24	27	27	27
	02:00 p.m.	34	40	31	31
	06:00 p.m.	26	32	32	32
32	02:00 a.m.	17	19	25	26
	08:00 a.m.	21	24	26	26
	02:00 p.m.	29	33	31	32
	06:00 p.m.	22	24	33	32
33	02:00 a.m.	16	18	24	24
	08:00 a.m.	22	25	28	26
	02:00 p.m.	33	40	28	30
	06:00 p.m.	24	34	30	31
34	02:00 a.m.	17	21	25	26
	08:00 a.m.	20	24	26	26
	02:00 p.m.	30	36	28	28
	06:00 p.m.	23	31	29	30
35	02:00 a.m.	18	20	26	25
	08:00 a.m.	19	21	24	25
	02:00 p.m.	27	32	27	26
	06:00 p.m.	24	28	29	29
36	02:00 a.m.	17	19	23	24
	08:00 a.m.	20	24	25	25
	02:00 p.m.	28	33	28	29
	06:00 p.m.	25	28	30	30

**ANEXO P.
REGISTRO DE PH DIGESTIÓN 1**

Digestión 1		
Día	Digestor 1	Digestor 2
1	6,5	6,5
3	6,7	6,8
5	6,9	7,2
7	7,1	6,9
9	6,9	6,9
11	6,8	6,8
13	6,9	6,3
15	6,7	6,3
17	6,5	6,5
19	6,4	6,7
21	6,4	6,7
23	6,5	6,8
25	6,7	6,8
27	6,8	6,9
29	6,7	7
31	6,9	7
33	7	7,2
35	7,1	7,2
36	7,1	7,3

**ANEXO Q.
REGISTRO DE PH DIGESTIÓN 2**

Digestión 2		
Día	Digestor 1	Digestor 2
1	7,5	7,5
3	7,4	7,2
5	7,3	7
7	7,1	6,9
9	6,9	6,8
11	6,9	6,5
13	6,9	6,4
15	6,6	6,4
17	6,1	6,6
19	6,1	6,8
21	6,2	6,8
23	6,4	6,9
25	6,5	7
27	6,7	7,1
29	6,6	7
31	7	7
33	6,9	7,2
35	6,7	7,2
36	6,8	7,3

ANEXO R. RESULTADOS DQO Y SÓLIDOS VOLÁTILES DIGESTATO



INFORME DE RESULTADOS

ÁREA DE ANÁLISIS AMBIENTALES

Informe N°	08452-V1-2018	N° de Laboratorio	AAA-00159-2018		
Información del Cliente					
Remitente	LINA ROCIO BAQUERO CADENA	Responsable	ING. LINA ROCIO BAQUERO		
Propietario	SRA. LINA ROCIO BAQUERO CADENA	Email contacto	lina.baquero@estudiantes.uameric.a.edu.co		
Fecha Ingreso	25-10-2018	Fecha Emisión	07-11-2018		
Información de la Muestra enviada por el cliente					
Identificación Suministrada	DIGESTION 1 REACTOR 1	Código de Campo	N.S.		
Tipo de Agua	No Especificada	Contrato N°			
Tipo de Muestra	Simple	Condiciones recepción	CONFORME		
ANÁLISIS AREA DE ANÁLISIS AMBIENTALES					
Variable	Expresión/Sigla	Resultados	Unidades	L.C.M.	Extractante/Técnica/Referencia
Sólidos Volátiles	SV	3007	mg/L	E.EST	Gravimétrico / 8M 2540 D
Demanda Química de Oxígeno (DQO)*	O ₂	4728	mg/L	10 mg/L	Colorimétrico / ASTM D1252/06, Método B

Información de la Muestra enviada por el cliente					
Identificación Suministrada	DIGESTION 1 REACTOR 2	Código de Campo	N.S.		
Tipo de Agua	No Especificada	Contrato N°			
Tipo de Muestra	Simple	Condiciones recepción	CONFORME		
ANÁLISIS AREA DE ANÁLISIS AMBIENTALES					
Variable	Expresión/Sigla	Resultados	Unidades	L.C.M.	Extractante/Técnica/Referencia
Sólidos Volátiles	SV	4149	mg/L	E.EST	Gravimétrico / 8M 2540 D
Demanda Química de Oxígeno (DQO)*	O ₂	6750	mg/L	10 mg/L	Colorimétrico / ASTM D1252/06, Método B

Observaciones a los resultados:	Convenciones:
	Variable (*): Variable ACREDITADA / E.EST.: En Estimación / L.C.M.: Límite de Cuantificación del Método / N.R. No registra / N.A. No Aplica / Sin. Solución / N.S. No Suministrada / N.D.No Detectado M.I. Muestra Insuficiente / EAA Espectroscopía de Absorción Atómica / EAA Espectroscopía de Emisión Atómica

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 si está 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 la idoneidad y representatividad de la muestra analizada y por ende de sus resultados, es responsabilidad del remitente de la misma.
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 y aceptado por el cliente.
7. La verificación de resultados mediante ensayos de laboratorio, se realizará máximo 15 días hábiles luego de emitido el presente informe de resultados, siempre y cuando las condiciones de estabilidad del análisis en la muestra permitan su reproducibilidad.
8. Los valores de los Niveles Medios corresponden a los reportados en las siguientes referencias: "Fertilización de cultivos en clima frío (1998), Fertilización de cultivos en clima medio (1998) y Fertilización de cultivos en clima cálido, editados por Quemero R. y publicados por Monómeros Colombo Venezolano S.A." Su interpretación y aplicación es responsabilidad del profesional de campo responsable de la muestra.
9. En Agrilab estamos interesados en la satisfacción de nuestros clientes. Para conocer sus Peticiones, Quejas, Reclamos o Sugerencias (PQRIS) sobre los resultados emitidos y/o los servicios prestados, 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.

Autorizado por:

Teresa Cocco
Subgerencia Técnica - Química - PQ 2155

Revisado por:

Paola Díaz
Coordinador de Area-Química-PQ 3257

---Fin del Informe---

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA E INDUSTRIAL
Calle 798 N° 70-16 Bogotá, D.C. PBX: 7454697 / 223 1999
Para Peticiones, Quejas, Reclamos y/o Sugerencias comuníquese al E-mail:
servicioalcliente@agrilab.com.co <mailto:servicioalcliente@agrilab.com.co>
www.agrilab.com.co

Informe N°	08576-V1-2019	N° de Laboratorio	AAA-00173-2019		
Información del Cliente					
Remitente	LINA ROCIO BAQUERO CADENA	Responsable	ING. LINA ROCIO BAQUERO		
Propietario	SRA. LINA ROCIO BAQUERO CADENA	Email contacto	lina.baquero@estudiantes.uameric s.edu.co		
Fecha Ingreso	07-03-2019	Fecha Emisión	18-03-2019		
Información de la Muestra enviada por el cliente					
Identificación Suministrada	DIGESTION 2 REACTOR 1	Código de Campo	N.S.		
Tipo de Agua	No Especificada	Contrato N°			
Tipo de Muestra	Simple	Condiciones recepción	CONFORME		
ANÁLISIS AREA DE ANÁLISIS AMBIENTALES					
Variable	Expresión/Sigla	Resultados	Unidades	L.C.M.	Extractante/Técnica/Referencia
Sólidos Volátiles	SV	2663	mg/L	E.EST	Gravimétrico / 8M 2540 D
Demanda Química de Oxígeno (DQO)*	O ₂	4392	mg/L	10 mg/L	Colorimétrico / ASTM D1252/06, Método B

Información de la Muestra enviada por el cliente					
Identificación Suministrada	DIGESTION 2 REACTOR 2	Código de Campo	N.S.		
Tipo de Agua	No Especificada	Contrato N°			
Tipo de Muestra	Simple	Condiciones recepción	CONFORME		
ANÁLISIS AREA DE ANÁLISIS AMBIENTALES					
Variable	Expresión/Sigla	Resultados	Unidades	L.C.M.	Extractante/Técnica/Referencia
Sólidos Volátiles	SV	2241	mg/L	E.EST	Gravimétrico / 8M 2540 D
Demanda Química de Oxígeno (DQO)*	O ₂	4258	mg/L	10 mg/L	Colorimétrico / ASTM D1252/06, Método B

Observaciones a los resultados:	Convenciones:
	Variable (*): Variable ACREDITADA / E.EST.: En Estimación / L.C.M.: Límite de Cuantificación del Método / N.R. No registra / N.A. No Aplica / Sin. Solución / N.S. No Suministrada / N.D.No Detectado M.I. Muestra Insuficiente / EAA Espectroscopía de Absorción Atómica / EAA Espectroscopía de Emisión Atómica

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 si está 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 la idoneidad y representatividad de la muestra analizada y por ende de sus resultados, es responsabilidad del remitente de la misma.
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 controlado por el laboratorio y aceptado por el cliente.
7. La verificación de resultados mediante ensayos de laboratorio, se realizará máximo 15 días hábiles luego de emitido el presente informe de resultados, siempre y cuando las condiciones de estabilidad del análisis en la muestra permitan su reproducibilidad.
8. Los valores de los Niveles Medios corresponden a los reportados en las siguientes referencias: "Fertilización de cultivos en clima frío (1998), Fertilización de cultivos en clima medio (1995) y Fertilización de cultivos en clima cálido, editados por Guernio R. y publicados por Monómeros Colombo Venezolano S.A." Su interpretación y aplicación es responsabilidad del profesional de campo responsable de la muestra.
9. En Agrilab estamos interesados en la satisfacción de nuestros clientes. Para conocer sus Peticiones, Quejas, Reclamos o Sugerencias (PQRS) sobre los resultados emitidos y/o los servicios prestados, 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.

Autorizado por:

Teresa Cocco
Subgerencia Técnica - Química - PQ 2155

Revisado por:

Paola Díaz
Coordinador de Área-Química-PQ 3257

---Fin del informe---

CIENCIA Y TECNOLOGÍA AL SERVICIO DEL SECTOR AGRÍCOLA E INDUSTRIAL
Calle 798 N° 70-16 Bogotá, D.C. PBX: 7454697 / 223 1999
Para Peticiones, Quejas, Reclamos y/o Sugerencias comuníquese al E-mail:
servicioalcliente@agrilab.com.co <<mailto:servicioalcliente@agrilab.com.co>>
www.agrilab.com.co

**ANEXO S.
MONITOREO DE CUANTIFICACIÓN**

Digestión 1				
Día	Digestor 1		Digestor 2	
	Volumen (ml)	Volumen acumulado (ml)	Volumen (ml)	Volumen acumulado (ml)
2	32	32	16	16
4	160	192	96	112
6	256	448	240	352
8	208	656	560	912
10	80	736	576	1488
12	368	1104	493	1981
14	320	1424	608	2589
16	503	1927	524	3113
18	224	2151	636	3749
20	608	2759	656	4405
22	637	3396	735	5140
24	976	4372	974	6114
26	592	4964	978	7092
28	764	5728	640	7732
30	384	6112	637	8369
32	352	6464	544	8913
34	816	7280	768	9681
36	864	8144	656	10337

Digestión 2				
Día	Digestor 1		Digestor 2	
	Volumen (ml)	Volumen acumulado (ml)	Volumen (ml)	Volumen acumulado (ml)
2	32	32	15	15
4	80	112	195	210
6	144	256	315	525
8	160	416	555	1080
10	240	656	585	1665
12	400	1056	497	2162
14	288	1344	630	2792
16	368	1712	692	3484
18	544	2256	585	4069
20	496	2752	840	4909
22	736	3488	795	5704
24	816	4304	810	6514
26	688	4992	480	6994
28	400	5392	634	7628
30	320	5712	637	8265
32	992	6704	675	8940
34	752	7456	840	9780
36	816	8272	765	10545