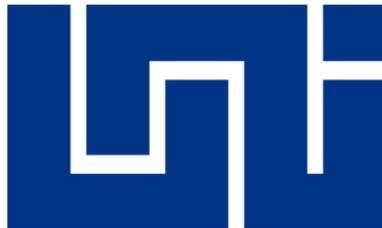


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO PARA LA
OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE EXCRETAS DE GANADO PORCINO EN LA
EMPRESA “PORQUERIZA GONZÁLEZ,” SAN PATRICIO, CHONTALES.**

TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:

**Br. Tamara Isabel González Pérez
Br. Tania Elieth Sánchez Ruiz**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

TUTOR:

MSc. María Esther Baltodano Pilarte

Managua-Nicaragua.
Diciembre, 2023

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra gratitud a Dios, porque sin el nada de esto sería posible, su infinita misericordia nos ha acompañado siempre, ha sido nuestro guía, protector y proveedor, agradecemos a la MSc. María Esther Baltodano y al MSc. Rolando Guevara por ser un gran apoyo en el desarrollo de esta tesis, por el tiempo dispuesto y la enseñanza brindada por su larga experiencia profesional.

A nuestros padres por sus sacrificios que hicieron para brindarnos estudios, velar por nuestra salud y estar al pendiente en lo que hemos necesitado al Sr. Félix González Romero, propietario de Porqueriza González por abrirnos las puertas de su empresa para el desarrollo de esta investigación.

Agradecemos al Ing. Jarwin García, por su gran apoyo y colaboración en nuestra investigación, a Lenin y Olga González por permitirnos asistir a su porqueriza para apoyar nuestro estudio, familiares y amigos.

Tamara González

Tania Sánchez Ruiz

DEDICATORIA

El presente trabajo lo dedico a la memoria de mi abuelo José Antonio Pérez, quien en vida siempre me ayudo para que culminará mis estudios y sé que hoy estaría feliz y orgulloso de verme cumplir este gran logro; a mi madre Mayra Isabel Pérez, que siempre me ha apoyado y ha estado en cada momento de mi vida, celebrando mis logros y acompañándome en mis fracasos, brindándome de su sabiduría para no rendirme y poder llegar a la meta, y a mi tío Odanin Antonio Pérez que también me brindó su apoyo durante mi período de estudiante.

Tamara González

Dedico esta tesis principalmente a mi esposo el Ing. Jarwin Javier García quien me ha impulsado a culminar este paso en mi carrera, a mi mamá Milagros del Carmen Ruiz, mi papá Julio Cesar Sánchez y mis hermanos que siempre han creído en mí, aportando un granito de arena todos y cada uno de ellos, dándome ánimos cuando parecía que no iba a poder lograrlo por las circunstancias que aparecían, por regalarme su sabiduría, amor, paciencia y sobre todo por las veces que quise rendirme y ellos fueron mi apoyo guiados por la sabiduría de Dios, proyectándome a que podía lograr grandes oportunidades profesionales, personales y más logros académicos.

Tania Sánchez Ruiz

RESUMEN

El presente trabajo investigativo, tuvo como objetivo principal proponer la implementación de un biodigestor anaerobio para la obtención de Biogás a partir de excretas de ganado porcino en la empresa porqueriza González, ubicada en San Patricio-Chontales; lo cual, es una alternativa para dar solución a los problemas de contaminación generados por las excretas de los cerdos.

Dentro de los parámetros que se tomaron en cuenta para proponer un biodigestor fue la caracterización de los biorreactores, a fin de seleccionar el más viable para la empresa y que se adecuara a sus necesidades como son; el volumen de materia orgánica que se produce en dicha porqueriza, el espacio de construcción y la economía del propietario.

Para el cálculo del volumen del biodigestor (dimensiones) se tomaron en cuenta los datos del estiércol diario producido en la granja, el estiércol disponible y la relación estiércol agua, que, según la teoría, para los cerdos es 1:4, obteniendo de esta forma un volumen líquido de 15.55 m^3 , el cual representa el 80% del volumen total.

En esta investigación también se analizó la influencia de parámetros en la producción de biogás, para ello se realizó un diseño experimental factorial 2^3 , siendo los factores de entrada, pH (entre 8 inicial a 7 final), temperatura (33°C) y tiempo de retención (2 días). Para el experimento se utilizaron recipientes de dos galones, válvulas de gas, cintas para medir pH y una balanza, en total se realizaron 16 experimentos.

Se concluye que el biodigestor más apto para la empresa, es un biodigestor tubular de polietileno, con una capacidad líquida de 15.55 m^3 , según los resultados de los experimentos, todos los factores son relevantes para la producción de biogás, pero el más significativo es el tiempo de retención.

Se recomienda al propietario de la porqueriza González, el señor Félix González Romero, la construcción de un biodigestor tubular de polietileno de 15.55 m^3 de líquido, el cual, tendrá la capacidad de digerir la carga orgánica generada en la granja y será una excelente alternativa, no solo para la reducción de la contaminación, sino que también representará un ahorro al sustituir la leña y el gas propano por el biogás.

ÍNDICE DE CONTENIDO

OPINIÓN DEL CATEDRÁTICO GUIA.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
DEDICATORIA.....	IV
RESUMEN	V
I.INTRODUCCIÓN	1
II.ANTECEDENTES	2
III.JUSTIFICACIÓN	4
IV.OBJETIVOS.....	5
OBJETIVO GENERAL	5
OBJETIVOS ESPECIFICOS	5
V.MARCO TEÓRICO	6
5.1. Biodigestor	6
5.1.1. Temperatura de trabajo del biodigestor y tiempo de retención	6
5.2. Tipos de Biodigestores	7
5.2.1. Sistemas mono etapa:	8
5.2.2. Sistemas multietapa:.....	9
5.2.3. Sistema continuo	10
5.2.3.1. Reactor de Tanque Agitado Constante, CSTR:	10
5.2.4. Sistemas discontinuos y de régimen estacionario.	11
5.2.5. Sistema Semi continuos	12
5.2.5.1. Modelo domo fijo o tipo chino:.....	12
5.2.5.2. Modelo indiano o de domo flotante:	14
5.2.5.3. Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (U.A.S.B):	15
5.2.5.4. Biodigestor tubular de polietileno-propuesta de tesis.....	16
5.2.5.5. Diseño de calefacción solar pasiva en biodigestores tubulares de polietileno	19
5.2.5.6. Determinación del volumen del biodigestor tubular de polietileno:.....	20
5.2.5.7. Volumen de un biodigestor tubular de polietileno, carga diaria y tiempo de retención.	20
5.2.5.8. Consideraciones para determinar el volumen de un biodigestor tubular de polietileno.....	22
5.2.5.9. Dimensiones de los biodigestores tubulares de polietileno.	25
5.2.5.10. Metodología del diseño de los biodigestores tubulares de polietileno.....	27
5.3. Biogás:	28
5.3.1. Propiedades, uso y almacenamiento del biogás:.....	29
5.3.2. Consumo de Biogás.....	31
5.3.3. Cálculo de volumen de biogás a diferentes presiones y temperaturas	32
5.4. Caracterización del estiércol:	32
5.4.1. Cantidad de excretas producidas de acuerdo a función zootécnica.	33
5.4.2. Estiércol de cerdo	33
5.4.3. Porquinaza:.....	33
5.4.4. Estiércol diario y estiércol disponible:	34
5.4.4.1. Estiércol diario:.....	34
5.4.4.2. Estiércol disponible:	35
5.4.4.3. Mezcla con agua:	35
5.4.4.4. Carga diaria al biodigestor:	36

5.5. Ejemplos de cálculos sobre biodigestores tubulares de polietileno.....	37
5.6. Cálculos de las dimensiones del biodigestor tubular de polietileno.....	37
5.7. Digestión anaerobia	40
5.7.1. Etapas del proceso de digestión anaerobia	40
5.7.2. Hidrólisis.	40
5.7.3. Acidogénesis.	40
5.7.4. Acetogénesis.	40
5.7.5. Metanogénesis.....	41
5.7.6. Condiciones para el crecimiento de los microorganismos.	42
5.7.7. Microorganismos presentes en la digestión anaerobia	43
5.7.8. Beneficios ambientales de la biodigestión anaeróbica.....	43
5.8. Factores que influyen en la digestión anaerobia-control del proceso.....	44
5.8.1. Tipo de sustrato.	44
5.8.2. Velocidad de carga orgánica y tiempo de retención hidráulico.....	45
5.8.3. Temperatura.	45
5.8.4. pH.	47
5.8.5. Humedad	47
5.8.6. Relación C/N.....	47
5.8.7. Inhibición y Toxicidad.....	48
5.8.8. Presión.....	48
5.9. Caracterización de residuos y evaluación de análisis fisicoquímicos:.....	49
5.9.1. Determinación de % de Sólidos Totales (%ST):	49
5.9.2. Determinación del % de sólidos volátiles (% SV):.....	50
5.9.3. Determinación de Humedad:	50
5.9.4. Determinación de DQO (Demanda Química de Oxígeno):	51
5.9.5. Determinación de la relación C/N (Carbono/Nitrógeno):.....	52
5.10. Operación y Mantenimiento.....	53
5.10.1. Operación diaria.....	53
5.10.2. Operación semanal, mensual	53
5.10.3. Operación anual.....	54
5.10.4. Mantenimiento	54
VI.METODOLOGÍA	56
6.1 Tipo de investigación:.....	56
6.2. Lugar de desarrollo	59
6.3. Balance de materia.	59
VII.DISEÑO EXPERIMENTAL.....	61
7.1. Elección de factores de entrada para el diseño del experimento.	61
7.2. Medida de la respuesta	61
VIII. RESULTADOS.....	62
8.1. Propuesta de biodigestor:.....	62
8.1.1 Cálculos de las dimensiones del biodigestor para productora (porqueriza) de cerdos González.....	62
8.2. Discusión de los Resultados	67
8.3. Diseño de experimentos en MINITAB	68
IX. CONCLUSIONES	78
X. RECOMENDACIONES.....	79
XI. NOMENCLATURA.....	80
XII.BIBLIOGRAFÍA	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Biodigestor sistema mono etapas.	8
Figura 2: Biodigestor sistema multietapas.....	9
Figura 3: Reactor de Tanque Agitado Constante, CSTR.	10
Figura 4: Biodigestor discontinuo o Batch.	12
Figura 5: Digestor domo fijo o tipo chino.	13
Figura 6: Representación de digestor tipo indiano.	14
Figura 7: Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (U.A.S.B)	15
Figura 8: Biodigestor tubular de polietileno	16
Figura 9: Ejemplo de proporción de volumen biogás (20%) y volumen líquido (80%) de un biodigestor tubular de polietileno.....	21
Figura 10: Esquema de un cilindro, con su radio (r) y Circunferencia (C).....	22
Figura 11: Esquema de un cilindro indicando el diámetro (D) y Longitud (L).	24
Figura 12: Esquema de una zanja trapezoidal, con sus diferentes parámetros de medida.	25
Figura 13: Metodología del diseño de los biodigestores tubulares de polietileno.....	27
Figura 14: Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos.	41
Figura 15: Curva generalizada del crecimiento microbiano.....	42
Figura 16: Trampa de agua.....	54
Figura 17: Diagrama de bloques para actividades experimentales-Metodología	56
Figura 18: Lugar de desarrollo, San Patricio Chontales	59
Figura 19: Diagrama para el balance de materia.	60
Figura 20: Croquis de planta de producción de biogás-fuente propia	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Temperatura de trabajo de un biodigestor, en diferentes eco regiones, considerando o no el diseño solar.....	7
Tabla 2: Componentes del biodigestor tubular de polietileno.....	18
Tabla 3: Parámetros de dimensionado de zanjas de biodigestores tubulares a partir del ángulo α y el radio de la circunferencia disponible de manga tubular	27
Tabla 4: Principales componentes del biogás.	28
Tabla 5: Propiedades Físicas del Biogás.	30
Tabla 6: Consumos típicos de biogás para diferentes elementos.	31
Tabla 7: Producción de excretas según el estado fisiológico de los cerdos.....	33
Tabla 8: Distintos posibles sustratos con sus respectivos contenidos secos y húmedos.	34
Tabla 9: Producción de estiércol diario por tipo de animal.	34
Tabla 10: Cálculo de estiércol disponible.	35
Tabla 11: Mezcla con agua para la carga diaria.	36
Tabla 12: Cálculo de las dimensiones para biodigestor con estiércol de cerdo.	38
Tabla 13: Cálculo de las dimensiones para biodigestor con estiércol de vaca.....	38
Tabla 14: Microorganismos presentes en cada una de las fases.....	43
Tabla 15: Producción de biogás según la temperatura y tiempo de retención.	46
Tabla 16: Posibles causas en caso de mal funcionamiento del biodigestor.....	55
Tabla 17: Cálculo para estiércol diario disponible de empresa productora de cerdos González – Fuente propia con apoyo de bibliografía (Martí Herrero, 2019).....	63
Tabla 18: Cálculo de las dimensiones del biodigestor para la empresa productora de cerdos González – Fuente propia con apoyo de bibliografía (Martí Herrero, 2019).....	64
Tabla 19: Práctica del Diseño de experimentos Factorial 2^3 -Fuente propia.....	65
Tabla 20: Diseño factorial 2^3 (Fuente: Elaboración Propia).....	68
Tabla 21: Coeficientes codificados (Fuente: Elaboración Propia)	69
Tabla 22: Resumen del modelo (Fuente: Elaboración Propia).....	70
Tabla 23: Análisis de Varianza	71
Tabla 24: Ecuación de regresión en unidades no codificadas (Fuente: Elaboración Propia).....	72
Tabla 25: Recuperación de inversión por instalación de biodigestor capacidad de 18.66 m^3	90
Tabla 26: Aplicación de los principios de producción más limpia en granjas porcinas.....	91
Tabla 27: Ficha técnica; Geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE).....	92
Tabla 28: Detección de causas de mal funcionamiento y posibles soluciones de problemas.	95

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Comportamiento de la cantidad de biogás producido ajustando las variables del proceso: Tiempo de retención, temperatura y pH. (Fuente: Elaboración propia)	66
Gráfica 2: Comparativa datos propuestos vs datos obtenidos. (Fuente: Elaboración propia)	67
Gráfica 3: Diagrama de Pareto (Fuente: Elaboración propia)	73
Gráfica 4: Efectos Principales (Fuente: Elaboración propia)	74
Gráfica 5: Interacción de términos (Fuente: Elaboración propia)	75
Gráfica 6: Normal de efectos estandarizados (Fuente: Elaboración propia)	76
Gráfica 7: Residuos para la cantidad de metano (Fuente: Elaboración propia)	77

I. INTRODUCCIÓN

En este documento presentamos una propuesta de biodigestor para la producción de biogás derivado del estiércol porcino, como una alternativa eficiente y rentable al compostaje comparado con el método tradicional de verter al campo, lo cual contamina al medio ambiente.

El biogás generado a partir de estiércol de ganado porcino es una de las excelentes alternativas para la obtención y ahorro de gas propano desde la vida cotidiana al uso de la mediana y gran industria, y su producción se convierte en beneficiosa y necesaria para el entorno, debido a que es un sistema idóneo de eliminación de residuos, con la subsiguiente mejora del ambiente rural, urbano e industrial.

Para producir el biogás, se requiere de un biodigestor, que en su forma más simple es un contenedor cerrado, hermético e impermeable, dentro del cual se deposita materia orgánica y mediante la fermentación anaeróbica de los microorganismos, es degradada obteniendo gas metano (Biogás).

El uso de un biodigestor es determinante no solo para el ahorro de gas propano en la empresa Porqueriza González en la comunidad de San Patricio Chontales, sino imprescindible para la reducción de la contaminación ambiental. Por medio de este estudio se pretende aprovechar la crianza de cerdos de la empresa ya que las actividades desarrolladas en está utilizando gas son muy diversas, y la implementación oportuna y exacta de este proyecto puede impactar en un futuro al desarrollo de la misma.

Primeramente, el desarrollo de esta idea se llevó a cabo en base a una serie de experimentos a escala de laboratorio con esto se probó la calidad del estiércol para producción de gas, durante el proceso e involucramiento del propietario y personal de la empresa se evaluó la aceptación del proyecto, con esto se culminó con una propuesta para la construcción de un biodigestor y así provocar el aprovechamiento del biogás generado de los residuos orgánicos especialmente del ganado porcino.

Como equipo investigador llevamos a la práctica los conocimientos adquiridos para la obtención de biogás de estiércol porcino, la propuesta de implementación de un tipo óptimo de biodigestor fue la meta del estudio; sin embargo, estamos conscientes que este proyecto se puede seguir desarrollando culminándolo con un diagnóstico de rentabilidad, pero este estudio es únicamente para proponer teóricamente la implementación de un biodigestor adecuado. El dueño de la empresa destinó un tiempo limitado para dicho estudio, por lo que espera también le satisfagan los resultados obtenidos.

Otros aspectos que se tomaron en cuenta en este documento es la conciencia en cuanto a la contaminación ambiental, problema que afecta al mundo entero mientras se desarrollan un sin número de actividades industriales, con la optimización de los recursos en una empresa se puede ayudar a reducir los gases tóxicos que emanan a la atmosfera los cuales impactan con el efecto invernadero y así los cambios climatológicos.

II. ANTECEDENTES

El biogás, producto de la fermentación anaeróbica de estiércol, es utilizado desde mucho tiempo atrás. Los judíos cautivos en Babilonia, utilizaban estiércol de vaca como combustible para cocinar sus alimentos, también desde el año 3000 A.C. Los sumerios practicaban la limpieza anaeróbica de residuos, por lo que entendemos que este es un tema antiguo de miles de años.

La primera anotación científica del biogás se atribuye a Jan Baptista Van Helmont, en la primera mitad del siglo XIX determinó que, de la descomposición de la materia orgánica se obtenían gases inflamables, mismo tema que sustentó Chirley, un científico de la India que en 1667 realizó un estudio sobre los incendios de los pantanos de la India, donde se encontraron grandes cantidades de biogás (Toruño, Casco, & Edinson, Estudio de producción de biogás por medio del proceso de digestión anaerobia no controlada a partir de diversos sustratos orgánicos en la Facultad Regional Multidisciplinaria (FAREM –ESTELÍ), II Semestre de 2016., 2016, pág. 13).

Por otra parte en Nicaragua se han desarrollado otros proyectos de mayor envergadura con cooperación extranjera como el proyecto de biogás ejecutado por el Servicio Holandés de Cooperación al desarrollo (SNV), que en el año 2013 ejecutó el denominado Programa de Desarrollo del Mercado de Biogás en Nicaragua, con un fondo de 6 millones de dólares, aportados por el Fondo Multilateral de Inversiones (Fomin) del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), y el apoyo del Fondo Nórdico para el Desarrollo (FND); cuyo objetivo fue instalar sistemas de biogás, conocidos como biodigestores, en las fincas de 6,000 pequeños productores agropecuarios de los departamentos de Boaco, Chontales, León, Matagalpa, Nueva Guinea y Río San Juan, donde se cría ganado vacuno. (Pérez W. , 2014)

A nivel de la Facultad Regional Multidisciplinaria FAREM ESTELÍ se han realizado trabajos investigativos destacándose los siguientes:

1. La codigestión anaerobia, como alternativa de los residuos sólidos orgánicos generados en los mercados municipales.

Con esta investigación llegaron a la conclusión de que existe un comportamiento diferencial en la producción de biogás de las mezclas de los materiales digeridos y realizaron pruebas con dos biodigestores. También concluyen que el aprovechar los residuos de los mercados municipales representa un ahorro en la recolección, depósito de residuos, en cuanto a la producción de biogás ellos recomiendan usar un equipo Orsac para tener más exactitud en la composición del biogás.

2. Evaluación de la Producción de Biogás de tres sustratos (Estiércol de ganado, Bovino y porcino, y la pulpa de café)

En esta investigación los resultados que obtuvieron fue que el estiércol Bovino y porcino presenta mayor producción y por ende mayor poder calorífico y que con la pulpa de café no es constante la producción de biogás ya que solo es por temporada del cultivo de café. A la vez manifestaron que es necesario que se continúe investigando nuevas alternativas de generación de energía. Sin embargo, no se caracterizaron las propiedades de la materia orgánica.

3. Producción de biogás a partir de Biomasa.

En este estudio se confirma que la que la biomasa (pasto estrella *Cynodon plectostachyus* K. Schum), es un excelente sustrato para la producción de biogás siempre y cuando los parámetros que caracterizan la digestión anaerobia sean los adecuados para dicho proceso, el cual se logra construyendo un biodigestor con las características físicas y técnicas apropiadas. Este tipo de tecnología contribuye a reducir la contaminación del medio ambiente, el despale de los bosques, además de reducir las enfermedades respiratoria por lo que es esencial e importante instalar plantas pilotos para estudios experimentales para la producción de biogás. Los parámetros de funcionamiento evaluado dan la pauta de que se pueden mejorar las condiciones del proceso anaerobio utilizando biomasa por lo que es un tema que se puede seguir investigando e inclusive hacer proyectos piloto en zonas rurales.

FOMIN y Fondo Nórdico de Desarrollo lanzan programa de biogás para pequeños agricultores en Nicaragua en el año 2011, trabajo el cual se ha venido desarrollando a lo largo de 7 años, en el 2018 se realizaron biodigestores artesanales en las comunidades rurales de Boaco, Matagalpa, Chontales, Río San Juan y León. (Toruño, Casco, & Edinson, Estudio de producción de biogás por medio del proceso de digestión anaerobia no controlada a partir de diversos sustratos orgánicos en la Facultad Regional Multidisciplinaria (FAREM –ESTELÍ), II Semestre de 2016., 2016, págs. 14,15)

III.JUSTIFICACIÓN

En el transcurso de los años el consumo y costo de la energía, gas propano y combustibles va en aumento y se ha convertido en un reto de ingeniería, debido a esto proponemos en este documento la implementación de un biodigestor el cual genera gas metano de estiércol porcino. Es importante hacer conciencia sobre la contaminación ambiental por el efecto invernadero lo cual hoy en día es un tema que afecta a nivel mundial siendo de los factores de mayor impacto ambiental.

En nuestro país se utiliza el gas propano como medio combustible en actividades culinarias principalmente en la empresa “Porqueriza González”, donde se llevó a cabo este estudio para sustituir el uso de gas propano (GLP, gas licuado derivado del petróleo) por gas metano generado del estiércol de ganado porcino mediante la implementación de un biodigestor que permite reducir la contaminación ambiental y contribuir al desarrollo económico de la empresa por lo que se busca implementar un biodigestor. El consumo de gas propano es necesario para las actividades principalmente culinarias, para muchas familias es difícil obtenerlo principalmente por factor económico; sin embargo, se puede optar el uso de residuos para generar biogás y disminuir o eliminar el uso de propano y por ende la disminución del consumo de recursos no renovables.

La aplicación de biogás puede sustituir a la electricidad, al gas propano y al diésel; como fuente energética en la producción de electricidad, calor o refrigeración (Toruño, Casco, & Edinson, 2016,parafraseado adaptado).

IV.OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

1. Proponer la implementación de un biodigestor anaerobio para la producción de biogás aprovechando el estiércol de ganado porcino generado como desecho contaminante en La Empresa “Porqueriza González”.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Seleccionar el diseño apropiado del tipo de biodigestor que cumpla con los parámetros específicos de la porqueriza de acuerdo al volumen de excretas.
2. Analizar la influencia de los parámetros del proceso en la eficiencia de producción del biogás.
3. Implementar acciones para el uso de residuos orgánicos que contribuyen a la reducción de la contaminación ambiental
4. Reducir el consumo de gas propano en La Empresa “Porqueriza González, sustituyéndolo con el uso de gas metano y por ende la reducción de costos.

V.MARCO TEÓRICO

5.1. Biodigestor

Un biodigestor es un recipiente o depósito hermético, donde se introducen los residuos orgánicos que durante su proceso de transformación serán digeridos por microorganismos, que son los encargados de producir el biogás.

Los biodigestores son sistemas que producen biogás y fertilizante a partir de materia orgánica. Son sistemas en los que, en ausencia de oxígeno y presencia de consorcios bacterianos adecuados, se desarrolla de forma natural la digestión anaerobia y se captura el biogás producido. Un biodigestor en su funcionamiento es similar a un sistema digestivo animal: entra materia orgánica, que es digerida por bacterias, produciendo gases (biogás) y produciendo un subproducto líquido que tiene un alto valor como fertilizante.

5.1.1. Temperatura de trabajo del biodigestor y tiempo de retención

La temperatura a la que se encuentra el biodigestor (temperatura de trabajo) depende de la temperatura ambiente media y del uso de criterios de diseño de calefacción solar pasiva. Para regiones con climas calurosos, con temperaturas medias ambientales superiores a 20 °C, no es necesario incorporar criterios de diseño solar, y por tanto los biodigestores trabajarán a unas temperaturas muy similares a las temperaturas medias ambientales. En la Tabla 1 se expone la temperatura de trabajo esperada de un biodigestor, para diferentes eco-regiones y temperaturas medias ambientales, considerando, o no, criterios de diseño solar. Como se ve en la Tabla 1, la incorporación de criterios de diseño solar hace que el biodigestor trabaje como si estuviera en una eco región más cálida. De este modo, un biodigestor ubicado en valles altos (temperatura ambiente media de 13 a 17 °C), si se incorporan criterios de diseño solar, trabajará como un biodigestor sin diseño solar en la eco región de valles (temperatura ambiente media de 18 a 22 °C) (Martí Herrero, 2019).

Tabla 1: Temperatura de trabajo de un biodigestor, en diferentes eco regiones, considerando o no el diseño solar.

Eco región típica (altura, msnm)	Temperatura ambiente media (°C)	Temperatura de trabajo del biodigestor (°C)		
		Biodigestor sin diseño solar	Biodigestor con diseño solar	Criterios
Trópico cálido (<300)	28-32	28-32	No necesita diseño solar	
Trópico (300-1000)	23-27	23-27	No necesita diseño solar	
Valles (1000-2000)	18-22	18-22	23-27	Color oscuro + aislante zanja
Valles altos (2000-3000)	13-17	13-17	18-22	Color oscuro + aislante zanja +invernadero
Altiplano (3000-4500)	8-12	8-12	13-17	Color oscuro + aislante zanja +invernadero

5.2. Tipos de Biodigestores

Los biodigestores se clasifican según la forma de alimentación o carga en los siguientes tipos: Sistema mono etapa, sistema multietapa, Sistema continuo, Sistema discontinuo y sistema semicontinuo.

Los biodigestores varían ampliamente de acuerdo con su complejidad y utilización, los más sencillos se clasifican dentro del grupo de digestores discontinuos o de carga por lotes, y los más complejos se caracterizan por poseer dispositivos que permiten alimentarlos, proporcionándoles calefacción y agitación (ENERGÍA, 2011).

Los Biodigestores deben de fabricarse completamente cerrados, el objetivo de que sea hermético es garantizar que no ingrese aire al recipiente evitando el contacto de este con los microorganismos. El biogás producido durante la fermentación puede almacenarse en la parte superior del digestor, a esta sección se le conoce como campana o domo. La campana en algunas ocasiones se encuentra separada y se le conoce como gasómetro.

5.2.1. Sistemas mono etapa:

En este sistema se llevan a cabo las cuatro fases del proceso de digestión anaerobia simultáneamente en un único reactor.

- Características: Este sistema es considerado “tradicional” de realizar el proceso de digestión anaerobia, debido a que las tres fases correspondientes a la degradación de materia orgánica se llevan a cabo en el mismo equipo. Funciona con un reactor en el cual se mantiene una mezcla homogénea del sustrato microorganismos mediante un sistema de agitación, el cual puede ser mecánico o neumático (recirculación de biogás a presión).
- Ventajas: Este tipo de reactor y sistema no presenta problemas en el diseño y es implementado frecuentemente para la degradación de residuos.
- Limitaciones: La concentración de cualquier especie, que se mantiene en el reactor en régimen estacionario, es la misma que la que se pretende en el efluente. También otra condición importante es la estabilidad del proceso, ya que este está limitado por el pH, debido a que estos sistemas suelen presentar acumulación de ácido propiónico, causando la disminución del pH, y de esta manera siendo relevante en la fase metanogénica, esta se debe llevar a cabo en un pH entre 6.8 y 7.2, si no se cumple estas condiciones se inhibe esta fase (García Rodríguez & Gómez Franco, 2016, pág. 42).

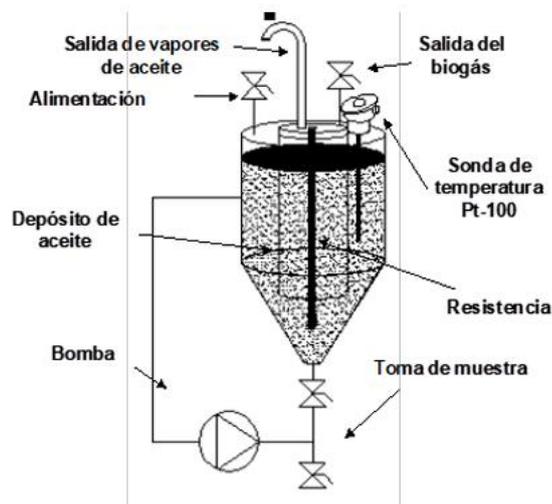


Figura 1: Biodigestor sistema mono etapas.

5.2.2. Sistemas multietapa:

En este sistema se dividen las fases presentes de la digestión anaeróbica de los residuos en el proceso.

- Características: A través del tiempo se ha venido intensificando la innovación en la tecnología implementada en los sistemas anaerobios, presentando una separación de las fases representativas de este proceso, se realiza la separación de la fase metanogénica de las fases de hidrólisis y acidificación ya que permite un manejo por aparte de los principales grupos microbianos involucrados de tal manera que facilita la operación del sistema y confiere una mayor estabilidad al proceso.
- Ventajas: Si la primera etapa consiste en un reactor discontinuo, el líquido tratado en la segunda es el obtenido por percolación en la primera una vez recirculado el efluente de la segunda. Este sistema permite mantener fácilmente la temperatura en el reactor discontinuo, controlando la temperatura del efluente del segundo reactor. La principal aplicación de este tipo de sistemas de biodigestión se encuentra en el aprovechamiento de residuos de frutas, verduras, ganado vacuno, entre otros.
- Limitaciones: El modo de funcionamiento está dado por un primer reactor con elevado tiempo de retención, en el cual se favorece la hidrólisis, debido a que es el tiempo medio de permanencia del influente en el reactor, sometido a la acción de los microorganismos. Después pasa a un segundo reactor en el cual se tiene un de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. En cuanto a las condiciones de operación son más fáciles de controlar a comparación de un proceso mono etapa, debido a que se puede realizar un seguimiento más detallado en cada fase, este parámetro permite llevar a cabo el proceso eficientemente.

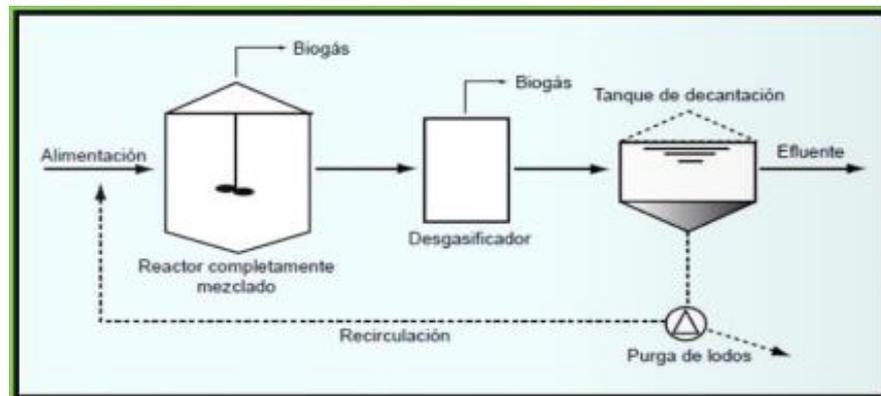


Figura 2: Biodigestor sistema multietapas.

5.2.3. Sistema continuo

En este tipo de biodigestores la alimentación es constante, se debe contar con una producción de biomasa diaria, y el tiempo de retención de los residuos es mucho más corto. Por esto se puede decir que el afluente es igual al efluente o descarga del digestor, y se espera que por tal motivo la producción de biogás sea uniforme en el tiempo. Normalmente estos digestores son de gran capacidad, por lo que es necesario emplear bombas para alimentarlos y otros equipos para proporcionar calor y agitación. Estos digestores son de mayor uso en la industria. Uno de los reactores químicos de este tipo más común es el reactor de tanque agitado constante CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor).

5.2.3.1. Reactor de Tanque Agitado Constante, CSTR:

El reactor de tanque agitado se emplea sobre todo para reacciones en fase líquida normalmente se emplea en estado estacionario y se asume una mezcla perfecta. Se denomina que no hay dependencia del tiempo o de la posición en la temperatura, la concentración o de la velocidad de reacción dentro del reactor. Se considera que todas las variables son iguales en todos los puntos del interior del reactor.

Para sistemas donde el mezclado es considerado no ideal, este modelo de mezcla perfecta resulta inadecuado; por lo que se debe recurrir a otra técnica de modelaje, como la distribución de tiempo de residencia, para obtener resultados significativos.

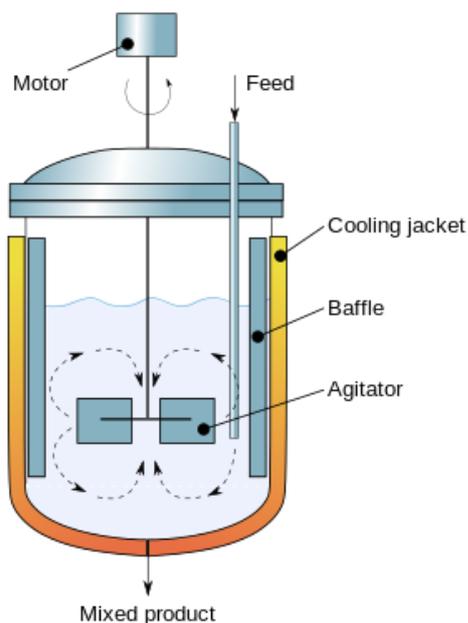


Figura 3: Reactor de Tanque Agitado Constante, CSTR.

5.2.4. Sistemas discontinuos y de régimen estacionario.

Los digestores se cargan con las materias primas en una sola carga o lote. Después de un cierto período de fermentación, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, se vacían los digestores por completo y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación. Esto se conoce también como digestores Batch o Batelada.

Este tipo consiste en una batería de tanques o depósitos herméticos (digestores) con una salida de gas conectada con un gasómetro flotante, donde se almacena el biogás.

El objetivo de disponer de más de un digestor es tener siempre uno de ellos en carga o en descarga, mientras el resto se encuentra en producción de biogás.

La alimentación o carga del digestor con la materia prima, sólida, seca, se realiza por lotes (discontinuamente) y la carga de los residuos estabilizados se efectúa una vez que ha finalizado la producción de biogás.

Este sistema discontinuo es aplicable en situaciones particulares, como sería la de materias primas que presentan problemas de manejo en un sistema semi continuo y continuo, o materiales difíciles de digerir metanogénicamente o cuando las materias primas a procesar, están disponibles en forma intermitente, como es el caso de los rastrojos de cosecha.

Está destinado a pequeñas y grandes explotaciones agropecuarias, su uso a escala doméstica es poco práctico.

Ventajas del digestor discontinuo (ENERGÍA, 2011).

1. Ocupa menor volumen de digestor por volumen de biogás producido, debido a la alta concentración de materia seca en el sustrato (40 – 60%).
2. Ocupa de 60 – 80% menos de agua que los digestores continuos y semi continuos.
3. No forma costra ni necesita agitación diaria.
4. No sufre cambios de temperaturas violentos.
5. Ocupa menos mano de obra, ya que no necesita carga diaria, sino cada 2 o 3 meses para carga y descarga. Durante el resto del tiempo, basta amontonar el material a usar.
6. La mayor parte del bioabono se obtiene en forma sólida, siendo más fácil de esparcir en la preparación de suelos.
7. La corrosión de las tapas de los digestores es menor, debido a que éstas están insertas en un sello de agua.
8. No requiere de cuidados especiales que pueda causar accidentes en la fermentación anaeróbica.
9. Se puede construir sobre el suelo o semi enterrado. Es ideal para localidades de nivel freático superficial o terreno en rocas.

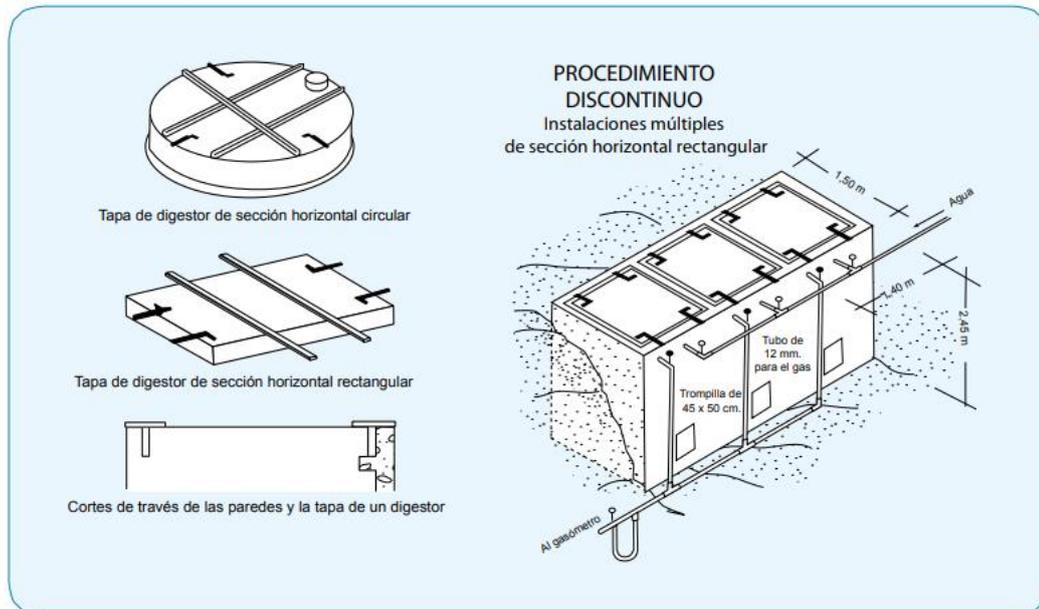


Figura 4: Biodigestor discontinuo o Batch.

5.2.5. Sistema Semi continuos

En estos biodigestores, se introduce una carga inicial, y posteriormente, teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulico (TRH) y el volumen del tanque, se agregan nuevas cargas. El efluente (descarga), debe estar en una proporción directa a la cantidad del afluente (alimento). Sus diseños más populares son el digestor chino, el indiano, el UASB (Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente o Upflow, Anaerobic Sludge Blankett, por sus siglas en inglés) y el biodigestor de flujo pistón de estructura flexible, los cuales se describen a continuación.

5.2.5.1. Modelo domo fijo o tipo chino:

Son aquellos armados en una sola estructura que por regla general es hecha en materiales rígidos (concreto, bloques o ladrillos). Debido a la alta presión que pueden alcanzar en su interior y a la constante variación de la misma, se recomienda su construcción en forma de domo, bajo tierra en suelos estables y firmes, y la impermeabilización de la parte interna de la estructura a fin de evitar el escape de líquido y gases. Estos factores hacen obligatorio el uso de mano de obra altamente calificada para su diseño y construcción (ver figura 5).

Los digestores de este tipo son tanques cilíndricos con el techo y el piso en forma de domo y se construyen totalmente enterrados. Al iniciar el proceso, el digestor se llena con residuos agrícolas compostados mezclados con lodos activos de otro digestor, a través de la cubierta superior, que es removible. Una vez cargado así, es alimentado diariamente con los residuos que se encuentren disponibles, provenientes de la letrina y de los animales domésticos, a través del tubo de carga el cual llega a la parte media del digestor (ENERGÍA, 2011).

El modelo de cúpula fija tiene como principal característica que trabaja con presión variable; sus principales desventajas, son que la presión de gas no es constante y que la cúpula debe ser completamente hermética, ello implica cierta complejidad en la construcción y costos adicionales en impermeabilizantes. Sin embargo, este modelo presenta la ventaja de que los materiales de construcción son fáciles de adquirir a nivel local, así como la inexistencia de partes metálicas que pueden oxidarse y una larga vida útil si se le da mantenimiento, además de ser una construcción subterránea.

En este tipo de digestores no existe gasómetro, almacenándose el biogás dentro del sistema. A medida que aumenta el volumen del gas almacenado en el domo del digestor, aumenta su presión forzando al líquido, en los tubos de entrada y salida a subir y llegándose a alcanzar presiones de hasta 100 cm de columna de agua. Se generan entre 0.15 y 0.20 volúmenes de gas por volumen de digestor/día. Como consecuencia de la variación de presión, la que aumenta al generarse el gas y disminuye al consumirse éste, se reduce la eficiencia en los equipos consumidores. Periódicamente se extrae una parte del líquido en fermentación a través del tubo de salida, mediante una cubeta y una o dos veces al año el digestor se vacía completamente aplicando el residuo (sólido) a los campos de cultivo.

A pesar que el digestor chino es poco eficiente para generar biogás, es excelente en la producción de bioabono, ya que los tiempos de retención son en general largos y además se tiene gran cantidad de este material cuando se necesita para mezclar con el suelo antes de la siembra. Los tiempos de retención de operación para los biodigestores tipo chino son de 30 a 60 días, requiriéndose para alcanzar la misma eficiencia (máximo 50% de reducción de la materia orgánica) de 1/2 a 1/3 de este tiempo de retención en los biodigestores tipo hindú.

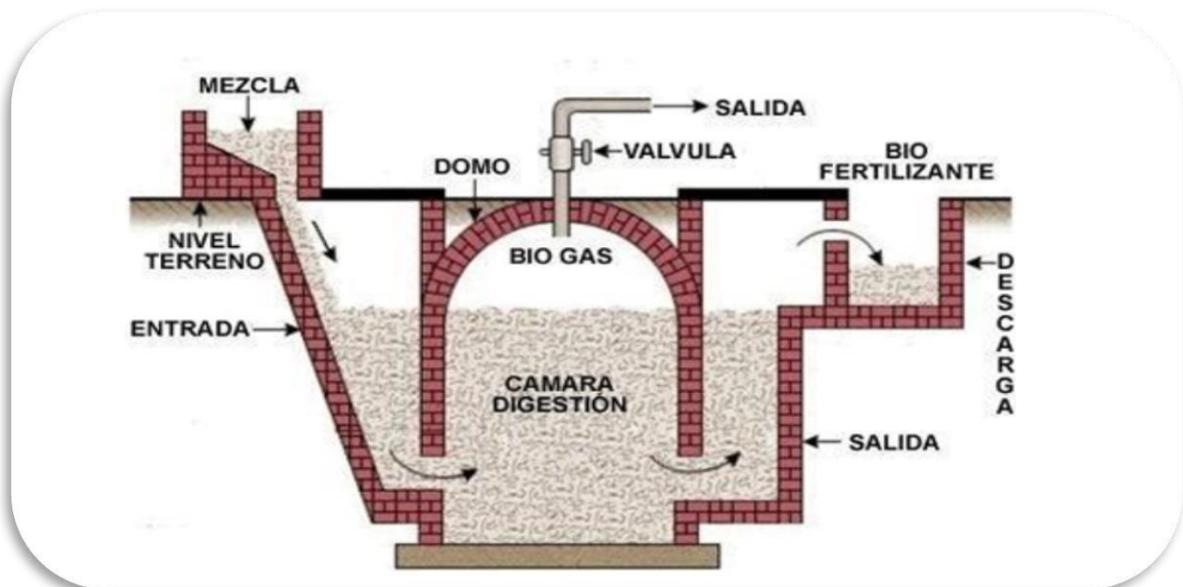


Figura 5: Digestor domo fijo o tipo chino.

5.2.5.2. Modelo indiano o de domo flotante:

Estos digestores en general son enterrados y verticales, semejando a un pozo. Se cargan por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación. El gasómetro está integrado al sistema, o sea que, en la parte superior del pozo flota una campana donde se almacena el gas. De esta forma, la presión del gas sobre la superficie de la mezcla es muy baja, de alrededor de 30 cm de columna de agua. Con esta campana se logra, además, una presión constante, lo que permite una operación eficiente de los equipos a los que alimenta. La campana también ayuda al rompimiento de la espuma que se forma en muchos biodigestores (ENERGÍA, 2011).

La entrada de la carga diaria por gravedad hasta el fondo del pozo, además de producir agitación, provoca la salida de un volumen equivalente de lodos digeridos, desde la superficie o desde el fondo, según el diseño del sistema, los que se hacen fluir hasta una pileta para su aplicación a los cultivos. Para aumentar la retención de la materia prima, posee un tabique central. En este caso, los materiales usados son preferentemente excretas, las que deben estar bien diluidas y mezcladas homogéneamente. Este tipo de digestor presenta una buena eficiencia de producción de biogás, generándose entre 0.5 y 1,0 volumen de gas por volumen de digestor por día.

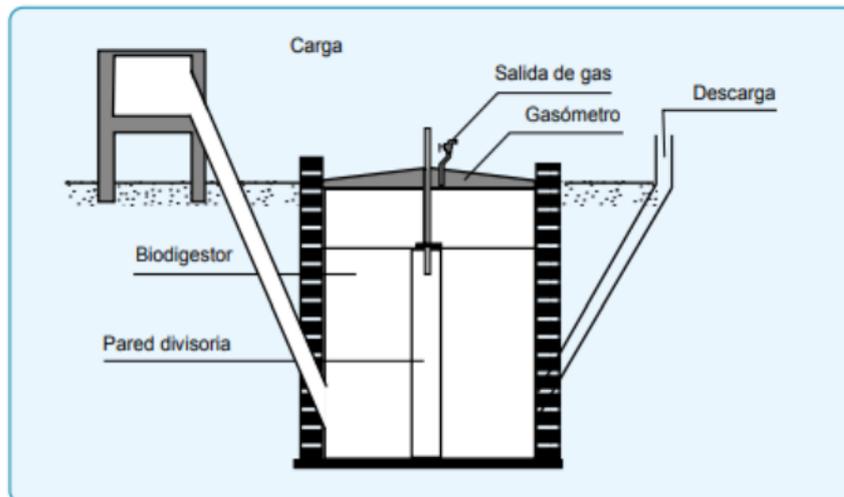


Figura 6: Representación de digestor tipo indiano.

5.2.5.3. Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (U.A.S.B):

Un Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente o Upflow Anaerobic Sludge Blankett, por sus siglas en inglés U.A.S.B, opera en actividad autorregulada de diferentes grupos de bacterias que degradan materia orgánica convirtiéndola en biogás y formando un lodo biológicamente activo en el reactor. En este sistema la biomasa es alimentada por la parte inferior del bio-reactor. El agua residual fluye de forma ascendente a través de un manto de lodos, la reacción ocurre cuando la mezcla entra en contacto con el lodo, y el gas que ha sido producido por la digestión anaeróbica de las bacterias presentes circula en el interior del reactor, permitiendo el mantenimiento y formación del lodo.

Parte del gas generado dentro del manto de lodos se adhiere a las partículas biológicas, y tanto el gas libre como las partículas a las que se ha adherido gas, ascienden hacia la parte superior del reactor. Las partículas más pesadas caen a la superficie del manto de lodo después de haber entrado en contacto con unos deflectores desgasificadores, y de esta manera el gas que es liberado se une al gas libre y posteriormente se almacena en el tanque o gasómetro dispuesto para tal fin. El lixiviado es separado por decantación de los sólidos presentes, y éstos últimos se retornan a los lodos que han quedado en el fondo del biorreactor.

Las principales ventajas que ofrece el reactor UASB son:

1. Fácil operación
2. Bajos costos de inversión y operación
3. Bajos requerimientos nutricionales en el arranque del proceso.
4. Producción de lodo, ya que pueden manejar cargas orgánicas muy variables y se conservan sin alimentación por largo tiempo, a diferencia de los digestores aerobios.

Por otra parte, los compuestos de la materia orgánica se degradan más fácil y rápidamente en condiciones anaerobias, además, la campana con la que cuenta el diseño asegura la separación de sólidos, líquidos y gases para obtener el biogás; condiciones con las que no cuenta un sistema aerobio.

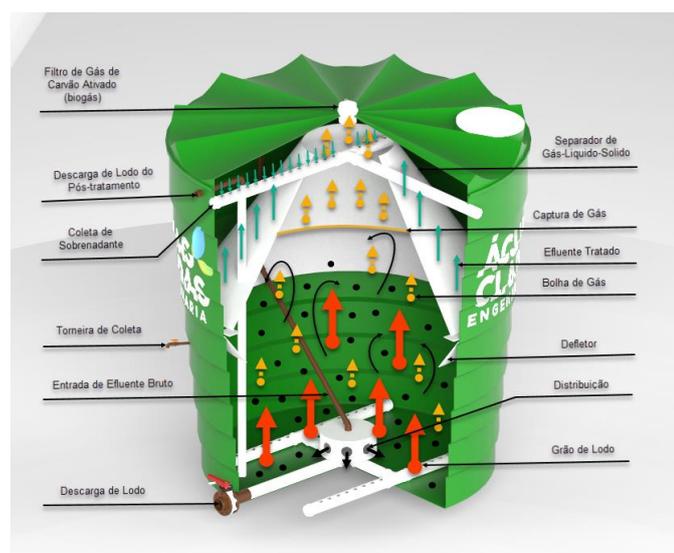


Figura 7: Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (U.A.S.B)

5.2.5.4. Biodigestor tubular de polietileno-propuesta de tesis

Estos biodigestores consisten en una manga de plástico de polietileno a la que se le instalan unos tubos en los extremos que hacen de entrada y salida. Este tipo de biodigestor es mucho más barato que los anteriores, pero con una vida más corta, debido a la menor durabilidad de sus materiales.

Estos biodigestores funcionan a temperaturas similares a las del suelo (como el domo fijo) al estar el lodo en la parte que queda por debajo del nivel de la zanja. Pero al estar semienterrados, dejando la cúpula de biogás visible, pueden diseñarse para aprovechar la radiación solar de modo que se caliente el sistema a tal nivel que por la noche no se pierda la temperatura de funcionamiento al almacenar suficiente calor. Al estar enterrado, la temperatura a la que se desarrolla la digestión anaerobia es similar a la temperatura del suelo, muy cercana a la temperatura ambiente media anual del lugar (con variaciones leves estacionales).



Figura 8: Biodigestor tubular de polietileno

Con el objetivo de tratar remanentes y residuos orgánicos, reducir la contaminación ambiental y el riesgo de transmisión de enfermedades, se propone introducir las excretas animales (cerdo en nuestro caso de estudio), humanas y residuos orgánicos molidos (vegetales y animales), dentro de un biodigestor construido con una bolsa tubular de polietileno o de cloruro de polivinilo PVC, alojada dentro de una fosa en forma geométrica de trapecio invertido, excavada sobre el suelo y dentro de un rancho con techo.

El biodigestor permite producir, almacenar y utilizar el biogás y el abono orgánico (biol), obtenidos como producto de la fermentación anaeróbica realizada por bacterias naturales durante 30 a 40 días, de la materia orgánica contenida en las excretas y en otros residuos orgánicos frescos.

Las familias campesinas mejoran su bienestar, pues ya no tienen que emplear tiempo para recolectar leña para la cocción de los alimentos, y la quema del biogás no produce humo nocivo para la salud de las personas que preparan y consumen los alimentos. Se han cuantificado los siguientes beneficios: Un biodigestor de polietileno de tamaño familiar (con 20 m³ de capacidad total), que una vez lleno con agua y excretas, funciona diariamente con 30 kilogramos de excretas frescas (uno y medio baldes plásticos grandes), obtenidas de una sola especie animal o combinadas, lo cual es producido por una (1) vaca o cinco (5) equinos o 10 cerdas de cría confinadas permanentemente, mezcladas con 150 litros de agua limpia (agua lluvia, de un riachuelo, laguna o pozo), usada para lavar los pisos de los corrales, tiene la capacidad de producir biogás para generar hasta ocho (8) horas de llama por día, lo que permite cocinar los alimentos diarios para una familia de hasta seis (6) personas. El biogás permite sustituir cualquier otro combustible y el abono orgánico (efluente líquido del biodigestor) permite sustituir el abono químico (Nitrógeno N – Fósforo P – Potasio K).

El abono orgánico y el biogás producidos durante seis (6) meses permiten cubrir todos los costos de la inversión realizada para instalar el biodigestor. La vida útil de la bolsa de polietileno techada puede ser de 10 años (Botero, 2018).

Tabla 2: Componentes del biodigestor tubular de polietileno

Componente	Opcional	Definición/ Uso
Reactor	NO	Es sencillamente una “bolsa” de plástico, donde se desarrollará el proceso de digestión, que suele ser polietileno PE o geomembrana de cloruro de polivinilo PVC; ésta es más sólida y por tanto más cara que el PE.
Tuberías	NO	De cloruro de polivinilo PVC, conducen el gas del reactor a la cocina o a la instalación que usa el gas.
Válvulas	NO	En varios sitios de las tuberías se ponen válvulas. La más importante es la válvula de seguridad, que garantiza una presión más o menos constante en el reactor, impidiendo así que se dañe si el biogás no es utilizado durante un cierto tiempo, y que impide que aire entre al biodigestor.
Reservorio	NO	Almacena el biogás producido. Se encuentra cerca de la cocina (o de cualquier instalación que hace uso del biogás) y se debe poner de tal manera que sea fácil darle presión.
Cocina	SI	Si el biogás es utilizado para cocinar, hay que instalar una cocina, que puede ser de metal (en general una cocina a gas de bombona adaptada al biogás) o de arcilla con un quemador metálico.
Manómetro	SI	Puede ser construido artesanalmente, sirve a controlar la producción de biogás.

5.2.5.5. Diseño de calefacción solar pasiva en biodigestores tubulares de polietileno

En el caso donde la temperatura ambiente media sea en torno a 20 °C o menor, se recomienda considerar los criterios de diseño de calefacción solar pasiva. Las posibilidades de usar uno y otro criterio dependen fuertemente del material con el que se vaya construir el tanque del biodigestor (plástico de invernadero, geomembrana de cloruro de polivinilo PVC o geomembrana de polietileno) y se comentará específicamente cada caso.

Hay tres criterios principales, que van en orden jerárquico, o sea, para considerar el tercero, habrá que haber considerado los dos previos:

1.- Colores oscuros en el material del que está hecho el biodigestor:

Esto es para absorber la radiación solar incidente. Esta radiación solar calentará la cúpula del biodigestor (hasta los 60 y 70 °C) y parte de esa temperatura será transferida al biogás interior (que a su vez calentará por convección la mezcla de agua y estiércol que se encuentra por debajo) y otra parte es directamente transferida (por radiación) a la mezcla de agua y estiércol. Esta opción solo es recomendable si se usa geomembrana de polietileno de color oscuro para hacer tanque (ya viene de color negro y aguanta muy bien la radiación solar directa), ya que la radiación solar directa sobre plástico acorta fuertemente su vida útil, y sobre geomembrana de cloruro de polivinilo PVC producirá una expansión del biogás y la cúpula que no es fácil de controlar. Con esta técnica se puede subir la temperatura de trabajo del biodigestor entre 2 y 3 °C.

2.- Aislante en paredes y suelo de zanja:

Este es un aspecto fundamental, pues se trata de conservar el calor ganado por la mezcla interna de agua y estiércol. De no estar presente este aislante la temperatura de trabajo del biodigestor terminará en valores similares a la temperatura de suelo. Cuando se usa aislante en zanja debe ser debido a que se ha diseñado el biodigestor para que tenga alguna forma de ganar temperatura, por ejemplo, por usar geomembrana de polietileno de color oscuro para el tanque. Con esta técnica (aislante más color oscuro) se puede aumentar la temperatura de trabajo del biodigestor entre 4 y 6 °C.

3.-Invernadero:

La introducción de un invernadero como elemento de calefacción solar pasiva, además sirve como elemento de protección. Se recomiendan invernaderos compactos, donde no es necesario que una persona pueda entrar, o sea, un invernadero pequeño que contenga y cubra completamente al biodigestor. Se trata de minimizar la superficie del invernadero, para así evitar pérdidas de calor. El invernadero puede tener paredes de adobe, ladrillo o el propio plástico de invernadero. Para que este sistema funcione es necesario que en el interior haya algún elemento de color oscuro (y absorba la radiación solar). Con esta técnica (invernadero, más aislante, más color oscuro) se puede aumentar la temperatura del biodigestor hasta 6-10 °C, siendo la referencia el que el biodigestor puede lograr temperaturas similares a las máximas ambientales (Martí Herrero, 2019).

5.2.5.6. Determinación del volumen del biodigestor tubular de polietileno:

El volumen del biodigestor viene determinado por la carga diaria (CD, mezcla de estiércol y agua) y el tiempo de retención (TR), y a su vez el TR viene determinado por el clima y por si se ha considerado un diseño de calefacción solar pasivo. La carga diaria puede estar basada en el estiércol disponible, pero también puede venir condicionada por querer producir una cierta cantidad de biogás a ser utilizado en diferentes elementos o para producir una cierta cantidad de biol al día o la semana.

5.2.5.7. Volumen de un biodigestor tubular de polietileno, carga diaria y tiempo de retención.

El volumen del biodigestor se puede dividir entre la parte que ocupa la fase líquida (el estiércol y agua junto con el consorcio bacteriano) y la parte que ocupa la fase gaseosa (donde se acumula el biogás generado). El volumen líquido del biodigestor es el que está relacionado con la carga diaria y el tiempo de retención. Si imaginamos un biodigestor inicialmente vacío y comenzamos a cargarlo de forma diaria con una misma cantidad (carga diaria), tardará tantos días como tiempo de retención se hayan considerado, en llenarse. Y así, el día “tiempo de retención +1 día”, al cargar el biodigestor, se desbordará expulsando la carga del primer día, ya digerida. Por lo tanto, el volumen líquido de un biodigestor será el tiempo de retención multiplicado por carga diaria. Esto nos estaría indicando cuantos días tardaríamos en llenar el biodigestor con esa cantidad de carga diaria (Martí Herrero, 2019).

La ecuación del volumen líquido respecto al tiempo de retención y la carga diaria es la siguiente:

Ecuación 1

$$VL = TR \times CD$$

VL = Volumen del líquido (m^3 o L)

TR = Tiempo de retención (días)

CD = Carga diaria ($\frac{m^3}{d}$ o $\frac{L}{d}$)

Este, el volumen líquido (VL), es el volumen que hay que considerar en los cálculos para el tiempo de retención, y no el volumen total. El volumen total (VT) del biodigestor será la suma del volumen líquido y volumen de biogás (VB).

Ecuación 2

$$V_T = V_L + V_B$$

V_T = Volumen Total (m^3 o L)

V_L = Volumen Líquido (m^3 o L)

V_B = Volumen de Biogás ($\frac{m^3}{d}$ o $\frac{L}{d}$)

Al volumen de la cúpula de biogás se le puede hacer mayor o menor en el momento del diseño. Este no determina el espacio que ocupan las bacterias y por tanto no depende del Tiempo de Retención, ni del lugar o clima donde se instale el biodigestor. El volumen de biogás del biodigestor se puede desear que sea grande (como para almacenar uno o dos días de producción diaria de biogás) o muy pequeño (de unos pocos litros de volumen, lo que normalmente conllevará tener que disponer de un reservorio de biogás externo) (Martí Herrero, 2019).

Cualquier disminución drástica de la producción de biogás en porcentajes mayores al 10%, son una señal de que el proceso de biodigestión está alterado.

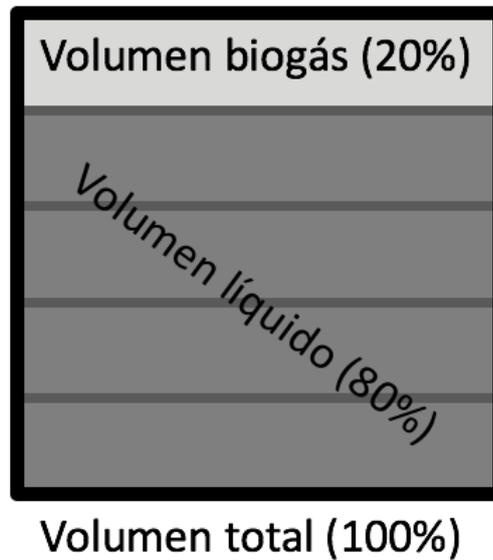


Figura 9: Ejemplo de proporción de volumen biogás (20%) y volumen líquido (80%) de un biodigestor tubular de polietileno.

5.2.5.8. Consideraciones para determinar el volumen de un biodigestor tubular de polietileno.

Al volumen del biodigestor hay que darle una forma, y esta vendrá determinada por las dimensiones del biodigestor. Hay que considerar que la parte más importante es el volumen líquido, que es el que va asociado a la carga diaria y al tiempo de retención, mientras que el volumen del biogás solo nos indica cuanto biogás podremos almacenar y no influye en la digestión anaerobia. Por lo tanto, la clave es dar unas dimensiones adecuadas al biodigestor para que tenga el volumen líquido deseado. Al trabajar con biodigestores construidos con materiales flexibles (plástico de invernadero, geomembrana de cloruro de polivinilo PVC o de polietileno) es necesario darle un recipiente al biodigestor que contenga ese volumen, y ese recipiente es la zanja. Las dimensiones de la zanja son las que determinan el volumen final del biodigestor pues al final, el volumen líquido deberá estar contenido en la zanja. Los biodigestores tubulares son aquellos que tienen forma tubular (de cilindro, manga, de tubería, de intestino, etc.) y es esta forma la que se va a trabajar en esta tesis. En la actualidad se encuentran disponibles otros materiales como la geomembrana de cloruro de polivinilo PVC o de polietileno, que viene presentado en láminas que hay que soldar para formar un tanque. De este modo la forma tubular ya no es un condicionante, sino una opción. De hecho, muchos de los biodigestores fabricados con polietileno ya no tienen las formas tubulares que tienen los biodigestores de plástico de invernadero, y presentan formas más esféricas.

Estas formas esféricas permiten lograr el mismo volumen líquido usando menor cantidad de geomembrana (la esfera es la forma geométrica más eficiente en cuanto a volumen versus superficie), y es por ello que se ha tendido a estas geometrías. Pero la forma tubular, a pesar de requerir más material para lograr un mismo volumen, presenta otras ventajas como es el asegurar que la entrada y salida del biodigestor (colocadas en los extremos de la manga) queden alejadas, y por tanto se asegura que la carga diaria tendrá que recorrer toda la longitud del biodigestor antes de salir. Esta forma tubular se asemeja más a un intestino de un sistema digestivo, que al final es lo que se trata de replicar.

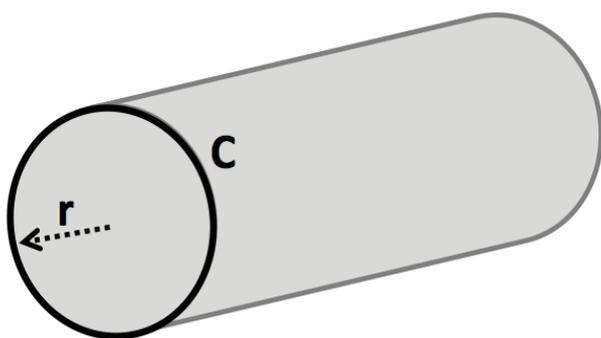


Figura 10: Esquema de un cilindro, con su radio (r) y Circunferencia (C).

En un biodigestor tubular la circunferencia (C) del cilindro es:

Ecuación 3

$$C = 2 \times \pi \times r$$

C = Circunferencia del plástico (m)

$$\pi = 3.1416$$

r = radio de la circunferencia del plástico (m)

El diámetro (D) es el doble del radio

Ecuación 4

$$D = 2 \times r$$

D = Diámetro de la circunferencia del plástico (m)

r = radio de la circunferencia del plástico (m)

De este modo, aun cuando se trabaje con geomembranas de cloruro de polivinilo PVC y polietileno PE, en esta tesis siempre se les va a dar forma tubular. ¿Cuál es el criterio para considerar si tiene, o no, forma tubular? Cuando un biodigestor tiene una relación entre su longitud y su diámetro entre 5 y 10, consideramos que tiene forma tubular (Martí Herrero, 2019)

Ecuación 5

$$\frac{L}{D} = (5 \text{ a } 10)$$

L = Longitud del Biodigestor (m)

D = Diámetro de la circunferencia del plástico (m)

En el caso de tener $L/D < 5$ tendrá una forma demasiado corta, donde la entrada y salida no están tan separadas, pudiendo pasar que parte del material que cargamos hoy, alcance la salida en los próximos días sin haber transcurrido el tiempo de retención establecido. Si un biodigestor tiene $L/D > 10$ tendremos una forma demasiado alargada (espagueti o alambre), que, si bien asegura que la entrada y salida estén alejados, puede incurrir en problemas de acumulación de lodos hacia la mitad de la longitud del biodigestor. Esto es debido a que la turbulencia que produce la carga diaria dentro del biodigestor, que levanta los sólidos acumulados en su parte inferior, no alcanza toda la longitud de un biodigestor tan alargado. La relación óptima entre la longitud y el diámetro para un biodigestor será de 7.5 (Martí Herrero, 2019)

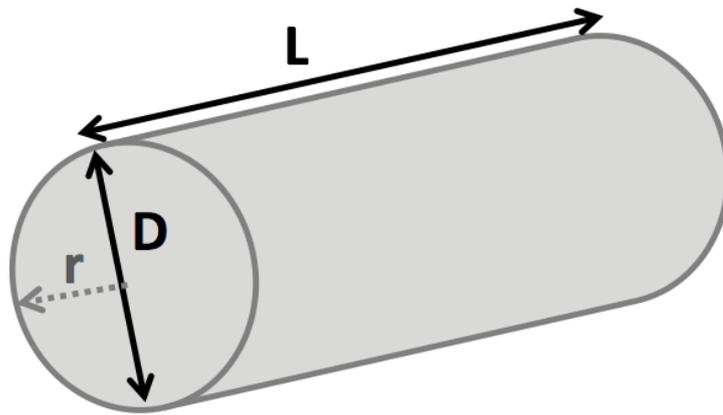


Figura 11: Esquema de un cilindro indicando el diámetro (D) y Longitud (L).

Ecuación 6

$$\frac{L}{D} \text{ Óptima} = 7.5$$

L = Longitud del Biodigestor (m)

D = Diámetro de la circunferencia del plástico (m)

Hay que considerar que el plástico de invernadero se suele vender diciendo, por ejemplo, que tiene un ancho de rollo de 2 metros (m) y se abre a 4 metros (m). Esto quiere decir que la manga de plástico, cuando se corta el lateral se abre a una sábana de 4 metros (m). Estos cuatro metros corresponden a la circunferencia (C), y los 2 metros (m) son la mitad de la circunferencia (no confundir estos dos metros con el diámetro). En este caso, si la circunferencia es de 4 metros (m), y usando la Ecuación 3, se tiene que el radio r es 0.64 metros (m), y el diámetro 1.27 metros (m).

De este modo, ya se puede saber las longitudes aceptables de un biodigestor que tiene 4 metros (m) de circunferencia, considerando la Ecuación 6, la menor longitud será la que mantenga una relación $L/D=5$. Despejando la L quedará $L=1.27 \times 5$, y por tanto $L= 6.36$ m. La mayor longitud será $L= 1.27 \times 10 = 12.7$ m. Y el biodigestor óptimo para una circunferencia de 4m será $L= 1.27 \times 7.5 =9.55$ m.

5.2.5.9. Dimensiones de los biodigestores tubulares de polietileno.

Las dimensiones de un biodigestor tubular vienen determinadas por las dimensiones de la zanja. La zanja es la que contendrá la fase líquida del biodigestor. Normalmente se usan zanjas trapezoidales (con paredes inclinadas para ayudar al terreno para que no se derrumbe) donde se colocan los biodigestores tubulares (Martí Herrero, 2019)

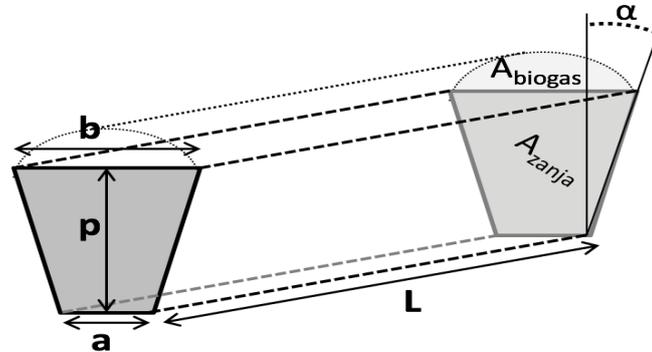


Figura 12: Esquema de una zanja trapezoidal, con sus diferentes parámetros de medida.

Un trapecio viene determinado por su ancho inferior (a), ancho superior (b) y profundidad (p). Al proyectar este trapecio se tiene la zanja con una longitud L . De este modo se puede conocer el volumen de la zanja que contendrá al biodigestor tubular. Para ello es necesario primero conocer el área del trapecio y posteriormente multiplicarlo por la longitud. El área del trapecio de la zanja (A_{zanja}) es la semisuma del ancho inferior más el superior multiplicado por la profundidad, como parece en la siguiente ecuación:

Ecuación 7

$$A_{zanja} = p \times (a + b) \frac{1}{2}$$

$$A_{zanja} = \text{Área del trapecio de la zanja (m}^2\text{)}$$

$$p = \text{Profundida (m)}$$

$$a = \text{Ancho inferior (m)}$$

$$b = \text{Ancho superior (m)}$$

El volumen de la zanja (V_{zanja}) será el volumen líquido del biodigestor (VL), o sea $V_{zanja} = VL$. Se calcula multiplicando el área de la zanja (A_{zanja}) por la longitud (L) de la misma, como se expresa en la Ecuación 8.

Ecuación 8

$$V_{Zanja} = VL = A_{Zanja} \times L$$

$$V_{Zanja} = \text{Volumen de la zanja (m}^3\text{)}$$

$$L = \frac{V_L}{A_{Zanja}}$$

$$V_L = \text{Volumen del líquido}$$

$$L = \text{Longitud de la zanja (m)}$$

El área del trapecio de la zanja A_{zanja} es un valor interesante, pues nos indica los metros cúbicos que albergará el biodigestor, por metro lineal de zanja. La clave por tanto está en dar unos valores adecuados a las dimensiones de la zanja (a , b y p), que nos permite un uso eficiente del plástico. Una primera consideración es que el perímetro del área trapezoidal de la zanja siempre debe ser menor a la circunferencia del plástico, ya que este tendrá que recorrer todo el perímetro y además tener un sobrante para formar la cúpula de biogás (Martí Herrero, 2019).

Las dimensiones óptimas de a , b y p dependen fuertemente del tipo de suelo donde se vaya a cavar la zanja, ya que esto condicionará la inclinación de talud de las paredes (ángulo α , ver figura 12). Suelos sueltos y arenosos necesitarán taludes de $\alpha = 30^\circ$ a 45° , mientras que suelos más arcillosos estarán con taludes de $\alpha = 7.5^\circ$ a 30° . En algunos casos se puede lograr hacer zanjas sin talud (sin inclinación) por lo que para este caso sería $\alpha = 0^\circ$. Para determinar los a , b y p óptimos de la zanja, por tanto, hay que considerar la inclinación del talud (ángulo α), pero también la circunferencia del plástico que se va a usar. Por ello, en la Tabla 3 se aportan los a , b y p óptimos para diferentes inclinaciones del talud, reportados como la multiplicación de un factor por el radio (r) de la circunferencia (C) del plástico a usar. Además, se aporta el área de la zanja asociada A_{zanja} (calculadas usando la Ecuación 7), el área de la cúpula de biogás $A_{biogás}$, y el área transversal total del biodigestor A_{Total} (todas las áreas en función del radio al cuadrado, r^2). La multiplicación de estas áreas por la longitud de la zanja (del biodigestor) resultará en los diferentes volúmenes (como en la Ecuación 8). Además, se aporta el % de volumen líquido y % de volumen gaseoso respecto al volumen total en cada caso.

Tabla 3: Parámetros de dimensionado de zanjas de biodigestores tubulares a partir del ángulo α y el radio de la circunferencia disponible de manga tubular

α (°) desde vertical	%VL	%VB	a (m)	b (m)	p (m)	A zanja (m ²)	A biogás (m ²)	A total (m ²)
0	88	12	$1.49 \times r$	$1.49 \times r$	$1.57 \times r$	$2.34 \times r^2$	$0.32 \times r^2$	$2.65 \times r^2$
0	83	17	$1.41 \times r$	$1.41 \times r$	$1.57 \times r$	$2.22 \times r^2$	$0.45 \times r^2$	$2.67 \times r^2$
0	80	20	$1.34 \times r$	$1.34 \times r$	$1.57 \times r$	$2.10 \times r^2$	$0.53 \times r^2$	$2.63 \times r^2$
7.5	80	20	$1.23 \times r$	$1.63 \times r$	$1.54 \times r$	$2.20 \times r^2$	$0.55 \times r^2$	$2.75 \times r^2$
15	76	24	$1.02 \times r$	$1.82 \times r$	$1.49 \times r$	$2.12 \times r^2$	$0.69 \times r^2$	$2.80 \times r^2$
30	75	25	$0.72 \times r$	$2.26 \times r$	$1.33 \times r$	$1.98 \times r^2$	$0.66 \times r^2$	$2.47 \times r^2$
45	65	35	$0.43 \times r$	$2.57 \times r$	$1.07 \times r$	$1.61 \times r^2$	$0.86 \times r^2$	$2.34 \times r^2$

La Tabla 3 es aplicable a cualquier circunferencia de plástico disponible. Por lo tanto, solo es necesario elegir el ángulo del talud α de las paredes de la zanja, y calcular los a, b y p más óptimos a partir del radio (r) de la circunferencia del plástico (C).

5.2.5.10. Metodología del diseño de los biodigestores tubulares de polietileno.

El diseño de biodigestores se puede dividir en dos partes:

- Determinación del volumen del biodigestor: Esta parte es común a cualquier tipo de biodigestor, sea tubular o no.
- Dimensiones del biodigestor: Esta parte ya es específica de los biodigestores tubulares

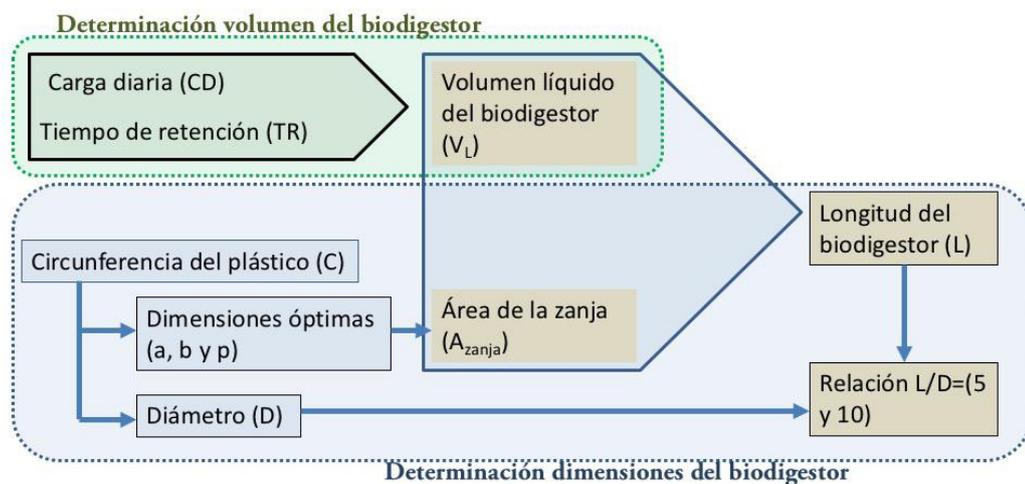


Figura 13: Metodología del diseño de los biodigestores tubulares de polietileno.

5.3. Biogás:

El Biogás es una mezcla de gases cuyos principales componentes son el metano (CH₄) y el dióxido de carbono (CO₂), contando con presencia adicional de nitrógeno, hidrógeno, amoníaco, sulfuro de hidrógeno (generalmente en proporciones menores del 1%); el cual se produce como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire, por la acción de un grupo de microorganismos.

El metano es un gas combustible, incoloro e inodoro más liviano que el aire, su combustión produce una llama azul y productos no contaminantes. La composición del biogás depende del tipo de material orgánico utilizado para su producción y de las condiciones en que se procesa. Es el principal constituyente del gas natural, ya que algunas veces más del 70% de este combustible es metano.

Cuando esta mezcla de gases se produce en forma natural, se llama "gases de los pantanos"; fue descubierto y reportado por Shirley en 1667 y es el responsable de los llamados "fuegos fatuos". Volta fue el primero en reconocer una relación entre el gas de los pantanos y la vegetación en descomposición en el fondo de los lagos.

La composición del biogás depende del tipo de desecho utilizado y las condiciones en que se procesa. En promedio su composición es la siguiente:

Tabla 4: Principales componentes del biogás.

Gases	Fórmula Química	% Producido
Metano	CH ₄	54-70
Dióxido de Carbono	CO ₂	27-45
Hidrógeno	H ₂	1-10
Nitrógeno	N ₂	0.5-3
Ácido Sulfhídrico	H ₂ S	0.1

A pesar de que el ácido sulfhídrico se encuentra en pequeñas cantidades en el biogás, sus efectos son dañinos ya que posee un olor desagradable, en presencia de agua produce efectos corrosivos, cuando se quema es irritante y se convierte en ácido sulfúrico y ácido sulfuroso que son corrosivos. El poder calorífico del biogás es alrededor de 5,975 Kcal/m₃ (CH₄: 70 %). Un metro cúbico de biogás pesa aproximadamente entre 1.08 - 1.1 Kg en condiciones normales.

En la naturaleza se encuentran una gran variedad de residuos orgánicos a partir de los cuales puede obtenerse biogás, entre ellos se encuentran: los desechos provenientes de animales domésticos como vacas, cerdos y aves, excretas humanas, residuos vegetales como pajas, pastos y hojas secas, y basuras domésticas.

El biogás, con su alto contenido de metano, es una fuente de energía que puede usarse para cocinar, iluminar, generar calor, operar maquinaria agrícola, bombear agua o generar energía eléctrica.

El dióxido de carbono no es inflamable y, en condiciones atmosféricas, químicamente estable e inerte. Las reacciones de combustión son inhibidas o completamente suprimidas por el CO₂.

El hidrogeno es muy inflamable, pero en cuanto a su llama son casi invisibles a simple vista y emiten muy poco calor radiante, lo que las hace difíciles de detectar. En el caso del nitrógeno no es inflamable.

5.3.1. Propiedades, uso y almacenamiento del biogás:

El Biogás puede ser utilizado como cualquier otro gas combustible. Mezclas de Biogás con aire en una relación 1:20 forman un detonante altamente explosivo. Se puede usar en motores de gas, en cocinas, en lámparas y refrigeradores. A continuación, algunos ejemplos de su utilización:

- **Motores de gas:** Para la utilización del Biogás en motores no es necesario filtrar el gas. La presión del gas puede ser baja porque los motores succionan el gas. Para hacer uso del Biogás en esta aplicación, la planta de tratamiento debe producir al menos 51 m³/d, por lo que en plantas de pequeña escala no es conveniente usar el gas para accionar motores.
- **Cocinas:** El Biogás no necesita ser purificado y tampoco requiere condiciones particulares de presión, de manera que puede ser tomado directamente del Digestor o del almacenamiento del gas para su uso inmediato. Para esto, existen quemadores de gas especialmente diseñados para su uso con Biogás. Los quemadores de propano se pueden convertir fácilmente para su uso con Biogás, simplemente alargando la cámara de gas.
- **Debido a que la composición y, por lo tanto, las propiedades combustibles del Biogás sufren una amplia variación, es muy difícil diseñar y optimizar un quemador para su producción en serie. La mejor opción es utilizar una mezcla fija de gas – aire que sea conveniente para aplicaciones comunes.**
- **Biogás para iluminación:** El uso de lámparas de Biogás se recomienda como alternativa únicamente para casos en los que no se dispone de electricidad. La presión del gas para la lámpara de Biogás debe ser al menos de 10 mbar. A más alta presión se logra una mejor luminosidad de la lámpara. Una lámpara de Biogás consume entre 120 y 150 litros de Biogás por hora y debe ser instalada lejos de depósitos de paredes y muebles de material combustible.
- **Refrigeradores:** Refrigeradores de gas y kerosene pueden ser convertidos para operar con Biogás. Los datos disponibles para esta aplicación varían ampliamente, existen reportes de operación sin fallas y otros donde se señalan fallas. Un refrigerador consume de 750 a 1800 litros de Biogás por 100 litros de capacidad por día, dependiendo de la temperatura ambiente.

En aplicaciones de mediana y gran escala que corresponden a instalaciones industriales, lo más típico es que se utilice como combustible alternativo en la generación de calor para proceso, desplazando al Diésel, bunker o Gas Licuado derivado del petróleo (GLP). También se utiliza en la generación de energía eléctrica con la utilización de motores especiales para biogás o motores Diesel adaptados para este fin (CABAL, Enero 2014, pág. 8).

Tabla 5: Propiedades Físicas del Biogás.

Equivalentes energéticos en 1m³ de Biogás (60% metano)	
Diésel	0.55 lt
Calor	6.25 KW-hr térmico
Energía mecánica utilizando un motor Diésel	1.8 KW-hr mecánico
Energía eléctrica utilizando un motor generador de Diésel	1.4 KW-hr eléctrico
Cocina doméstica	2.5-5 hr operación

Las tuberías por donde fluye el Biogás pueden estar hechas de acero, cobre, caucho o plástico (PVC). En la práctica, se ha probado que las tuberías de hierro galvanizado y PVC rígido, siendo las más convenientes. Se debe tener presente que las mangueras de caucho se vuelven rápidamente porosas y permeables con los rayos solares. Mientras más larga sea la tubería del gas, mayor será la caída de presión. La tubería del gas debe estar provista de una espita para eliminar el agua de condensación. Se debe tener cuidado con las fugas de gas en las tuberías debido a su calidad de combustible, aunque hasta ahora no se ha informado sobre explosiones peligrosas causadas por el Biogás. Los puntos de debilidad más comunes y que pueden causar pérdidas sustanciales de Biogás son las uniones.

Los requisitos de volumen para el almacenamiento de Biogás dependen principalmente de la producción diaria del mismo y de su consumo. En el caso de la utilización del Biogás para cocinar, existen diferencias marcadas en los hábitos de cocina en distintas regiones del mundo, por lo que una capacidad de almacenamiento de gas entre 50 % y 70 % de la producción diaria ha sido ampliamente aceptada.

El almacenamiento de gas se hace generalmente en tanques con campana de acero flotante, aunque esto a menudo cause problemas de corrosión. La vida útil de la campana de acero es generalmente de 7 a 10 años, pero puede duplicarse fácilmente si se pinta con regularidad.

El tanque de almacenamiento contiene un anillo de agua en el que flota el depósito móvil de gas en forma de campana flotante. El gas se acumula en la campana haciéndola subir y luego vuelve a bajar cuando se extrae el gas a través de una tubería instalada en la campana misma. Para evitar que la campana se ladee, se construye un soporte de hierro como guía. Tiene las ventajas de su fácil manejo, proporciona una presión de gas constante y el gas almacenado es visible a través del nivel de la campana.

5.3.2. Consumo de Biogás

En el caso en el que se quiere hacer uso de una cantidad específica de biogás, habrá que calcular cuánto biogás se requiere por día para los usos seleccionados (ver Tabla 6). Conocida la cantidad de biogás necesaria, se puede estimar cuanto estiércol es necesario para producir esa cantidad de biogás (ver tabla 15). En este caso ya habrá que definir a que temperatura de trabajo estará en biodigestor y el tiempo de retención. Conocido entonces el estiércol diario necesario para producir una cantidad de biogás determinada, y aplicando la relación estiércol: agua (1:4), se obtiene la carga diaria del biodigestor.

Tabla 6: Consumos típicos de biogás para diferentes elementos.

Uso de Biogás	Consumo de biogás por hora (L/h)
Cocina doméstica	300
Cocina Industrial	450
Calefactores lechones	300
Lampara (equivalente a 60W)	120
Olla arrocera (2L)	140
Calefatón de agua (14KW)	2500
Calefatón (26KW)	5000
Refrigeradora (100 L)	30 (en zona fría)
	75 (en zona caliente)
Motor < 5hp (por cada 1hp)	400
Motor > 5hp (por cada 1hp)	250
Ordeñadora (15 hp)	2500
Generador (1.2 KW)	600
Generador (3 KW)	1200
1 KWh eléctrico (5-20 KW)	1600

5.3.3. Cálculo de volumen de biogás a diferentes presiones y temperaturas

El cálculo del volumen del biogás para diferentes presiones y temperaturas se realiza en base a la siguiente ecuación.

Ecuación 9

$$V = \frac{RT}{P}$$

En donde:

R = constante ideal de los gases (0.08206 L.atm/mol. K)

T = temperatura en grados Kelvin (273.16 + T°C)

P = presión en mm Hg.

5.4. Caracterización del estiércol:

Según el autor urbano citado por (Moreta Criollo, 2012-2013); el estiércol natural o de cuadra está formado por las excreciones sólidas y líquidas del ganado, mezcladas con los materiales que le sirven de cama. El conjunto constituye un producto que empieza a descomponerse en el alojamiento del ganado y cuya fermentación continúa en el estercolero. De acuerdo con el estado de descomposición que presentan sus constituyentes, suelen considerarse los siguientes tipos:

- Estiércol fresco: Aquellos en que la fermentación no ha hecho más que empezar y aún pueden identificarse en él las camas y las excreciones.
- Estiércol semi-hecho: Presentan un estado intermedio de descomposición y, aunque aún es posible distinguir sus componentes, ya se encuentra porciones en que esta identificación no puede hacerse con facilidad.
- Estiércol maduro: Muy fermentado; la cama no puede identificarse pues se han descompuesto totalmente

La materia prima para la producción de biogás es el estiércol fresco. Se pueden considerar otro tipo de residuos orgánicos, pero en ningún caso residuos duros (con cascara dura) o de larga duración de descomposición (como vísceras). El estiércol que mayor cantidad de biogás produce es el de cerdo y el humano, pero el fertilizante que producen es muy ácido, además de que en el caso humano hay tener otras consideraciones como se verá en el correspondiente apartado. El estiércol más equilibrado es el de vaca, además que por animal se produce gran cantidad de estiércol, y por tanto es el más fácil de recoger.

5.4.1. Cantidad de excretas producidas de acuerdo a función zootécnica.

El exceso de nitrógeno (N) por encima de los requerimientos necesario de las plantas se convierte en un riesgo de contaminación de aguas. Las excretas solidas de cerdo pueden contener 22 kg de Nitrógeno (N), 15 kg de fósforo (P), y 10 kg de potasio (K) por tonelada, el contenido de humedad de la excreta está alrededor del 88%; el contenido de materia seca es hasta el 12%. Cerca del 90% de los sólidos se excretan en las heces; la orina contiene el 10% de los sólidos, el total de los sólidos tiene una densidad baja de 0.84 kg/l. La excreta porcina contiene sólidos que flotan y sólidos que se sedimentan, además de sólidos en suspensión.

Tabla 7: Producción de excretas según el estado fisiológico de los cerdos.

Etapa animal	Peso (Kg)	Producción de excretas (L/día)	Sólido totales (Kg/día)	Sólidos Volátiles (Kg/día)	N (Kg/día)	P (Kg/día)	K (Kg/día)
Cría	2	1	0.09	0.08	0.01	0.01	0.01
Recría	4	1.8	0.18	0.14	0.01	0.01	0.01
Engorde	50	4.3	0.41	0.33	0.03	0.02	0.02
Gestación	30	4.2	0.37	0.30	0.03	0.02	0.02
Maternidad	100	15.1	1.36	1.09	0.10	0.08	0.08
Varraco	50	5.3	0.45	0.39	0.04	0.03	0.03

5.4.2. Estiércol de cerdo

El alimento casi siempre acuoso que se da al cerdo hace que igualmente su estiércol tenga una gran cantidad de agua, por este motivo, se le clasifica entre los abonos frescos. Generalmente al ser alimentados con granos, papas, restos de maleza, sobras de la cocina, etc., hace que su estiércol sea muy bueno para procesos de degradación anaerobia con producción de gas. El estiércol de cerdo con frecuencia contiene altas concentraciones de cobre Cu y zinc Zn comparado con heces de otras especies, debido a que el Cu se adiciona a las raciones, con el fin de aumentar las ganancias de peso y la conversión alimentaria de cerdos de engorde, mientras que el Zn se utiliza para contrarrestar el potencial de toxicidad del Cu, sin embargo la presencia de estos dos minerales es beneficioso para su uso como abono en los cultivos (Yauyo Ramos, 2016).

5.4.3. Porquinaza:

La Porquinaza está formada por heces fecales y orina mezclados con el material utilizado como cama, residuos de alimento, polvo, otras partículas y una cantidad variable de agua proveniente de las labores de lavado (sin detergentes) y pérdidas desde los bebederos durante la crianza de los cerdos.

Tabla 8: Distintos posibles sustratos con sus respectivos contenidos secos y húmedos.

Materiales	Contenido Seco (%)	Contenido hídrico (%)
Paja de Arroz	83	17
Paja de trigo seca	82	18
Tallo de maíz	80	20
Pasto verde	24	76
Excretas Humanas	20	80
Estiércol de Cerdo	18	82
Estiércol de Vaca	17	83
Orina humana	0.4	99.6
Orina de Cerdo	0.4	99.6
Orina de Vaca	0.6	99.4

5.4.4. Estiércol diario y estiércol disponible:

El estiércol diario se refiere a la cantidad de estiércol que se genera en la granja, independientemente de si los animales están estabulados o no. Este valor sirve para tener una idea del potencial de biogás y biol, y poder estimar cuanto de ese estiércol diario será estiércol disponible para ser cargado al biodigestor. En el caso de cerdos estabulados en corral, lo normal, es que el estiércol diario producido por estos sea el mismo que el estiércol disponible. Lo primero es conocer qué cantidad de estiércol se produce cada día en la granja.

5.4.4.1. Estiércol diario:

Para conocer el estiércol diario se puede hacer uso de la siguiente tabla donde se muestra la cantidad de estiércol diario producido por cada 100 kg de peso vivo para diferentes tipos de animales domésticos

Tabla 9: Producción de estiércol diario por tipo de animal.

Animal	Kg de estiércol diario por cada 100Kg de peso vivo
Vaca	8
Cerdo	4
Cabra/Oveja	4
Conejo	3
Caballo	7
Humano Adulto	0.4
Humano Niño	0.2

5.4.4.2. Estiércol disponible:

El estiércol disponible es aquel que podemos cargar al biodigestor. De este modo, el estiércol disponible siempre será menor o igual al estiércol diario. De todo el estiércol diario que producen los animales ¿cuánto está disponible para cargar el biodigestor? En el caso de los cerdos estabulados en corral con piso de cemento serán iguales, ya que todo el estiércol producido se puede cargar fácilmente en el biodigestor. En el caso de las vacas es diferente, pues en la gran mayoría de casos están semi estabuladas, y por tanto hay una parte de estiércol que se queda en los potreros y pastizales que difícilmente puede ser aprovechada para cargar el biodigestor. Así, para conocer la cantidad de estiércol disponible es necesario saber cuántas horas estarán animales estabulados, o recogidos en un lugar cercano al biodigestor, donde sea fácil recoger el estiércol. Puede ser que los animales (en el caso de las vacas) solo duerman cerca de la casa a la noche. En este caso se considera que las vacas depositaran en ese lugar el 25% del estiércol que producen a lo largo día. Si solo están unas horas estabuladas (por ejemplo, en sala de espera y/o ordeño) se debe considerar el % de horas que están en esos lugares, y este será el % del estiércol diario que será disponible. En la siguiente tabla se resume como calcular el estiércol disponible a partir del estiércol diario, en diferentes casos.

Tabla 10: Cálculo de estiércol disponible.

Caso	Estiércol Disponible
Estabulados	=Estiércol Diario
Estabulados solo en la noche	=0.25 x estiércol diario
Estabulado un N° de horas	= (N° horas estabulado/24 Horas) x estiércol diario

5.4.4.3. Mezcla con agua:

Una vez conocido el estiércol disponible que puede entrar al biodigestor hay que considerar con qué cantidad de agua hay que mezclarlo como mínimo. En los biodigestores tubulares se trata de conseguir que la carga de entrada al biodigestor (la mezcla de estiércol y agua) tenga entre 7% y 9% de sólidos totales (ST). Este es el rango deseable, pudiendo meter cargas con menor % de sólidos totales, pero no es recomendable con valores mayores. A modo de referencia se puede decir que el estiércol de vaca hay que mezclarlo 1:3 con agua (1 parte de estiércol con tres de agua), y el de cerdo 1:4, como se ve en la Tabla 11 (Martí Herrero, 2019).

Tabla 11: Mezcla con agua para la carga diaria.

Estiércol	Relación estiércol: agua
Vaca	1:3
Cerdo	1:4
Llama/Oveja/Cuy	1:8-9

5.4.4.4. Carga diaria al biodigestor:

La carga diaria es la cantidad de estiércol y agua mezclados que entrarán al biodigestor cada día. Normalmente se expresa en litros de carga por día (l/d). Para los cálculos se hace una equivalencia entre 1 kg de estiércol y 1 litro de estiércol, asumiendo que el estiércol, sea el que sea, tiene densidad de 1 kg/l. De este modo, si se conoce el estiércol disponible, y la mezcla con agua idónea, se tiene la carga diaria. En el caso de estiércol de vaca la carga diaria estará compuesta por un 25% de estiércol y 75% de agua, habiendo tres litros de agua por cada kg de estiércol. En el caso del estiércol de cerdo la carga diaria estará compuesta por un 20% de estiércol de cerdo y 80% de agua, habiendo cuatro litros de agua por cada kg de estiércol de cerdo. De esta forma hay que considerar que la carga diaria será el volumen que entre al biodigestor (la suma de estiércol y agua) y será un parámetro clave para el dimensionado del biodigestor. Pero para determinar la cantidad de biogás que se producirá lo importante es el estiércol disponible, la cantidad de kg de estiércol presentes en la carga diaria (sin considerar el agua).

Para el abastecimiento de agua la porqueriza González cuenta con el suministro de agua de pozo de unos 20,000 litros de capacidad lo cual favorece para la preparación de la mezcla y economía de la familia.

Para el buen funcionamiento del biodigestor la cantidad de materia prima debe ser lo suficiente como para producir el gas.

Cabe señalar que, para un tiempo de retención de 30 días, cada día se carga 1/30 del volumen total del digestor, y en promedio los residuos orgánicos y la masa microbiana permanecen 30 días dentro del sistema. La cantidad de biogás producido por un digestor dependerá, entre otros, de la cantidad de residuo cargado diariamente. Generalmente se trabaja con tiempos de retención entre 20 y 55 días y con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico de digestor. Por lo tanto, mientras menor sea el tiempo de retención, el tamaño del digestor se reduce y también los costos (Martí Herrero, 2019).

5.5. Ejemplos de cálculos sobre biodigestores tubulares de polietileno.

Por ejemplo, para alimentar una cocina familiar se considera que es necesario un mínimo de 1000 litros de biogás al día. Si además se quiere tener encendida una lámpara de biogás 3 horas cada noche, se requerirán $(120 \text{ l/h} \times 3 \text{ h}) = 360$ litros más cada día, haciendo un total de 1360 l de biogás por día. De este modo, conociendo la cantidad de biogás deseado, se puede saber cuánto estiércol es necesario para producirlo (ver Tabla 15).

Si la temperatura de trabajo del biodigestor es $(23-27 \text{ }^\circ\text{C})$ se tiene estiércol de cerdo, bastará con dar 35 días de tiempo de retención (ver Tabla 15) y cada kilogramo de estiércol producirá 61 litros de biogás. Por tanto, para producir 1,360 litros de biogás será necesario disponer de $(1,360 \text{ l} / 61 \text{ l/kg}) = 22.3 \text{ kg}$ de estiércol de cerdo.

Aproximando de nuevo hacia arriba, se tiene que los 23 kg de estiércol de cerdo necesitarán al menos una relación 1:4 estiércol: agua (ver Tabla 11), por lo que se adicionarán 92 litros de agua, dando una carga diaria de 115 litros.

Con estos valores se obtiene que es necesario un biodigestor con un volumen líquido de $(115 \text{ l/d} \times 35 \text{ d}) = 4,025 \text{ l}$; o sea, 4.025 m^3 . (Ver ecuación 1)

5.6. Cálculos de las dimensiones del biodigestor tubular de polietileno.

El procedimiento a seguir para los cálculos de las dimensiones de un biodigestor es:

- 1) Conocer el volumen líquido del biodigestor requerido, $V_L = TR \times CD$ (ver ecuación 1)
- 2) Conocer el volumen total, $V_T = V_L + V_B$ (ver ecuación 2)
- 3) Dimensiones de la zanja, $A_{Zanja} = p \times (a + b)^{\frac{1}{2}}$ (ver ecuación 7)
- 4) Volumen de la zanja $V_{Zanja} = V_L = A_{Zanja} \times L$; longitud de la zanja $L = \frac{V_L}{A_{Zanja}}$ (ver ecuación 8)
- 5) Dimensiones del plástico; circunferencia $C = 2 \times \pi \times r$, (ver ecuación 3); diámetro $D = 2 \times r$, (ver ecuación 4)
- 6) Considerar relación óptima longitud diámetro $L/D = 7.5$ y aceptable $L/D = 5$ a 10 ; Si varios biodigestores quedan en el rango de L/D entre 5 y 10, se puede elegir el que tenga una relación más próxima a 7.5.
- 7) Definir el talud de la zanja, ver tabla 3

Los ejemplos anteriores habían conducido a un biodigestor de 5.85 m³ alimentado con estiércol de vaca, y a otro de 4.025 m³ alimentado con estiércol de cerdo. Para comenzar a determinar las dimensiones de la zanja y el biodigestor el primer parámetro a considerar es la inclinación del talud de la zanja. Supongamos para ambos ejemplos un talud con una inclinación (desde la vertical) de $\alpha=7.5^\circ$. Además, consideremos que tenemos disponible en el mercado plásticos tubulares de 1.5, 2 y 2.5 m de ancho de rollo. Lo primero será consultar la Tabla 3 para conocer los a, b y p óptimos para un talud de $\alpha=7.5^\circ$. Consultando la Tabla 3 se ve que para este caso $a=1.23 \times r$, $b=1.63 \times r$ y $p=1.54 \times r$. Por lo tanto, para conocer a, b y p es necesario trabajar en función del radio (r) de las circunferencias disponibles, usando la Ecuación 3 ($r=C/(2 \times \pi)$). En este caso será que para una C=3 m se tiene $r=0.48$ m, para C=4 m $r=0.64$ m y para C=5 m $r=0.80$ m (Martí Herrero, 2019).

Si se introducen los valores de los radios (r) de las diferentes circunferencias a partir de aquí, es necesario conocer que volumen líquido tiene el biodigestor que se desea dimensionar.

Comenzando por el biodigestor de cerdos de 4.025m³ de volumen líquido (VL), usando la Ecuación 8 ($L=VL/A_{zanja}$) se podrá determinar la longitud del biodigestor para cada circunferencia disponible, y con este largo y el diámetro, estimar la relación L/D.

Tabla 12: Cálculo de las dimensiones para biodigestor con estiércol de cerdo.

α (°)	C (m)	r (m)	a (m)	b (m)	p (m)	A _{zanja} (m ²)	L (m)	D (m)	L/D
7.5	3	0.48	0.59	0.78	0.74	0.50	8.02	0.95	8.40
7.5	4	0.64	0.78	1.04	0.98	0.89	4.514	1.27	3.54
7.5	5	0.80	0.98	1.30	1.23	1.39	2.89	1.59	1.81

En este caso, para un biodigestor de 4.025 m³, teniendo un talud de $\alpha=7.5^\circ$ y circunferencias de plástico disponible de 3, 4 y 5 m, el plástico a usar será el de C=3m, ya que es el único que ofrece una L/D entre 5 y 10 (8.40). De este modo, la zanja tendrá $a=0.60$ m, $b=0.80$ m y $p=0.75$ con 8.02 m de longitud.

Para el biodigestor alimentado de estiércol de vaca de 5.85 m³, con los mismos plásticos disponibles, la tabla construida será como sigue:

Tabla 13: Cálculo de las dimensiones para biodigestor con estiércol de vaca.

α (°)	C (m)	r (m)	a (m)	b (m)	p (m)	A _{zanja} (m ²)	L (m)	D (m)	L/D
7.5	3	0.48	0.59	0.76	0.74	0.50	11.65	0.95	12.20
7.5	4	0.64	0.78	1.04	0.96	0.89	6.55	1.27	5.15
7.5	5	0.80	0.98	1.30	1.23	1.39	4.19	1.59	2.64

En este caso el plástico de circunferencia de 4 m es el único que da una L/D entre 5 y 10, pero con un valor muy cercano a 5 realmente se encuentra en el límite de dejar de ser considerado biodigestor tubular. En este caso, siendo que la longitud requerida es de 6.55 m, una opción es prolongar un poco dicha longitud hasta 7 m, de modo que la L/D aumente hasta 5.5. Al aumentar la longitud del biodigestor estará aumentado el volumen líquido hasta $0.89 \text{ (m}^2\text{)} \times 7 \text{ (m)} = 6.25 \text{ m}^3$. De este modo también aumentará el tiempo de retención, que como la carga diaria era de 117 l/d, se tendrá que el nuevo tiempo de retención es de $6,250 \text{ (l)} / 117 \text{ (l/d)} = 53.4$ días.

La digestión anaerobia, es una forma de generar energía de gran aprovechamiento y fácil implementación en especial para las zonas rurales o sectores que cuenten con disponibilidad de residuos orgánicos, puesto que no sólo se hace uso del gas producido, sino que el biofertilizante que se obtiene como subproducto en la degradación de la materia orgánica mejora la disponibilidad de nutrientes para los cultivos, permitiendo una producción a bajo costo sin sobrecarga de sustancias químicas para el suelo.

El producto de mayor interés en el proceso de digestión anaerobia es el biogás, el cual, es una mezcla de gases constituido principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2) y sulfuro de hidrógeno (H_2S).

El Biogás es una forma de energía no convencional de gran aplicación a nivel mundial y que empieza a ser de gran interés en su desarrollo en Nicaragua, ya que contribuye al abastecimiento energético y a la disminución de gases efecto invernadero, y que se puede emplear como energía lumínica, combustible para motores y como suplente de gas natural para la cocción de alimentos.

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de líneas renovables para la generación de energía como: Bioenergía a partir de biomasa, Energía eólica y Energía solar, entre otras. El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía.

Son diversos los procesos que se pueden llevar a cabo a partir de la biomasa, estos se conocen como procesos térmicos y biológicos. Los primeros comprenden la gasificación y pirólisis, que se caracterizan por ser procesos con un contenido de humedad menor al 15%, los segundos integran la digestión anaeróbica y la fermentación alcohólica, y se realizan a partir de biomasa húmeda (mayor al 60%).

El manejo y aprovechamiento de residuos sólidos generados en las labores de la humanidad, juega un papel importante en esta forma de energía, por lo que además de ser aprovechados, se estarían disminuyendo las enfermedades que pueden ocasionar los malos olores producidos por la descomposición de estos, por tal motivo es válido afirmar que la digestión anaerobia es crucial para el control de la contaminación y para la generación de valiosos recursos (ENERGÍA, 2011).

5.7. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄) con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus percursores. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose solo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema anaeróbico.

5.7.1. Etapas del proceso de digestión anaerobia

La producción de biogás mediante la digestión anaerobia contempla las siguientes cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, las cuales se explican a continuación.

5.7.2. Hidrólisis.

La hidrólisis es la primera etapa en el proceso de digestión anaerobia, y consiste en el rompimiento de enlaces de las macromoléculas más complejas como los polisacáridos, proteínas y lípidos por la acción de enzimas extracelulares producidas por las bacterias hidrolíticas, allí los lípidos se transforman en ácidos grasos de cadena larga y glicerina por la acción de la enzima lipasa, las proteínas son hidrolizadas por proteasas en péptidos y aminoácidos, y los polisacáridos son convertidos en monosacáridos. Los productos de esta reacción son moléculas de bajo peso molecular como azúcares, ácidos grasos y compuestos relacionados, que son adecuados como fuente de energía y carbono celular.

5.7.3. Acidogénesis.

En esta etapa, los compuestos obtenidos por la acción de las bacterias hidrolíticas son fermentados por bacterias acidogénica dando lugar a ácidos grasos con bajo número de carbonos como el ácido acético, fórmico, propiónico y butírico, así como compuestos reducidos como el etanol, además de hidrógeno y dióxido de carbono.

5.7.4. Acetogénesis.

Los productos de la fermentación son oxidados a acetato, hidrógeno y dióxido de carbono por la acción de bacterias facultativas, llamadas acetogénicas, formadoras de ácido. Al igual que en la etapa anterior, las bacterias acetogénicas requieren de control en la formación de hidrógeno, debido a que una alta concentración de este elemento reduce la tasa de formación de acetato produciendo ácido propiónico, ácido butírico o etanol en vez de metano (Bernal Patiño & Suárez Ramirez, 2018, pág. 25).

5.7.5. Metanogénesis.

Las bacterias metanogénicas (estrictamente anaerobias) convierten el acetato a metano y dióxido de carbono, o reducen el dióxido de carbono a metano. Estas transformaciones involucran dos grupos metanogénicos, el primero es el de las “bacterias metanogénicas aceto-clásicas” (1) y el segundo es el de las “bacterias metanogénicas hidrógeno-tróficas” (2), que son los encargados de llevar a cabo las transformaciones mencionadas anteriormente.

Las siguientes son reacciones químicas de la metanogénesis:



A continuación, una indicación de las bacterias que intervienen en el proceso metanogénico (figura 14):

Los números indican la población bacteriana responsable del proceso:

1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

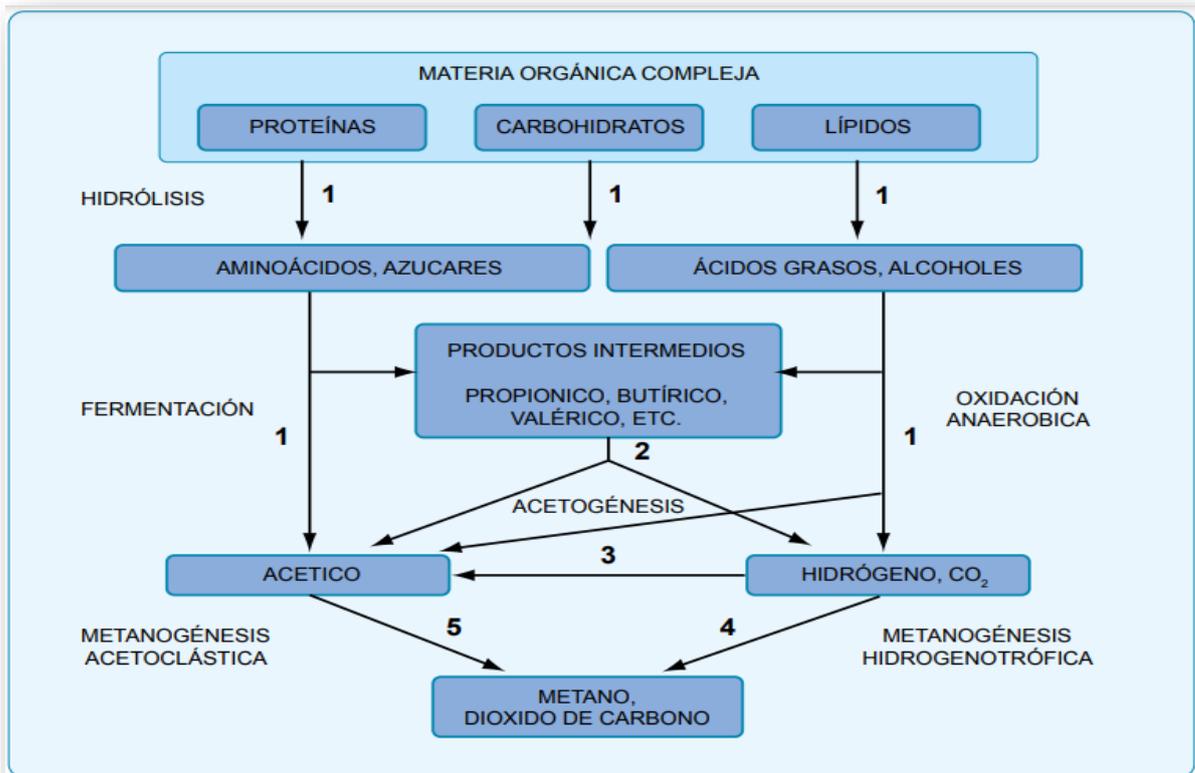


Figura 14: Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos.

5.7.6. Condiciones para el crecimiento de los microorganismos.

Todas las comunidades de organismos, como los metanógenos, crecen en un patrón similar al esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos. Es decir, la mayoría de bacterias, si se les da un suministro amplio de comida, el espacio suficiente para expandirse y no existen depredadores u organismos competidores, se reproduce por un proceso asexual relativamente simple llamado fisión binaria: cada célula aumenta de cantidad y se divide en dos células, es decir, aumenta el número de células en forma exponencial. El tiempo de retraso (lag time en inglés) se produce cuando los organismos se están aclimatando a su entorno. Durante la fase de crecimiento exponencial, la comida no es un limitante y la población se expande rápidamente. Durante la fase estacionaria, la comunidad de microorganismos ha llegado a los límites de su fuente de alimento.

En este punto el número de células se mantiene casi constante, lo que no quiere decir necesariamente que la reproducción se ha detenido, sino que la tasa de muerte se aproxima a la tasa de reproducción.

El intervalo de tiempo necesario para que una célula bacteriana se divida o para que una población de éstas se duplique, durante el crecimiento exponencial, es llamado tiempo de reproducción o generación. Los tiempos de generación de especies bacterianas que crecen en la naturaleza pueden ser tan cortos como 15 minutos o tan largo como varios días. Esto debido a limitaciones en el crecimiento, por ejemplo, por la limitación del sustrato (alimento) disponible o por la presencia de tóxicos o inhibidores de estas reacciones biológicas. “La belleza de la digestión anaeróbica es que es obra de una comunidad mixta de organismos. El producto tóxico final de una comunidad es el suministro de alimentos de otro. Las bacterias formadoras de ácido consumen los azúcares simples que podrían inhibir las comunidades hidrolíticas”. Los metanógenos utilizan los ácidos formados durante la fermentación para producir metano CH_4 y dióxido de carbono CO_2 . (Arrieta, 2016)



Figura 15: Curva generalizada del crecimiento microbiano.

5.7.7. Microorganismos presentes en la digestión anaerobia

Debido a la diversidad de géneros que presentan los microorganismos es importante especificar las especies que participan en cada una de las fases de la digestión anaerobia (ver Tabla 14).

Tabla 14: Microorganismos presentes en cada una de las fases.

Fase	Género
Hidrólisis	Bacteroides, Lactobacillus, Propioni- bacterium, Sphingomonas, Sporobacterium, Megasphaera, Bifidobacterium, entre otros.
Acidogénesis Acetogénesis	Clostridium, Paenibacillus y Ruminococcus, Cytophaga Flavobacterium-Bacteroides, entre otros.
Metanogénesis	Especies principales: Methanobacterium, Methanospirillum hungatii, y Methanosarcina.

5.7.8. Beneficios ambientales de la biodigestión anaeróbica

Al igual que el gas natural, el biogás tiene una amplia variedad de usos, pero al ser un derivado de la biomasa, constituye una fuente de energía renovable. Existen diversos beneficios derivados del proceso de conversión de residuos orgánicos en biogás.

La presión económica sobre los productos agrícolas convencionales se encuentra en continuo aumento. Muchos agricultores se ven obligados a renunciar a su producción, principalmente debido a que sus tierras no presentan rendimientos rentables. Sin embargo, en muchos países la producción de biogás se encuentra subvencionada o presenta incentivos económicos, proporcionando a los agricultores un ingreso adicional. Por lo tanto, en el sector agrícola, la implementación de tecnologías de digestión anaeróbica puede permitir obtener importantes beneficios económicos, ambientales y energéticos. Por otra parte, permite una gestión mejorada de nutrientes, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a la captura y uso de biogás.

Cuando los residuos orgánicos se someten a una degradación aeróbica, se generan compuestos de bajo poder energético como dióxido de Carbono CO₂ y agua H₂O. Gran parte de la energía se pierde y se libera a la atmósfera. Se estima que la pérdida de energía de un proceso aeróbico es aproximadamente veinte veces superior al de un proceso anaeróbico.

En el caso de la degradación anaeróbica, se generan productos del metabolismo con alto poder energético (por ejemplo, alcoholes, ácidos orgánicos y metano), los cuales sirven como nutrientes de otros organismos (alcoholes, ácidos orgánicos), o bien son utilizados con fines energéticos por la sociedad (biogás).

Otro beneficio ambiental importante de las plantas de biogás es la significativa reducción de la presión sobre los rellenos sanitarios. De esta forma se reducen significativamente los costos de la disposición de residuos orgánicos, e incluso se obtienen subproductos con valor agregado. Además, el tratamiento anaeróbico de los residuos orgánicos contribuye a la protección de las aguas subterráneas, reduciendo el riesgo de lixiviación de nitratos. Por otra parte, la digestión anaeróbica elimina el problema de emisión de olores molestos, como, por ejemplo, el olor a amoníaco, producto de la acumulación de excretas y orina sin tratar.

La promoción e implantación de sistemas de producción de biogás colectivos varias granjas, y de codigestión-tratamiento conjunto de residuos orgánicos de diferentes orígenes en una zona geográfica, usualmente agropecuarios e industriales permite, además, la implantación de sistemas de gestión integral de residuos orgánicos por zonas geográficas, con beneficios sociales, económicos y ambientales.

La digestión anaerobia se puede llevar a cabo con uno o más residuos con las únicas premisas de que sean líquidos, contengan material fermentable, y tengan una composición y concentración relativamente estable. La codigestión es una variante tecnológica que puede solucionar problemas o carencias de un residuo, si son compensadas por las características de otro.

El metano es un gas que en la atmósfera terrestre contribuye al efecto invernadero. El contenido de metano en la atmósfera se ha duplicado desde la última era de hielo a $1,7 \text{ ml} \times \text{m}^3$ en la actualidad. Este valor se ha mantenido constante en los últimos años. El metano contribuye un 20% al efecto invernadero antropogénico. Entre las fuentes de metano de origen humano, más del 50% corresponde a la ganadería y hasta el 30% provienen a partir del cultivo de arroz (ENERGÍA, 2011).

5.8. Factores que influyen en la digestión anaerobia-control del proceso.

Para que el proceso de digestión anaerobia se lleve a cabo satisfactoriamente es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros:

5.8.1. Tipo de sustrato.

El tipo de sustrato es un factor de suma importancia para el proceso de biodigestión, ya que cada residuo bien sea orgánico (árboles, plantas, desechos animales), agroindustrial (maíz, café, arroz, caña) o urbano (aguas residuales) tiene diferentes composiciones bioquímicas lo cual puede retardar la etapa hidrolítica por la complejidad en el rompimiento de las macromoléculas, sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos.

5.8.2. Velocidad de carga orgánica y tiempo de retención hidráulico.

La velocidad de carga orgánica es la cantidad de residuo cargado con respecto al volumen del biorreactor, y está relacionada con el tiempo de retención hidráulico (TRH), que es el tiempo promedio de permanencia del material orgánico en el biodigestor. Se ha comprobado que el TRH tiene una relación inversa con la temperatura, ya que a mayor temperatura el TRH disminuye, pero es importante aclarar que esto solo ocurre cuando la temperatura es constante. Una mayor temperatura en el reactor no solo implica una disminución en los tiempos de retención requeridos, sino que además los volúmenes de reactor necesarios para digerir un determinado volumen de material son menores (ENERGÍA, 2011, pág. 42).

5.8.3. Temperatura.

La temperatura es uno de los factores más importantes en todo el proceso ya que se encuentra directamente relacionada con cada una de las fases de la digestión anaerobia, afecta la velocidad de reacción de los procesos biológicos y por ende la velocidad de crecimiento de los microorganismos presentes en cada uno.

A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayor producción de biogás. Las variaciones bruscas de temperatura en el digestor pueden dar paso a la desestabilización del proceso, por ello, para garantizar una temperatura homogénea en el digestor, es imprescindible un sistema adecuado de agitación y un control estricto de temperatura.

Una forma simple de aumentar la temperatura de operación y con ello la cantidad de biogás producido, es calentar el agua con la que se va a efectuar la mezcla, por ejemplo, en calentadores solares. En la gran mayoría de los casos los digestores se construyen enterrados para evitar que se pierda mucho calor.

Para el control de la temperatura, se deben instalar sensores al interior del biodigestor, medidor para sensores de redox, pH, temperatura. Las especificaciones de los sensores, deben ser para aguas agresivas.

El proceso se lleva a cabo en un amplio rango de temperaturas, desde 15 hasta 60°C. Sin embargo, para que las bacterias formadoras de metano trabajen en forma óptima, se requiere mantenerlas a temperaturas que oscilan entre 30 y 60 °C dependiendo del tipo de bacterias que se adapten y desarrollen.

Para el desarrollo óptimo del proceso, se distinguen dos rangos de temperatura, el mesofílico de 30 a 40°C y el termofílico de 55 a 60°C.

Rango mesofílico (30-40°C): Las bacterias que se desarrollan en este rango de temperatura se reproducen fácilmente y pueden permanecer activas si no ocurren cambios súbitos de temperatura. La temperatura óptima es de 35°C y la mayoría de los desechos orgánicos se pueden digerir a esta temperatura produciendo biogás.

Rango termofílico (55-60°C). Este rango de temperatura, en el que se produce mayor cantidad de biogás que en el anterior y en tiempos más cortos, en general sólo es usado en las grandes instalaciones a nivel industrial, ya que se requiere de un control muy preciso. Las bacterias termofílicas son muy sensibles a los cambios de temperatura y en pequeños sistemas no resulta factible mantener esta temperatura controlada, especialmente en climas fríos (Mandujano, Félix A., & Martínez, 1981).

La producción de biogás de estiércol depende del valor de temperatura y tiempo de retención al que se encuentre trabajando el consorcio bacteriano. Cada estiércol tiene un potencial de producción de biogás y, para una misma temperatura de trabajo, unos estiércoles pueden producir el biogás más rápidamente que otros. Esto implica que hay que diferenciar de cuando se trabaja con estiércol de vaca o de cerdo. El estiércol de cerdo es más rápido que el de vaca produciendo biogás. La digestión anaerobia realizada por el consorcio bacteriano dentro del biodigestor irá degradando la carga diaria de estiércol poco a poco, a lo largo del tiempo de retención.

Esto significa que, en un biodigestor ya en funcionamiento y estabilizado, el estiércol que entró como carga diaria hace varias semanas ya estará produciendo sus últimos aportes de biogás y estará cerca del final del biodigestor, próximo a salir por rebalse.

Por otro lado, el estiércol que ha entrado en los últimos días en la carga diaria estará comenzando a producir biogás, y aun tendrá varias semanas por delante para seguir cruzando el biodigestor (empujado por las nuevas cargas diarias) produciendo más biogás, hasta llegar al final del biodigestor y salir en forma de biol; por ello, en un biodigestor que está siendo alimentado de forma periódica se tiene estiércol produciendo biogás en todas sus etapas.

Además, cuando se considera el estiércol fresco, se puede encontrar variación en la producción de biogás para un mismo tipo de estiércol debido al tipo de alimentación del animal y a la humedad de estiércol. Por ello, a modo de referencia, en la Tabla 15 a continuación, se muestra la producción de biogás esperable a un tiempo de retención y una temperatura de trabajo, por cada kilogramo de estiércol fresco de vaca, o de cerdo, que entra al biodigestor.

Tabla 15: Producción de biogás según la temperatura y tiempo de retención.

Temperatura de trabajo del Biodigestor (°C)	Estiércol de vaca Fresco		Estiércol de cerdo Fresco	
	Tiempo de retención (d)	Biogás (l/Kg)	Tiempo de Retención (d)	Biogás (l/Kg)
33-37	30	39	25	71
28-32	40	38	30	67
23-27	50	35	35	61
18-22	65	33	50	59
13-17	90	31	65	54
8-12	125	29	90	50

5.8.4. pH.

Es otro parámetro fundamental para el proceso de digestión anaerobia, determina la inhibición o toxicidad de las bacterias y el crecimiento óptimo de cada uno de los grupos microbianos presentes en cada fase. Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH en comparación con la comunidad microbiana aeróbica. Para una buena digestión anaerobia se dice que el valor óptimo debe ser cercano a la neutralidad.

Debido a que los microorganismos son cuerpos que viven a condiciones estrictas es necesario especificar sus rangos de pH. Las bacterias que intervienen en la fase acidogénica, trabajan en un rango óptimo entre 5.5 y 6.5 mientras que las metanogénicas entre valores de 7.8 y 8.2. Para cultivos mixtos se encuentra en el rango entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el ideal (ENERGÍA, 2011, pág. 43).

5.8.5. Humedad.

Como se menciona anteriormente, los procesos biológicos son aquellos que se pueden llevar a cabo partiendo de una biomasa húmeda (porcentaje de humedad mayor al 60%), entre los cuales se encuentran la digestión anaerobia y la fermentación alcohólica. El contenido de humedad de los residuos a tratar es un factor primordial para que se dé inicio al proceso, puesto que asegura un ambiente cómodo para los microorganismos.

5.8.6. Relación C/N.

El sustrato con el cual se alimenta el reactor está constituido principalmente por macronutrientes como carbono (C) y nitrógeno (N), los cuales son indispensables para los microorganismos, ya que son la principal fuente de alimentación sobre todo para las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación más adecuada de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1, como el ideal (Ibid, pág. 35). Cuando no se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para obtener la relación C/N óptima.

5.8.7. Inhibición y Toxicidad.

Entre los factores que alteran el proceso de digestión anaerobia se encuentran: la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV), elevadas concentraciones de nitrógeno, agitación en el medio, la presencia de oxígeno y metales pesados, entre otros. De toda la diversidad de microorganismos presentes en el digestor se conoce a las bacterias metanogénicas como las más intolerantes a cambios en el medio, es por esto, que la fase metanogénica es la que tiende a sufrir mayores cambios por inhibición debido a la toxicidad de los factores ya mencionados. La acumulación de AGV puede evidenciarse por cambios drásticos de pH o temperatura que afecten directamente las tres últimas fases del proceso, causando un rompimiento en la relación que existe entre cada una, dando paso a la acumulación de compuestos como acetato e hidrógeno, desestabilizando el proceso y disminuyendo la producción de biogás. Como se ha mencionado, el nitrógeno es un macronutriente que influye en el crecimiento bacteriano. En la digestión anaerobia el nitrógeno orgánico es transformado en nitrógeno amoniacal, por lo que grandes cantidades de nitrógeno generan altas concentraciones de nitrógeno amoniacal limitando el crecimiento. La agitación evita la formación de nata en la cima del digestor y la sedimentación, contribuyendo a la actividad enzimática y a la distribución uniforme de temperatura en el interior del tanque.

El oxígeno es otro inhibidor del proceso ya que esta última etapa es estrictamente anaerobia, puede causar disminución en la producción de biogás o en la mayoría de los casos pérdida del proceso. Los metales pesados disminuyen la velocidad de crecimiento a bajas concentraciones (ENERGÍA, 2011, págs. 46-51)

5.8.8. Presión.

Conocer los valores de presiones en el biodigestor es de vital importancia tanto para la operación de la instalación como para la seguridad de la misma.

Uno de los puntos de medición de presión está próximo a la boca de extracción de biogás. De acuerdo a las mediciones de presión se controla el compresor de biogás que presuriza la línea de consumo, una válvula de compuerta para la extracción de biogás, la válvula de alimentación de la antorcha y una válvula de seguridad para liberar sobrepresiones. Uno de los inconvenientes presentes en la medición de presión, es que los valores son bajos, del orden de los mbares, con lo que se necesitó instrumentos de medición de buena precisión. El rango de trabajo del medidor de presión está fijado por la detección de los siguientes estados (Jones & José, 2012):

A 10 mbar-----se corta la extracción de biogás.
A 20 mbar-----se habilita la extracción de biogás y el compresor.
A 30 mbar -----se abre la válvula de la antorcha.
40 mbar -----actúan las válvulas de seguridad.

5.9. Caracterización de residuos y evaluación de análisis fisicoquímicos:

Para llevar a cabo un buen proyecto de aprovechamiento energético a partir de biomasa, es importante realizar una caracterización previa de cada residuo que contempla un análisis estructural y fisicoquímico, esto con la finalidad de identificar y establecer cuáles son los desechos que favorecen en la eficiencia del proceso de generación de energía. En esta investigación solo se considera el análisis fisicoquímico, el cual se centra en parámetros como: la relación C/N, pH, el contenido de material volátil (SV), la cantidad de sólidos totales disueltos (ST), la demanda química de oxígeno (DQO) y humedad.

5.9.1. Determinación de % de Sólidos Totales (%ST):

Toda la materia orgánica está compuesta por agua y una fracción sólida; esta fracción es llamada "sólidos totales".

El porcentaje de sólidos obtenidos en la mezcla con que se carga al digestor, es también un factor importante a considerar para asegurar que el proceso se lleve a cabo de forma satisfactoria.

Experimentalmente se ha demostrado que una carga que contenga entre 7% y 9% de sólidos totales es óptima para la digestión.

Para calcular el volumen de agua que debe de ser mezclada con la materia prima para dar con la proporción deseada, es indispensable conocer el porcentaje de sólidos en esta. En el caso del estiércol porcino fresco, que tiene del 17% a 20% de sólidos totales, se deberán agregar de 2 a 4 litros de agua por cada kilogramo de estiércol para así obtener una mezcla de alrededor de 8% de sólidos totales.

Para la determinación de ST, SV y humedad, se realiza un análisis triplicado de cada muestra. Para llevar a cabo este procedimiento se requiere de una mufla que alcance 550°C para esterilizar 9 crisoles, los cuales son dejados durante 1 hora, posteriormente se enfrían durante 15 minutos a temperatura ambiente y finalmente se colocan dentro de un desecador por 15 minutos más. Luego se pesan vacíos, y después se pone en ellos 7 gramos de cada una de las muestras, enseguida, se colocan en la mufla que debe estar inicialmente a 95°C hasta punto de sequedad (3 horas), esto con el fin de evitar salpicaduras, y luego a 105°C, por 1 hora, se dejan enfriar a temperatura ambiente y en el desecador, y por último se pesan.

La determinación de ST se hará por diferencia, respecto al porcentaje de humedad. Posteriormente se determinará el contenido de sólidos volátiles.

5.9.2. Determinación del % de sólidos volátiles (% SV):

Los sólidos volátiles son considerados como la materia que realmente es transformada por las bacterias. Es el peso de los sólidos orgánicos quemados cuando el material seco se enciende.

Para la determinación de los SV al igual que en los ST se requiere esterilizar las capsulas. Para esto, se someten a una temperatura de 550°C en la mufla durante una hora, posteriormente se enfrían a temperatura ambiente y se llevan dentro de un desecador por 15 minutos. Luego se pesan vacíos, y después se pone en ellos 7 gramos de cada una de las muestras previamente diluidas, enseguida, se colocan en la mufla que deberá estar inicialmente a 95°C con el fin de evitar salpicaduras, y luego permanecen durante 40 minutos a 550°C, finalmente se dejan enfriar a temperatura ambiente, en el desecador, y por último se pesan.

Sea aplicará la siguiente formula:

$$\%SV = \frac{\text{Materia Orgánica (g)} - a}{a} \times 100$$

Donde; a: masa en g de muestra seca antes de la calcinación; b: masa en g de la muestra calcinada (Pérez & Estela, Octubre 2015).

5.9.3. Determinación de Humedad:

Este factor se expresa como una relación de masa de agua por masa de materia seca. "Una materia orgánica con porcentajes de humedad superior al 50% puede ser aprovechada energéticamente mediante un proceso bioquímico como la fermentación o la digestión anaerobia. El porcentaje de humedad es uno de los principales parámetros que se debe asegurar para dar inicio al proceso de digestión anaerobia, debido a que las transformaciones biológicas contemplan biomasa húmeda, la cual debe tener un porcentaje de humedad mayor al 60%. Para este caso se usa una relación 1:3-4 de materia seca por masa de agua.

Para calcular el porcentaje de humedad se aplicará la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{(B-A) - (C-A)}{B-A} \times 100$$

Dónde: A= Peso del frasco a peso constante (g); B= Peso del frasco a peso constante con muestra húmeda (g); C= Peso del frasco con muestra seca (g).

5.9.4. Determinación de DQO (Demanda Química de Oxígeno):

La DQO es una medida indirecta del contenido de materia orgánica y compuestos oxidables en una muestra, mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos que hay suspendidos en una muestra líquida y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO_2/L).

Se basa en la oxidación de la materia orgánica por un exceso de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) mediante su digestión Procedimiento Experimental durante 2h a 150°C , midiendo la DQO mediante un espectrofotómetro Hach DR/2010, previamente calibrado. Para análisis de las muestras (2 ml) se utilizan tubos cerrados en los que se introduce volumen de reactivo medido previamente, de forma que es posible conseguir un intervalo de medida entre 0 a 1,500 mg DQO L-1. La elevada DQO de las muestras, hace necesario la dilución de las mismas, para situarlas en el intervalo de concentración. Por su parte para la determinación de la DQO soluble el procedimiento es el mismo que para la DQO total, si bien en este caso es necesario centrifugación previa de la muestra a 3,650 g durante 10 min y la filtración con filtro de fibra de vidrio de $0.45 \mu\text{m}$ (Brahim, Arhoun, 2017).

Un aumento de la carga con materia orgánica disuelta supone un desequilibrio de las tres etapas de la biodigestión. Se produce un aumento rápido en la presencia de ácidos volátiles, la producción de gas se incrementa asimismo rápidamente y el pH disminuye.

Un aumento de la carga con materia orgánica en suspensión provoca un desequilibrio en las tres etapas con un efecto de lavado en las bacterias (salen del reactor con el efluente de salida) se produce un aumento de ácidos volátiles y la producción de gas se incrementa.

5.9.5. Determinación de la relación C/N (Carbono/Nitrógeno):

Para asegurar un buen proceso de digestión anaerobia es importante tener en cuenta la relación C/N de cada sustrato que se desee aprovechar. Como se ha mencionado, estos elementos (carbono y nitrógeno) son considerados como macronutrientes para los microorganismos, siendo el carbono su fuente de energía y el nitrógeno utilizado para la formación de nuevas células, por lo que una buena relación favorece en el crecimiento y actividad bacteriana. Las excretas de animales son ricas en nitrógeno con una relación inferior a 25:1 con lo cual se puede entender, que la etapa de fermentación tiene mayor velocidad de degradación y producción de biogás (Bernal Patiño & Suárez Ramirez, 2018).

La metodología utilizada por el laboratorio para la determinación del porcentaje de nitrógeno y carbono en cada una de las muestras es Kjeldahl (método químico de determinación) y porcentaje de elementos mayores en relación peso a peso, respectivamente.

Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaeróbica, y la cantidad y calidad del biogás producido dependerá de la composición del desecho utilizado.

El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación de las bacterias formadoras de metano; el carbono es la fuente de energía y el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células.

Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima es de 30.

Si no existe suficiente nitrógeno para permitir que las bacterias se multipliquen, la velocidad de producción de gas se verá limitada; al estar presente nitrógeno en exceso, se produce amoníaco, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

Entre las materias primas más utilizadas en la generación de biogás, están los desechos animales, cuya relación C: N es siempre menor que la óptima, debido a que tienen un contenido importante de nitrógeno.

Otro material muy usado son los residuos agrícolas, los que generalmente tiene relaciones C: N muy altas, ya que contienen muy poco nitrógeno, por lo que casi siempre se mezclan con desechos animales o se les agrega un compuesto nitrogenado, como puede ser urea, para acercarse a un balance adecuado de carbono y nitrógeno.

$\% \text{ de Carbono orgánico} = \% \text{ de materia orgánica} / 1.724$

Donde: 1.724= factor de conversión

$C/N = \% \text{ de Carbono Orgánico} / \% \text{ de Nitrogeno total}$

Donde C/N= Relación Carbono Nitrógeno

5.10. Operación y Mantenimiento

Acciones a tomar en cuenta durante la puesta en marcha del biodigestor:

1. Acumular estiércol para el primer llenado durante la etapa de construcción
2. Llenar el digestor de agua después de su construcción,
3. Realizado el primer llenado, no introducir más mezcla hasta pasados quince días ya que las bacterias metanogénicas no aparecerán hasta después de transcurridas las etapas de hidrólisis y acidificación.
4. El tiempo de puesta en marcha puede ser disminuido utilizando como primera carga una proveniente de otro digestor en operación donde ya existe la presencia de bacterias metanogénicas.
5. Dejar abierta la válvula de salida del gas durante el periodo de espera (dejar escapar el aire). De este modo se evitan sobre presión por la acción de cargas de choque (llenado brusco)
6. Una vez transcurrido el periodo de espera, se cierra la válvula de salida y se espera unos días (periodo en el cual se acumula biogás). En este caso de llenado con excretas porcina, la válvula se podrá abrir a las 24 horas.
7. Dejar escapar el gas inicial ya que puede ser explosivo y peligroso, o también no ser combustible por exceso de dióxido de carbono (CO₂).
8. Evitar el contacto de llamas con el gas de escape ya que el metano es un gas combustible.
9. Posteriormente, se cerrará la válvula y cuando la presión suba nuevamente se puede comenzar a utilizar el biogás en la cocción de alimentos.
10. Se empezará a alimentar la planta con la carga regular una vez la mezcla sea desplazada y empiece a salir por el tubo de reboso.

5.10.1. Operación diaria

Para el uso diario del digestor se llevarán a cabo los siguientes pasos:

Primero se llenará el tanque de mezclado con estiércol y agua para preparar la mezcla de entrada al digestor. Las cantidades necesarias de agua y estiércol se indican en la tabla 11.

Para medir el volumen de agua a introducir se puede utilizar algún balde modelo del que se sepa el volumen aproximado y llenarlo tantas veces como sea necesario.

En la tabla 11 se indican la cantidad de agua a utilizar de 622 litros necesarios para la mezcla de entrada. Para medir la cantidad de estiércol a introducir diariamente, se puede tener en cuenta el número de cerdos necesarias para su producción.

5.10.2. Operación semanal, mensual

Por lo menos una vez al mes se deberá comprobar que la trampa de agua no esté llena y si lo está vaciarla y colocarla nuevamente tal y como indica la figura.

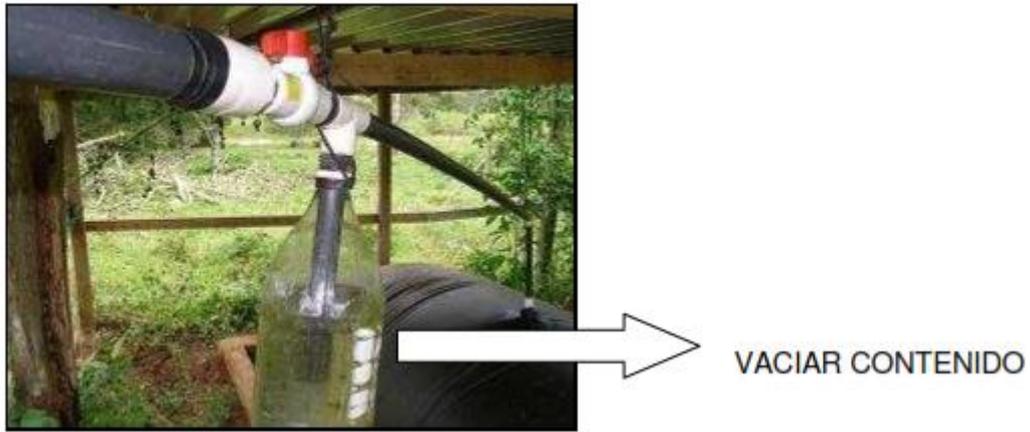


Figura 16: Trampa de agua.

El mantenimiento de la trampa de agua es necesario ya que el biogás generado se produce en un medio acuoso saturado de humedad y si la temperatura desciende durante el trayecto hacia el consumo, el agua puede condensar.

Otra de las tareas a realizar mensualmente es el vaciado y la utilización del biol. Se recogerá el biol de la salida del biodigestor, mediante cubos o se transportará por medio de tubería hacia el campo agrícola, o donde se le dará uso.

5.10.3. Operación anual

Una vez al año se harán inspecciones más rigurosas al digestor, como controlar la permeabilidad al agua y al gas, hacer un test de presión a las válvulas, tuberías y acumuladores de gas y revisar las posibles fisuras del acumulador y repintarlo si es preciso. Los mismos proveedores de los materiales pueden proporcionar información sobre este tipo de inspecciones, incluso los mismos proveedores podrían realizar estas inspecciones anuales.

5.10.4 Mantenimiento

El mantenimiento preventivo del biodigestor, son una serie de acciones que se deberán realizar para asegurar un alto nivel de producción de biogás, el buen funcionamiento y asegurar una larga vida útil.

Por lo que el mantenimiento deberá prevenir las disfunciones operacionales, e intentar detectar las posibles causas en caso de mal funcionamiento para así poder reparar la planta, como se resume en la tabla siguiente. La disfunción más habitual es una insuficiente producción de biogás. Las acciones a realizar de mantenimiento a la planta son las siguientes:

Tabla 16: Posibles causas en caso de mal funcionamiento del biodigestor.

Factor de detección	Causa	Efecto en el funcionamiento y remedio	Remedio
Presión del gas demasiado alta	Consumo menor a la producción, almacenaje lleno.	Mal funcionamiento de la válvula de seguridad	Limpiar o cambiar la válvula de seguridad
Presión del gas demasiado baja	Consumo mayor que la producción o existencia de escapes.	Producción de gas baja.	Detectar la fuga y sellarla
Detección de baja producción de gas	Razones biológicas: temperatura, sustrato, antibióticos, cambio de valor del pH. Atasco en el digestor o en las tuberías.	1. Producción baja de biogás, no puede alimentar la demanda de gas requerida. 2. Mal rendimiento. 3. Obstrucción en tuberías.	1. Comprobar la calidad del biol. 2. Detectar las causas biológicas y equilibrar los parámetros con los establecidos. 3. Comprobar tuberías y desatascarlas
Olor fuerte de fertilizante.	Planta saturada, tiempo de fermentación menor al requerido	Rendimiento menor y malestar de los usuarios	Reducir la cantidad alimentada de sustrato

VI.METODOLOGÍA

6.1 Tipo de investigación:

El enfoque de este trabajo de Tesis es de carácter investigativo aplicado ya que está orientado a la resolución de problemas prácticos y para ello se hace uso del conocimiento teórico alcanzado en la investigación aplicada.

En este capítulo analizamos los parámetros necesarios para proponer el diseño del biodigestor adecuado que cumpla con las necesidades de la empresa “Porqueriza González” y determinar la influencia que tienen las variables sobre la eficiencia de producción del biogás, y plantear la mejor solución para el aprovechamiento del gas.

Materiales para la elaboración del experimento: 16 pichingas de 2.5 galones, 16 válvulas para gas, 5 metros tubo de cobre, 3 metros de teflón, 1 cinta para medir pH, 1 Balanza, 24 pares de guantes de látex.

El siguiente diagrama indica los pasos de las actividades que se desarrollaron para cumplir con los objetivos establecidos en esta tesis:

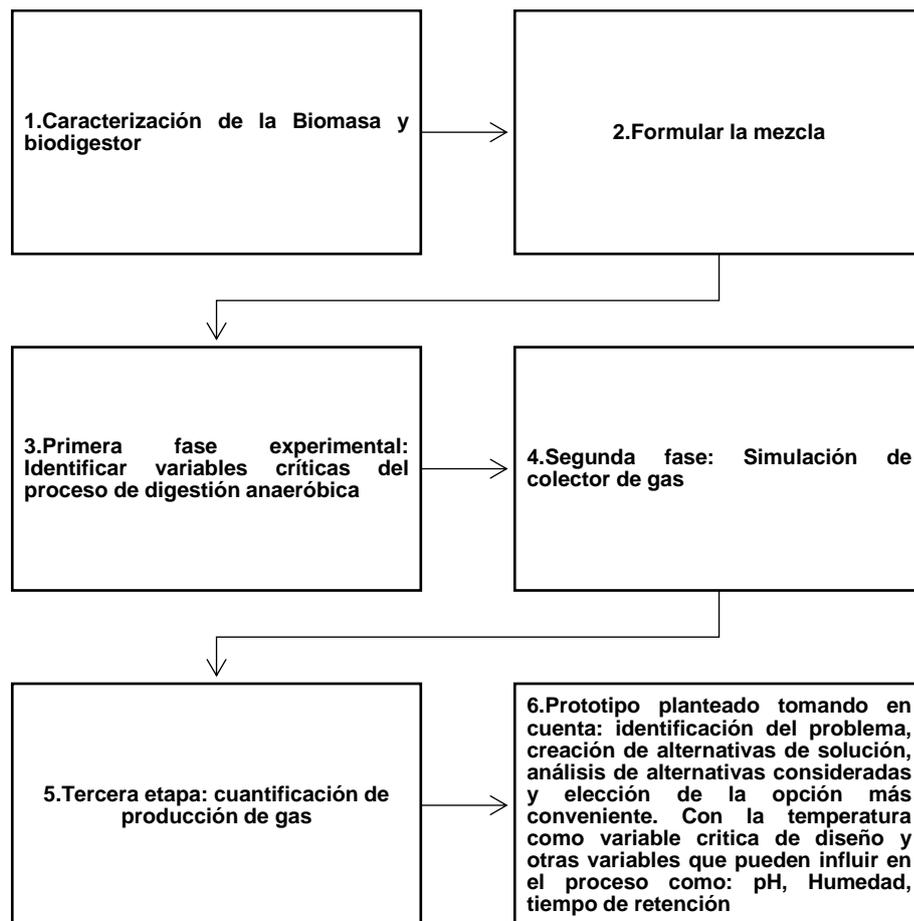


Figura 17: Diagrama de bloques para actividades experimentales-Metodología

1. Caracterización de la Biomasa y biodigestor:

En esta primera etapa conocimos la composición química del estiércol de cerdo, la facilidad de producción de biogás según sus características, la cantidad y calidad de estiércol producido en la granja y cantidad necesaria a utilizar para desarrollar el diseño de experimentos para nuestro estudio.

Se realizaron los cálculos para las dimensiones del biodigestor tubular tomando en cuenta varios factores como: volumen líquido de biodigestor requerido (ver ecuación 1), medidas óptimas de la zanja (ver aplicar ecuación 7), circunferencia y radio de los rollos de polietileno (ver ecuación 3 y 4), cálculo de la longitud de la zanja (ver ecuación 8), cálculo de la relación L/D el ideal es entre 5 y 10 (ver ecuación 5 y 6), talud o ángulo de inclinación (α).

2. Formular la mezcla:

En esta etapa del proyecto de tesis definimos una mezcla óptima, según datos bibliográficos la relación de 1:4, es decir la mezcla que se desarrolló fue 1 kg de estiércol por cada 4 kg de agua. Cabe señalar que cuando hablamos de estiércol porcino nos referimos a la Porquinaza (ver composición de Porquinaza en acápite 5.7.6) y el agua a utilizar es la misma que se utiliza para el lavado o enjuague de los corrales, dicha mezcla se prepara en una de las piletas acá también se realiza el control del pH.

3. Primera fase experimental (identificar variables críticas del proceso de digestión anaeróbica):

En esta etapa realizamos un diseño de experimentos factorial 2^3 en Minitab; en este diseño se definen los 2 niveles de las variables (nivel bajo y nivel alto) y se seleccionan 3 variables las cuales consideramos las más influyentes para el proceso (tiempo de retención, temperatura y pH), se define la variable de respuesta o predictora (cantidad de metano, ver tabla 19 y 20) la cual dependerá de la optimización de las tres variables de entrada o más influyentes en el proceso.

4. Segunda fase experimental (simulación colectora de gas):

Los experimentos se realizan en pichingas (recipientes) como simuladores de biodigestores sin embargo el biodigestor propuesto será de tipo tubular de polietileno. A las pichingas herméticas con válvulas adecuadas se les agrega aproximadamente 10 kg de estiércol por cada una, se toma pH al inicio de la mezcla además de estar controlando la temperatura y el tiempo de retención, después de finalizado el proceso de metanogénesis se toma pH y peso.

5. Tercera fase experimental (cuantificación de producción de gas):

Los experimentos realizados son 16, los cuales se les controla de forma aleatoria el pH, temperatura y el tiempo de retención para posteriormente medir la cantidad de metano producido aplicando la fórmula de regresión generada automáticamente en Minitab (ver tabla 24) o de diferencias de peso; Cantidad de gas = peso inicial del estiércol- peso final del estiércol desgasificado

6. Prototipo planteado (puesta en marcha):

El biodigestor propuesto es del tipo tubular de polietileno el cual trabaja de forma anaeróbica, estos son de bajo costo, fácil mantenimiento y operación, este tipo de biodigestores van acorde a las necesidades de la Porqueriza González, los materiales de construcción son de fácil acceso al mercado nacional.

A continuación, se describen las acciones a realizar durante la puesta en marcha, en la que se toman como ejemplo para el inóculo, estiércol porcino.

1. Preparar 622 litros de mezcla de alimentación con las cantidades necesarias para que tenga una concentración entre el 6% al 9% ST, esto se garantiza con la relación 1:4 en la mezcla y el desarrollo normal del proceso.

2. Medir pH, en caso de ser $\text{pH} < 6$ o $\text{pH} > 9$, corregirlo con el agregado de un ácido (puede ser vinagre) o una base (preferentemente, soda cáustica - Hidróxido de Sodio) en caso de ser necesario, para acercarlo entre 7 a 8. En esta operación hay que ser pacientes y cuidadosos, para no excederse, agregando cada vez cantidades pequeñas del ácido o la base, dando el tiempo suficiente para la homogeneización y mezclando largamente.

3. Dejar transcurrir entre 25 y 30 días verificando la generación de biogás y midiendo una vez a la semana el pH.

4. Una vez cumplido con el tiempo de residencia de degradación de la materia orgánica se procede a realizar la alimentación continua del biodigestor de la siguiente manera:

- Semana 1: 40% de la cantidad correspondiente de diseño.
- Semana 2: 60% de la cantidad correspondiente de diseño.
- Semana 3: 80% de la cantidad correspondiente de diseño.
- Semana 4: 100% de la cantidad correspondiente de diseño.

A medida que se va aumentando la carga del biodigestor, a lo largo de las 4 semanas, verificar valores de pH para que los mismos se encuentren óptimos. Una vez finalizadas estas etapas, se inicia la operación normal (alimentación, mezclado y descarga del biodigestor).

6.2. Lugar de desarrollo

La implementación del biodigestor se llevó a cabo en el km 107 carretera Juigalpa, Chontales, Comunidad San Patricio.

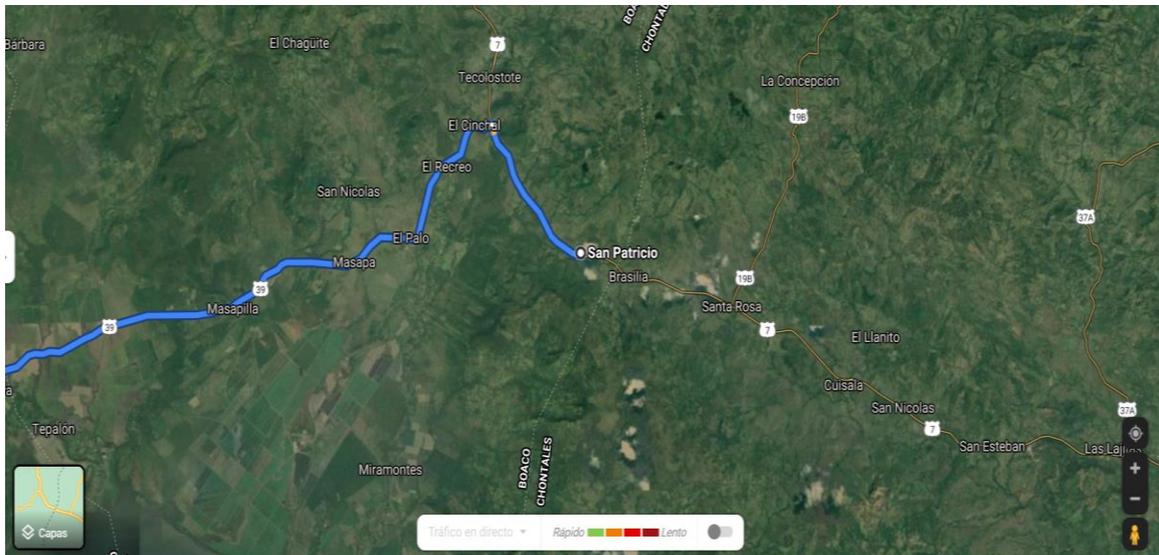
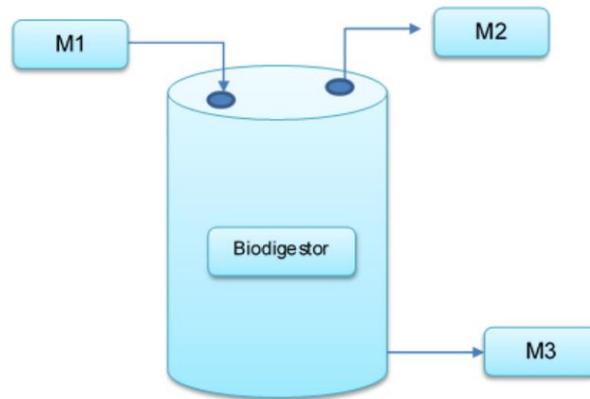


Figura 18: Lugar de desarrollo, San Patricio Chontales

Primeramente, el desarrollo de esta idea se llevó a cabo a partir de una serie de experimentos a menor escala (nivel de laboratorio), durante el proceso e involucramiento del propietario y personal de la empresa se evaluó la aceptación del proyecto, con esto se culminó con una propuesta para la construcción de un biodigestor y así lograr el aprovechamiento del biogás generado de los residuos orgánicos especialmente del estiércol de ganado porcino.

6.3. Balance de materia.

Teniendo en cuenta el porcentaje de materia orgánica seca alimentada se determina la descarga total de lixiviado generada; se plantea el balance de materia partiendo de la ecuación como se muestra a continuación:



$$M1 = M2 + M3$$

Figura 19: Diagrama para el balance de materia.

Donde;

M1= Kg de estiércol (Porquinaza, ver acápite 5.7.6) alimentado al biodigestor

M2= Kg de biogás generado

M3= Kg de biol obtenido

VII.DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño de experimentos se realizó como una serie de pruebas en las cuales se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

En el desarrollo del diseño experimental se pretende realizar pruebas experimentales de acuerdo a las condiciones ambientales u otro factor que afecte la producción del biogás, de tal manera que podamos identificar las variables que puedan influir en el proceso de producción del biogás, así como realizar los cálculos del volumen de alimentación de excretas de acuerdo a la capacidad del biodigestor a escoger, hacer el balance de materia y el cálculo del volumen de biogás que estaría generando el equipo; de esta manera poder proponer el diseño de biodigestor.

Como estudiantes de Ingeniería Química resulta de poco provecho pasar por todo el esfuerzo de montaje del experimento y que este tenga un resultado final demasiado pobre en gas metano. Por esta razón, se decidió utilizar un diseño de experimentos realizado en Minitab para obtener una guía de control del proceso o idea para producir cierta cantidad de gas deseado conforme a las variables de entrada. En este documento presentaremos los detalles del diseño de experimentación para la producción de gas metano.

7.1. Elección de factores de entrada para el diseño del experimento.

Se seleccionaron variables claves que afectan directamente la cantidad producida de biogás (variable de respuesta). Tomando en cuenta las referencias bibliográficas las variables que podrían afectar significativamente la cantidad producida de biogás es el pH de la mezcla, temperatura y tiempo de retención; es por eso que definimos en minitab desarrollar un experimento tipo factorial con 2 niveles (nivel bajo y nivel alto) de las 3 variables anteriormente mencionadas (diseño de experimento factorial 2^3). Por lo tanto, las variables de entrada que se utilizaron en el experimento fueron:

1. Tiempo de retención: 10 a 15 días (nivel bajo y nivel alto)
2. Temperatura del biodigestor: 35 a 45 grados Celsius (nivel bajo y nivel alto)
3. pH de la mezcla: 7.5 a 9.5 de pH (nivel bajo y nivel alto)

7.2. Medida de la respuesta

Para medir la cantidad de gas producido se utilizó una balanza para pesar el recipiente con estiércol (restar peso de pichinga), luego se pesa el recipiente con estiércol ya desgasificado.

Cantidad de gas = peso inicial del estiércol- peso final del estiércol desgasificado (Ver Tabla 24, cantidad de metano en relación con las variables).

VIII. RESULTADOS

A partir del diseño de experimentos propuesto e implementado se observó que los resultados obtenidos en la práctica difieren de manera significativa con respecto a lo que se esperaba

8.1. Propuesta de biodigestor:

Por medio de este estudio de tesis se encontró que el principal problema en porqueriza González es la acumulación excesiva de estiércol depositado libremente en el ambiente, para lo cual se propone el diseño de un biodigestor tubular de polietileno, a fin de utilizar todo el material orgánico producido en el corral y minimizar significativamente el impacto ambiental.

Basados en los resultados del siguiente ejemplo práctico de diseño del biodigestor, para la altura y volumen total del biodigestor para la porqueriza, se puede encontrar en el mercado material para elaborar los tanques tubulares de polietileno de 15.55 m³ de carga líquida que se ajustan a las dimensiones.

Para el diseño se toma en cuenta el tiempo de retención de 25 días, se utiliza material de polietileno para 15,550 litros y 3,110 litros de gas, donde cada día ingresa al tanque 622 litros de sustrato.

8.1.1 Cálculos de las dimensiones del biodigestor para productora (porqueriza) de cerdos González

La productora porqueriza González tiene una granja de cerdos en una región cálida con temperaturas medias de 33 °C. Tiene 6 cerdas madres de 100 kg cada una, 25 cerdos jóvenes de 30 kg cada uno, 32 lechones de 2 kg cada uno, y 30 cerdos listo para venta con 50 kg de peso cada uno. El terreno es arcilloso.

¿Qué biodigestor proponer y cuánto biogás y biol producirá?

En el caso de granjas donde hay animales de diferentes pesos, lo mejor es hacer una tabla, para determinar el estiércol diario, en este caso, la tabla quedará:

Tabla 17: Cálculo para estiércol diario disponible de empresa productora de cerdos
González – Fuente propia con apoyo de bibliografía (Martí Herrero, 2019)

Cerdos	N° de animales	Peso promedio (kg)	Kg de estiércol diario por cada 100kg de peso vivo (kg)	Peso vivo total (Kg)	Estiércol diario (kg)
Madre	6	100	4	600	24
Lechón	25	2	4	50	2
Joven	32	30	4	960	38.4
Venta	30	50	4	1,500	60
TOTAL				3,110	124.4

Fórmulas para calcular el estiércol diario por cada tipo de animal:

$PVT = n^{\circ} \text{ animales} \times PP$; donde PVT = Peso vivo total y PP = peso promedio

$ED = PVT \times \frac{4}{PP}$; donde ED = Estiercol diario

De este modo se tienen 124.4 kg de estiércol diario, que, por estar los cerdos siempre estabulados, también corresponde al estiércol disponible. Por ser estiércol de cerdo, según la Tabla 11, es necesaria una mezcla de estiércol: agua de 1:4.

Por tanto, para calcular la cantidad de agua se tiene que:

$CA = EDT \times 4$; CA = Cantidad de agua ; EDT: estiercol diario total

$CD = EDT + CA$; donde CD = carga diaria.

Por estar en una región cálida (temperatura media ambiente de 33 °C) según la Tabla 1 no se requiere diseño solar cabe señalar que el biodigestor trabajará a esta misma temperatura. Según la Tabla 11, a 33 °C, en el caso de cerdos, se necesitan 25 días de tiempo de retención, con un potencial de producir 71 litros de biogás por cada kg de estiércol de cerdo introducido al biodigestor.

Por tanto, teniendo una carga diaria de 622 litros y un tiempo de retención de 25 días, se tiene que:

$VLB = CD \times TR$; donde VLB = volumen líquido del biodigestor; TR = Tiempo de retención

Es decir; $VLB=15.55 \text{ m}^3$

Conocido el volumen líquido requerido, es momento de darle forma. En este caso el terreno es arcilloso y se va a usar un talud de $\alpha=7.5^{\circ}$. Si se toman todas las dimensiones de plásticos se puede desarrollar la siguiente tabla para este caso, quedando:

Tabla 18: Cálculo de las dimensiones del biodigestor para la empresa productora de cerdos González – Fuente propia con apoyo de bibliografía (Martí Herrero, 2019)

α (°)	C (m)	r (m)	a (m)	b (m)	p (m)	A _{zanja} (m ²)	L (m)	D (m)	L/D
7.5	2	0.32	0.39	0.52	0.49	0.22	77.17	0.64	121.23
7.5	3	0.48	0.59	0.78	0.74	0.50	34.30	0.95	35.92
7.5	4	0.64	0.78	1.04	0.98	0.89	19.29	1.27	15.15
7.5	5	0.80	0.98	1.30	1.23	1.39	12.35	1.59	7.76
7.5	6	0.95	1.17	1.56	1.47	2.01	8.57	1.91	4.49
7.5	7	1.11	1.37	1.82	1.72	2.73	6.30	2.23	2.83
7.5	8	1.27	1.57	2.08	1.96	3.57	4.82	2.55	1.89
7.5	9	1.43	1.76	2.33	2.21	4.52	3.81	2.86	1.33
7.5	10	1.59	1.96	2.59	2.45	5.58	3.09	3.18	0.97
7.5	14	2.23	2.74	3.63	3.43	10.93	1.57	4.46	0.35

En este caso se ve hay un único biodigestor que da una relación L/D que está entre 5 y 10. Este corresponde a usar un plástico de circunferencia 5 m que requiere de una zanja de longitud 12.36 m y dimensiones a=0.98 m, b=1.30 m y p=1.23 m para lograr los 15.55 m³ de volumen líquido y 3.11 m³ de gas (20% basado en figura 9)

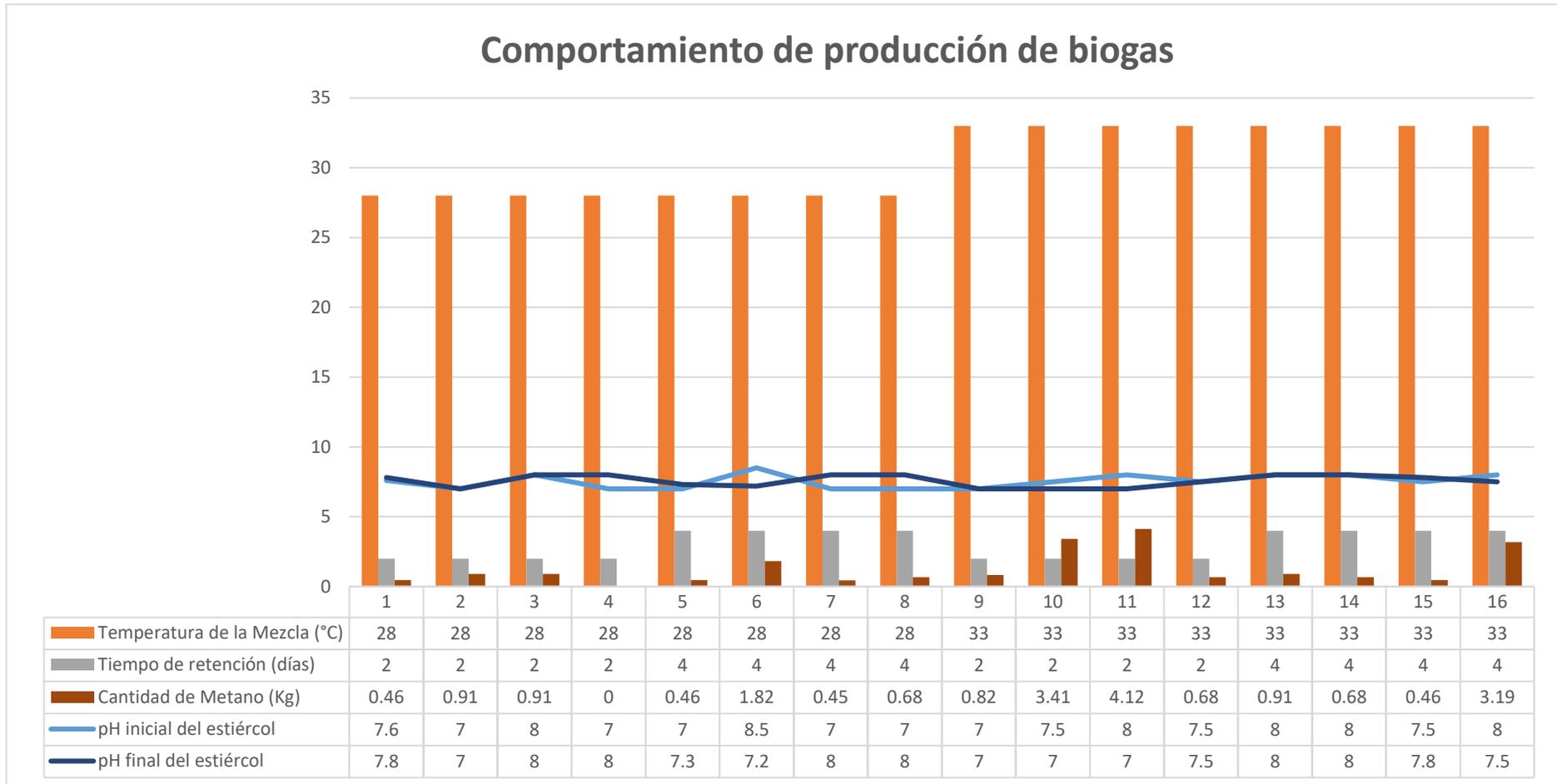
Tabla 19: Práctica del Diseño de experimentos Factorial 23-Fuente propia

Numero aleatorio de experimento	Temperatura de la Mezcla (°C)	Tiempo de retención (días)	Cantidad de estiércol inicial (Kg)	pH inicial del estiércol	Cantidad de estiércol final (Kg)	pH final del estiércol	Cantidad de Metano (Kg)
1	28	2	8.18	7.6	7.72	7.8	0.46
2	28	2	8.18	7	7.27	7	0.91
7	28	2	8.63	8	7.72	8	0.91
8	28	2	7.27	7	7.27	8	0
9	28	4	8.18	7	7.72	7.3	0.46
12	28	4	8.64	8.5	6.82	7.2	1.82
13	28	4	7.95	7	7.5	8	0.45
16	28	4	8.18	7	7.5	8	0.68
3	33	2	8.18	7	7.36	7	0.82
4	33	2	8.18	7.5	4.77	7	3.41
5	33	2	8.09	8	3.97	7	4.12
6	33	2	8.18	7.5	7.5	7.5	0.68
10	33	4	8.18	8	7.27	8	0.91
11	33	4	8.18	8	7.5	8	0.68
14	33	4	8.18	7.5	7.72	7.8	0.46
15	33	4	8.64	8	5.45	7.5	3.19

Consideraciones de los datos de experimentos presentados en la tabla anterior:

1. Por estar en una región cálida (temperatura media ambiente de 33 °C) según la Tabla 1 no se requiere diseño solar, cabe señalar que el biodigestor trabajará a esta misma temperatura.
2. El tiempo del experimento es de 2 a 4 días, inicialmente se propuso 10 a 15 días (ver acápite 7.1)
3. El método de toma de pH es cualitativo ya que es a través de cintas.
4. Hubo una muestra con fugas en su recipiente esto es debido al exceso de gas producido (muestra N° 8)
5. En esta tabla los números de experimentos están en orden aleatorio, se observan los valores de las 3 variables de estudio y sus 2 niveles (nivel bajo y nivel alto); cabe señalar que se toma el pH inicial y pH final de igual forma la cantidad de estiércol, por último, tenemos el resultado de la cantidad de metano el cual es la variable de respuesta.

Gráfica 1: Comportamiento de la cantidad de biogás producido ajustando las variables del proceso: Tiempo de retención, temperatura y pH. (Fuente: Elaboración propia)

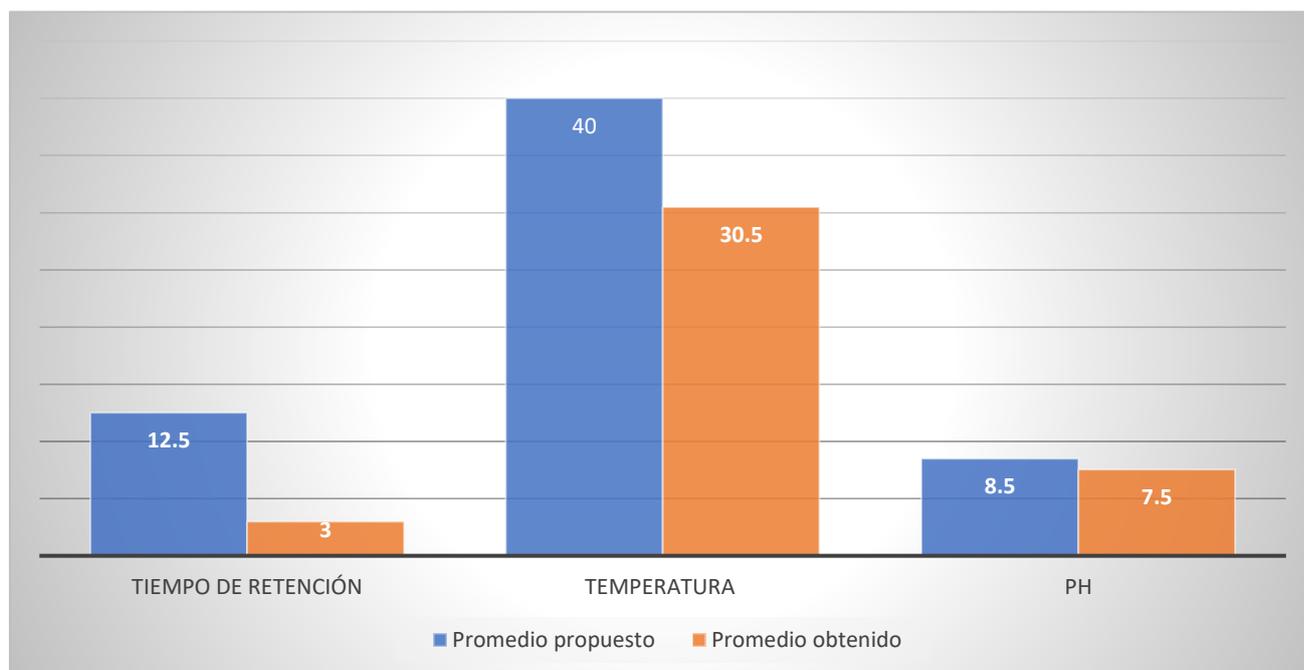


8.2. Discusión de los Resultados

En la gráfica del comportamiento de producción de biogás (en resultados) se observa en los datos del experimento número 11 que a mayor temperatura (33°C) y en menor tiempo de retención (2 días) hay mayor producción de metano (4.12 Kg), cabe señalar que para obtener esta relevante cantidad de producción de metano se debe de cumplir las condiciones de pH inicial de la mezcla la cual es 8 aproximadamente hasta lograr un pH final de 7 aproximadamente.

Si observamos y analizamos la siguiente gráfica del diseño de experimentos y comparamos con los resultados obtenidos nos damos cuenta que el mayor énfasis del proceso está en la variable tiempo de retención y la interacción pH- temperatura; es decir:

Gráfica 2: Comparativa datos propuestos vs datos obtenidos. (Fuente: Elaboración propia)



Estos cambios en variables fueron influidos por tamaño del recipiente del experimento (ver acápite 5.6.74, último párrafo), temperatura del ambiente y agua fluyendo constantemente lo cual afecta el pH. Esto lo podemos comprobar en los resultados donde se reflejan las mismas variables sensibles respecto al diseño de experimentos: tiempo de retención, interacción pH-temperatura.

Los datos obtenidos fueron a través de una simulación experimental de lo que es un biodigestor tipo tubular de polietileno con el fin de analizar el comportamiento desde la materia prima hasta la obtención de biogás.

8.3. Diseño de experimentos en MINITAB

El diseño de experimentos (DOE en inglés) permitió determinar los efectos de las variables de entrada (factores) sobre una variable de salida (respuesta). Estos experimentos consisten en una serie de corridas, o pruebas, en las que se realizaron cambios intencionales en las variables de entrada. En cada corrida se recolectan datos. El DOE se utiliza para identificar las condiciones del proceso y los componentes del producto que afectan la calidad, para luego determinar la configuración de factores que optimiza los resultados.

Con un diseño factorial 2^k (2: número de niveles, k: número de variables) que permitió predecir aproximadamente un máximo de 19 kg de metano (depende principalmente de la cantidad inicial de estiércol). En la Tabla 19 se determinará y analizará el efecto de respuesta de cada uno de los términos.

Tabla 20: Diseño factorial 2^3 (Fuente: Elaboración Propia)

En esta tabla proponemos el DOE inicial teórico (ver práctico en tabla 19) y observamos el orden consecutivo y aleatorio de las muestras experimentales (16 muestras), los factores con sus niveles y la respuesta de salida de cada uno de los experimentos a realizar.

Orden Est.	Orden Corrida	Temperatura de la Mezcla (°C)	pH de la Mezcla	Tiempo de retención (días)	Cantidad de Metano (Kg)
5	1	35	7.5	15	19
12	2	45	9.5	10	10
1	3	35	7.5	10	15
11	4	35	9.5	10	7
2	5	45	7.5	10	8
10	6	45	7.5	10	9
3	7	35	9.5	10	10
16	8	45	9.5	15	12
14	9	45	7.5	15	15
13	10	35	7.5	15	17
15	11	35	9.5	15	14
8	12	45	9.5	15	13
7	13	35	9.5	15	10
9	14	35	7.5	10	9
4	15	45	9.5	10	10
6	16	45	7.5	15	9

Tabla 21: Coeficientes codificados (Fuente: Elaboración Propia)

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		11.688	0.634	18.43	0	
Temperatura de la Mezcla	-1.875	-0.938	0.634	-1.48	0.178	1
pH de la Mezcla	-1.875	-0.938	0.634	-1.48	0.178	1
Tiempo de retención	3.875	1.938	0.634	3.05	0.016	1
Temperatura de la Mezcla*pH de la Mezcla	2.875	1.437	0.634	2.27	0.053	1
Temperatura de la Mezcla*Tiempo de retención	-0.875	-0.438	0.634	-0.69	0.51	1
pH de la Mezcla*Tiempo de retención	-0.875	-0.437	0.634	-0.69	0.51	1
Temperatura de la Mezcla*pH de la Mezcla*Tiempo de retención	0.375	0.188	0.634	0.3	0.775	1

Las gráficas 2 y 3 se explican con refuerzo de esta tabla, los datos del efecto en esta tabla nos indican que tan significativo es el factor de entrada con ayuda del valor p el cual indica significancia si el dato es menor de 0.05 (tiempo de retención) y si es mayor no tiene significancia el factor de entrada en el proceso.

Tabla 22: Resumen del modelo (Fuente: Elaboración Propia)

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.710972	81.95%	66.15%	27.79%

En esta tabla se muestra que el modelo de regresión lineal explica la variación de los datos en un 81.95%. En general, para fines de predicción se recomienda un coeficiente de determinación ajustado de al menos 0.7, sin embargo a nuestro equipo de tesis nos ha dado levemente a la baja 66.15%. (Humberto & Román, 2008)

Tabla 23: Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<i>Modelo</i>	7	127.937	18.2768	2.84	0.084
<i>Lineal</i>	3	88.187	29.3958	4.57	0.038
Temperatura de la Mezcla	1	14.063	14.0625	2.18	0.178
pH de la Mezcla	1	14.063	14.0625	2.18	0.178
Tiempo de retención	1	60.062	60.0625	9.33	0.016
Interacciones de 2 términos	3	39.187	13.0625	2.03	0.188
Temperatura de la Mezcla*pH de la Mezcla	1	33.062	33.0625	5.14	0.053
Temperatura de la Mezcla*Tiempo de retención	1	3.062	3.0625	0.48	0.51
pH de la Mezcla*Tiempo de retención	1	3.063	3.0625	0.48	0.51
Interacciones de 3 términos	1	0.563	0.5625	0.09	0.775
Temperatura de la Mezcla*pH de la Mezcla*Tiempo de retención	1	0.563	0.5625	0.09	0.775
Error	8	51.5	6.4375		
Total	15	179.437			

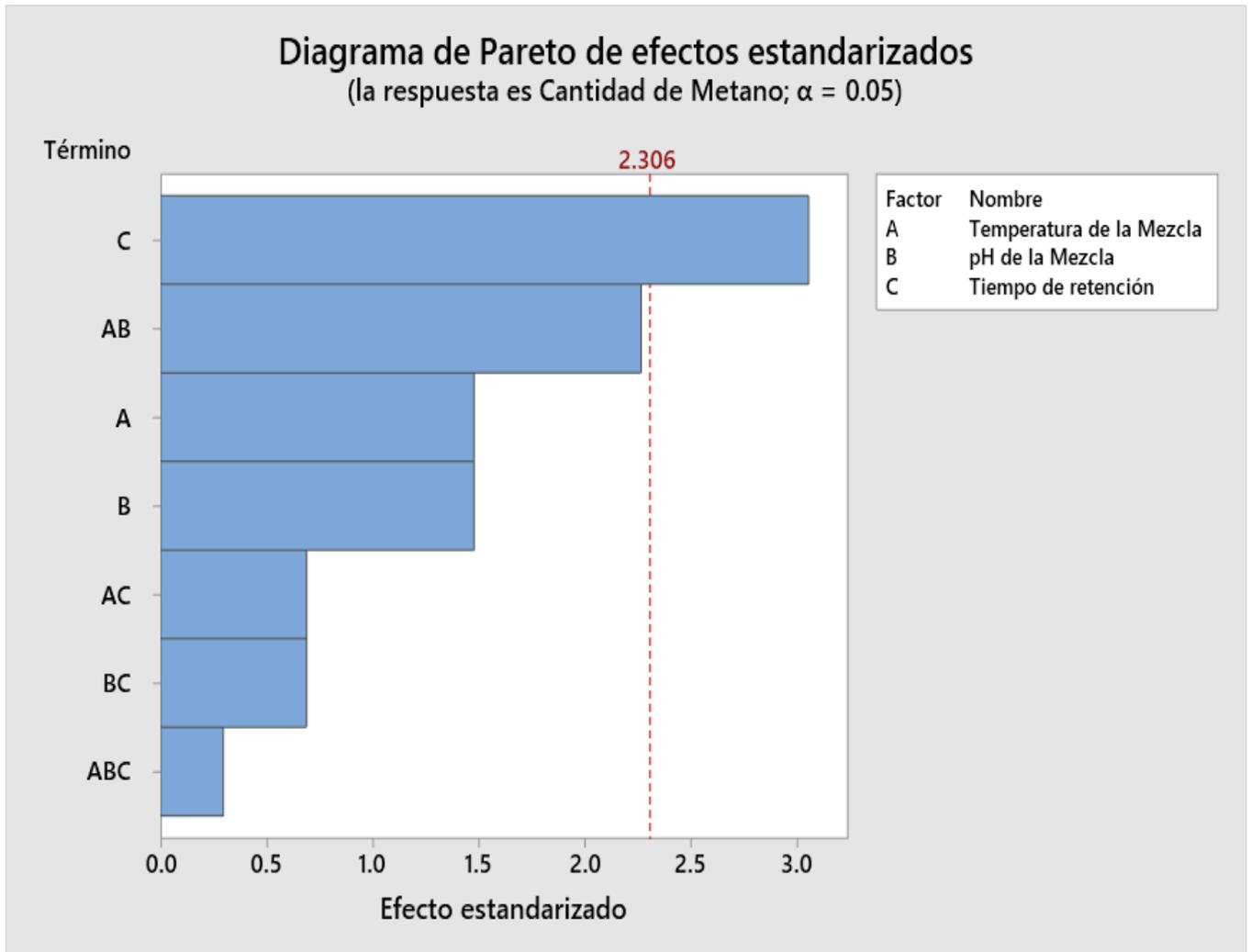
En esta tabla se muestra principalmente el nivel de significancia en las interacciones de los factores, según los valores de p, si el valor p es menor de 0.05 entonces es significativo, de lo contrario no es significativo. Es decir, el más significativo es tiempo de retención.

Tabla 24: Ecuación de regresión en unidades no codificadas (Fuente: Elaboración Propia)

Cantidad de Metano =	-762 + 19.95 Temperatura Biodigestor + 272 Tiempo retención
	+ 98.0 pH de Mezcla - 7.10 Temperatura Biodigestor*Tiempo retención
	- 2.564 Temperatura Biodigestor*pH de Mezcla
	- 34.4 Tiempo retención*pH de Mezcla
	+ 0.899 Temperatura Biodigestor*Tiempo retención*pH de Mezcla

En esta tabla se presenta la ecuación para la variable de respuesta (cantidad de metano) en relación a los demás factores del experimento.

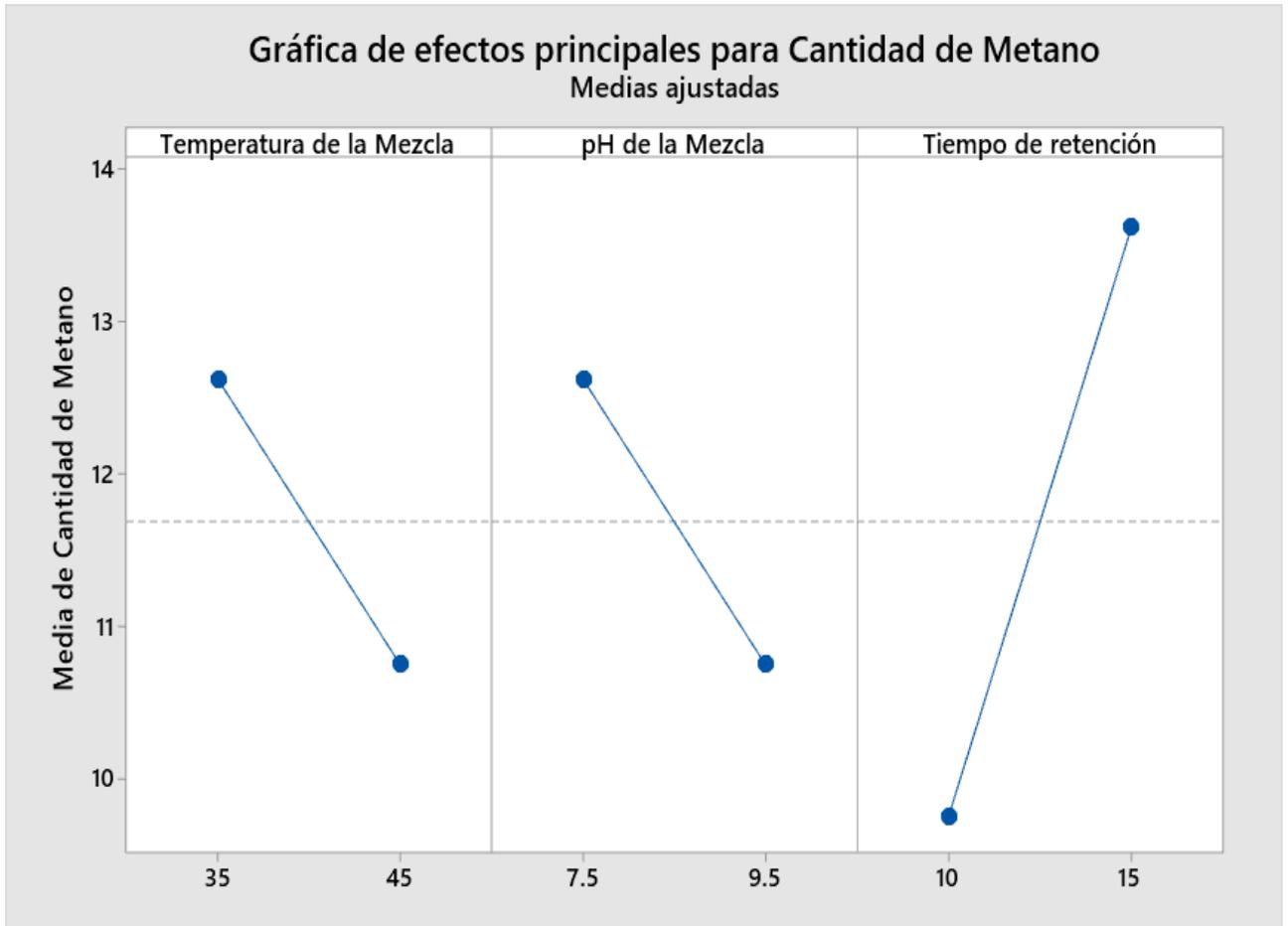
Gráfica 3: Diagrama de Pareto (Fuente: Elaboración propia)



En esta gráfica de Pareto se observa como el factor principal que muestra un mayor efecto es el tiempo de retención.

En el diagrama de Pareto se observan por orden, de mayor a menor efecto, los factores o combinaciones. Los factores que superan la franja roja son los denominados factores significativos.

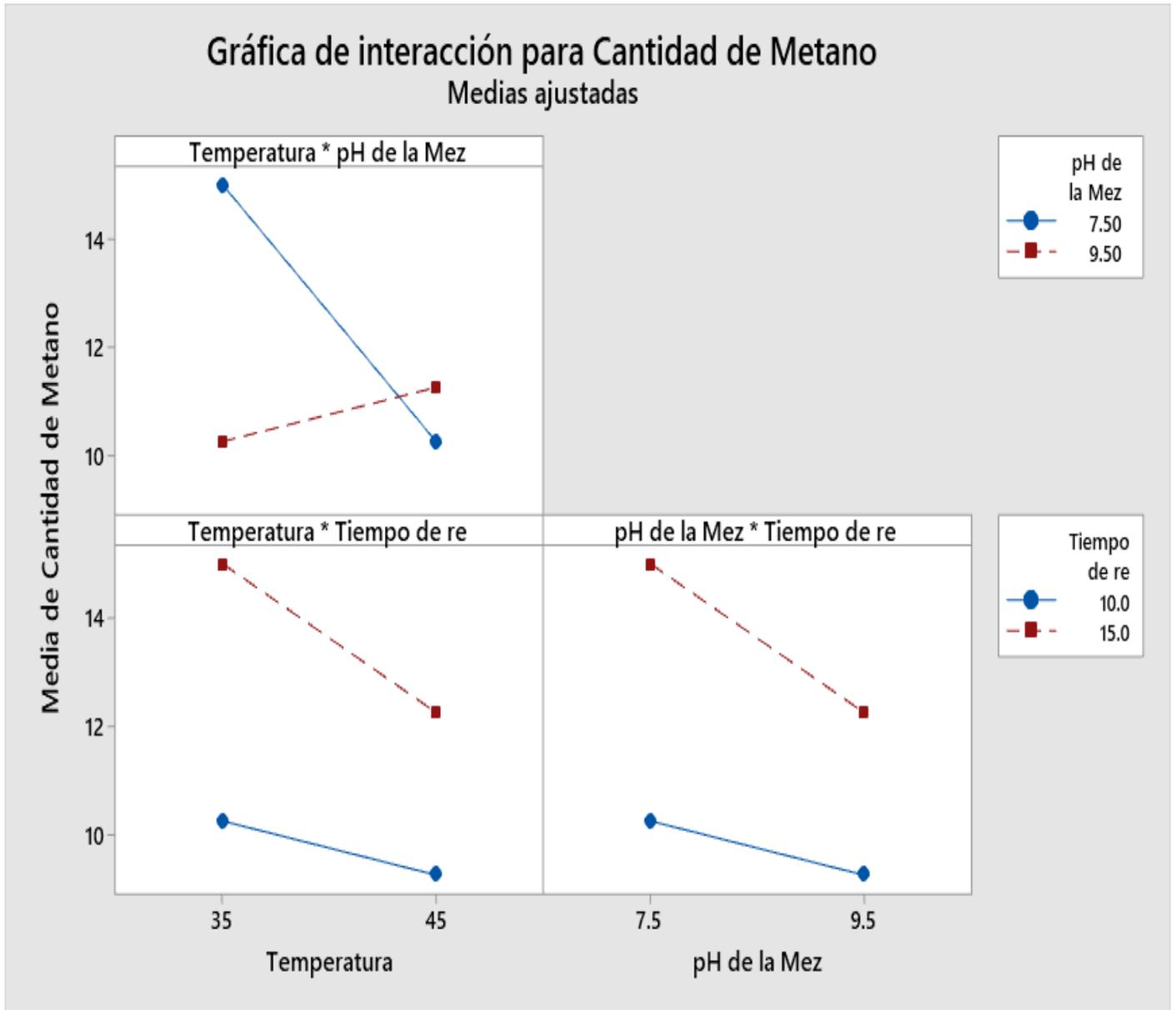
Gráfica 4: Efectos Principales (Fuente: Elaboración propia)



Esta gráfica indica que al variar el tiempo de retención de 10 a 15 días el rendimiento aumenta en esa cantidad. El signo de este valor indica si aumenta o disminuye la respuesta.

Esta gráfica 4 nos muestra como el efecto significativo es el tiempo de retención, además de indicarnos que este cambio es en orden creciente, es decir que al aumentar el tiempo de retención aumenta el rendimiento.

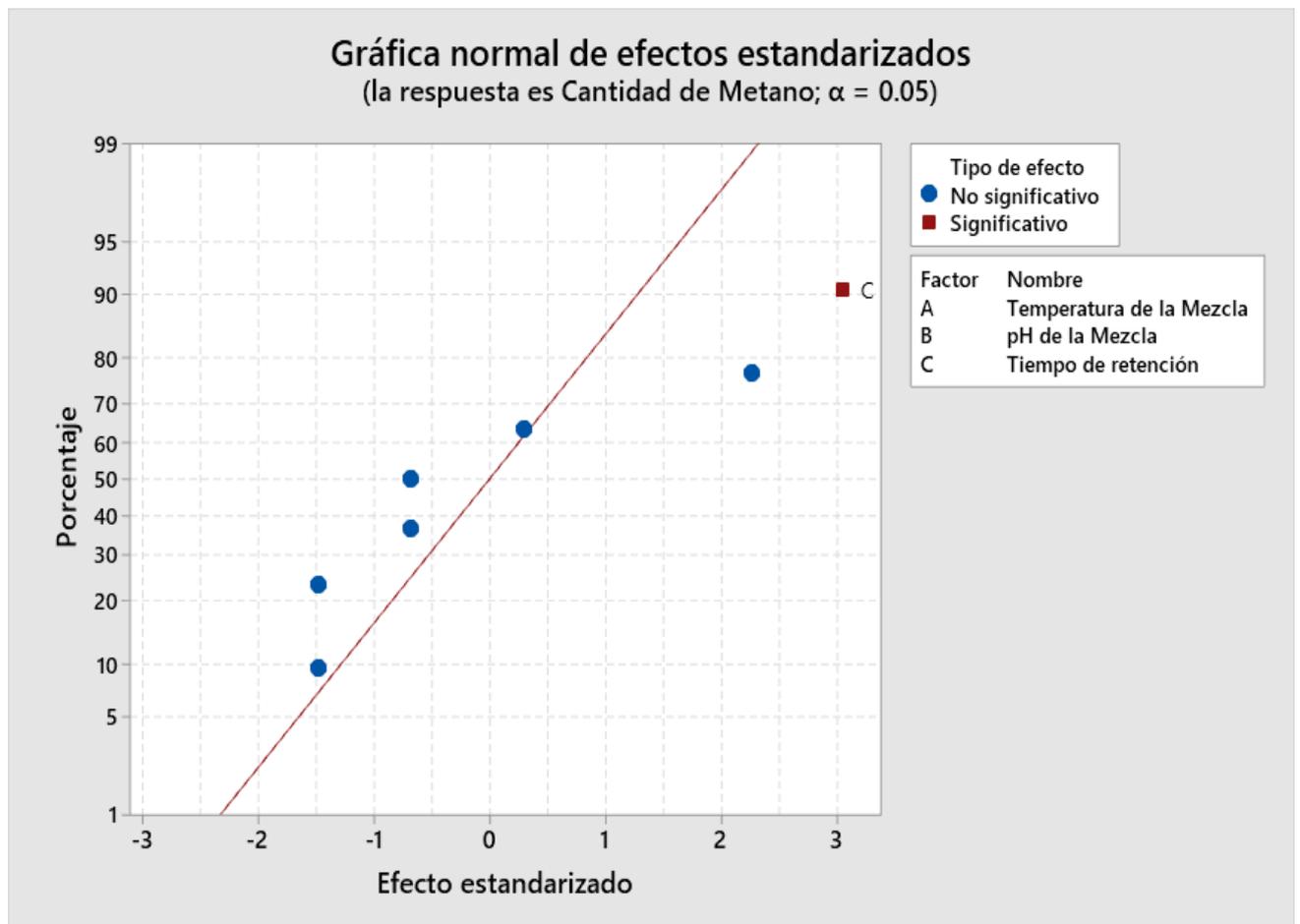
Gráfica 5: Interacción de términos (Fuente: Elaboración propia)



En la Tabla 21 se muestra que el valor de la interacción Temperatura*pH de la mezcla tiene un efecto con un valor alto en la respuesta, al observar la Gráfica 5 esta muestra el mayor rendimiento cuando hay un cambio en el pH y temperatura al mismo tiempo.

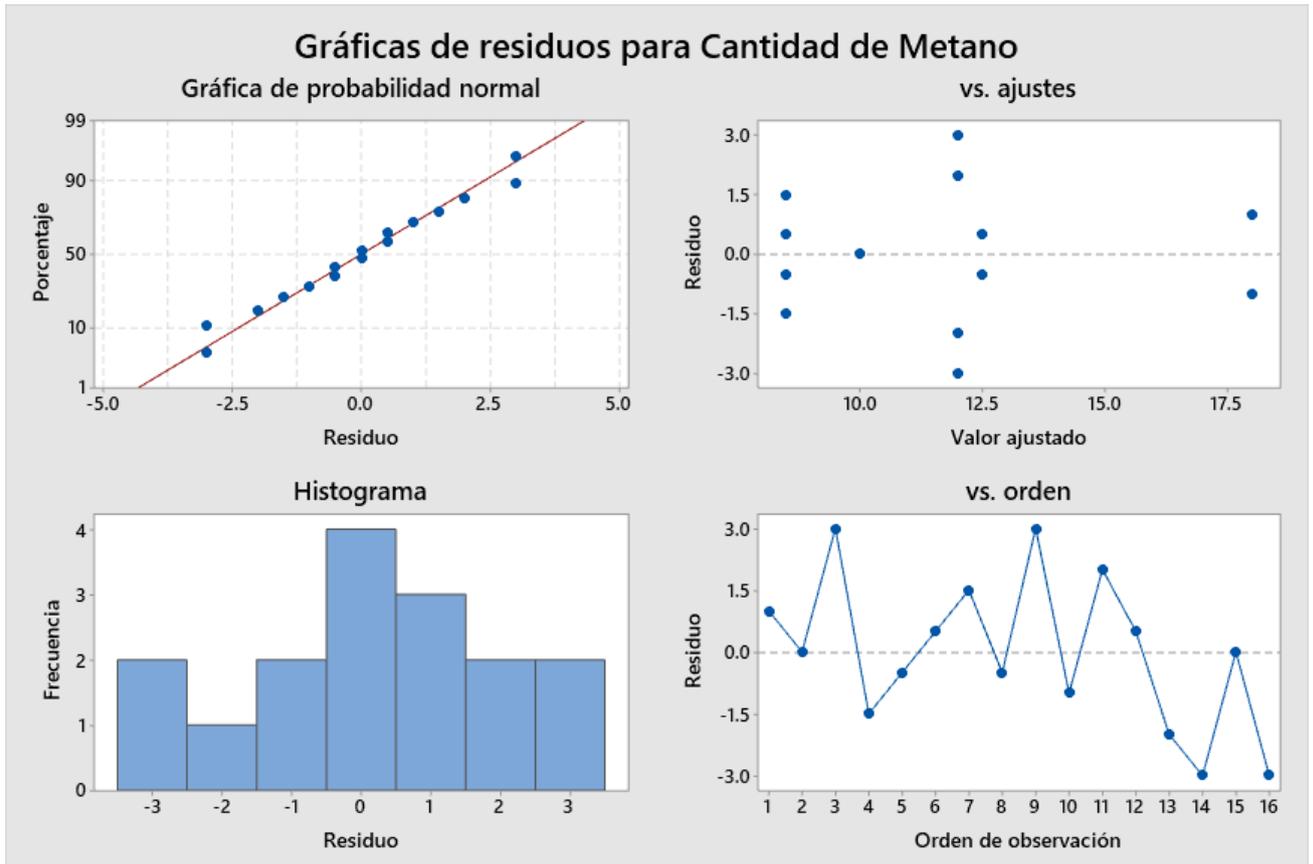
Se observa como el efecto de la temperatura depende del pH que se utilice y viceversa, esto ocurre con todos los factores implicados en el experimento. El resto de interacciones tienen un efecto con valor más pequeño, lo que significa que causan menos efecto en la respuesta.

Gráfica 6: Normal de efectos estandarizados (Fuente: Elaboración propia)



En la gráfica normal, los valores significativos aparecen en color rojo alejados de la recta de efecto-porcentaje. Pero también se deben tener en cuenta los valores, que a pesar de no estar suficiente alejados de la recta para considerarse significativos y estar en rojo, si se encuentran más alejados que el resto, estos valores tendrán un efecto importante en la respuesta también.

Gráfica 7: Residuos para la cantidad de metano (Fuente: Elaboración propia)



En esta gráfica de residuos podemos ver la variabilidad de los datos en la gráfica de probabilidad normal, los datos no están tan lejanos a la línea de referencia. Estamos de acuerdo que podemos mejorar el comportamiento de los datos cuando se cambie la escala de los experimentos. Para la cantidad de metano podemos ver la fórmula de la tabla 24.

IX. CONCLUSIONES

Con un biodigestor tubular de polietileno, se pueden satisfacer las demandas de la porqueriza González, teniendo en cuenta la disposición del terreno, la inversión y la carga diaria de estiércol, este es uno de los más aptos pues es de bajo costo, fácil construcción y mantenimiento y se puede construir con la capacidad de sustrato que se genera diariamente en la empresa (622 litros).

Los biodigestores tubulares cuentan con una tecnología apropiada a las necesidades de una granja de cerdos y como se mencionó anteriormente, son de bajo costo y los materiales para su construcción se encuentran fácilmente en mercado nacional.

Como resultado de esta investigación se concluye que los factores de pH, Temperatura y Tiempo de Retención son determinantes en el proceso de generación de biogás. En el caso del tiempo de retención va en dependencia de la cantidad de estiércol y tipo de biodigestor (2 días en experimento), la temperatura es la del ambiente según tipo de biodigestor recomendado (33°C) y para mantener un pH óptimo alcalino de 8 en el proceso es necesario partir con una relación estiércol: agua de 1:4 y mantenerla durante el proceso de generación de gas, parámetros en donde la metanogénesis es efectiva logrando producir hasta 4.12 kg de biogás de 8.09 kg de estiércol.

Este estudio permitió determinar que la implementación de un biodigestor tubular de polietileno, es la mejor alternativa para tratar con los residuos orgánicos generados por la porqueriza y se logrará una solución a los problemas de contaminación ambiental por excretas de ganado porcino, obteniendo además la disminución del consumo de leña y gas propano.

Con todos los datos obtenidos por la investigación y lo antes mencionados, concluimos que la implementación de un biodigestor tubular de polietileno, con una capacidad total de 18.66 m³ es la mejor opción para la porqueriza González, con su uso se disminuye la contaminación y generando 3.11 m³ de biogás por mes se ahorrarán unos \$750 al año por gastos de gas licuado de petróleo GLP.

X. RECOMENDACIONES

Es necesario tener algunos cuidados para evitar la contaminación del estiércol, lo cual, perjudicaría la producción de biogás, estos son los siguientes:

1. En caso de poner medicamentos a los animales, ponerlos en un corral separado durante tres días, y no utilizar la carga orgánica de estos, ya que puede contener residuos de medicamentos.
2. Cuando se deba desparasitar y vitaminar a los cerdos realizarlos por lotes y de igual forma separarlos por tres días, para no contaminar el estiércol.
3. Cuando se laven los corrales, las primeras dos lavadas hacerlo solamente con agua, para eliminar lo que son las heces y orina, solo el agua de estas dos primeras lavadas puede ir a la pila donde se almacena el estiércol. En caso de utilizar algún tipo de detergente, desviar este lavado de la pila de almacenamiento.
4. Reutilización de las aguas residuales generadas en las granjas porcinas para riego de pastos, mezclas para biodigestor y grama.
5. Producción de abono orgánico a partir de Porquinaza, mediante técnicas de compostaje y/o lombricultura
6. Se puede utilizar carbonato de sodio, ceniza de sosa, sosa cáustica y bicarbonato de sodio para mantener la alcalinidad del proceso, sin embargo, para mantener costos bajos también se puede mantener la alcalinidad haciendo mezclas con el mismo estiércol y agua.

XI. NOMENCLATURA

FAREM:	: Facultad Regional Multidisciplinaria
SNV	: Siglas en ingles que significan Servicio Holandés de cooperación al desarrollo
FOMIN	: Fondo multilateral de inversiones
BID	: Banco interamericano de desarrollo
FND	: Fondo nórdico para el desarrollo
GLP	: Gas licuado propano, derivado del petróleo
CH₄	: Metano
CO₂	: Dióxido de Carbono
H₂S	: Sulfuro de Hidrógeno
H₂	: Hidrógeno
CH₃COOH	: Acetato
TRH	: Tiempo de retención hidráulico
Kg	: Kilogramos
C/N	: Relación carbono nitrógeno
AGV	: Ácidos grasos volátiles
CSTR	: Reactor de tanque agitado constante
UASB	: Upflow Anaerobic Sludge Blankett (Reactor anaerobio de mantos de lodo de flujo ascendente)
PVC	: Cloruro de polivinilo
CD	: Carga diaria
TR	: Tiempo de retención
(l/d)	: Litros por día
°C	: Grados Celsius
(Kg/l)	: Kilogramo por litro
ml	: Mililitros
m³	: Metros cúbicos
SV	: Sólido volátil
ST	: Sólidos totales
DQO	: Demanda química de oxígeno
mgO₂/l	: Miligramos de oxígeno diatómico por litro
K₂Cr₂O₇	: Dicromato de potasio
DOE	: Diseño de experimentos
VL	: Volumen Líquido
VT	: Volumen Total
VB	: Volumen de Biogás
C	: Circunferencia del cilindro
D	: Diámetro de la circunferencia
R	: Radio de la circunferencia
L	: Longitud del biodigestor
L/D	: Relación longitud-diámetro
a	: Ancho inferior
b	: Ancho superior
p	: Profundidad
A	: Área del trapecio de la zanja
V	: Volumen
KW	: Kilo Watts
l	: Litro
l/h	: Litro por hora

g	: Gramos
min	: Minutos
μm	: Micrómetros
α	: Angulo de inclinación del biodigestor
HDEP	: por sus siglas en inglés, High Density PolyEthylene
ASTM	: American Society for Testing and Materials
ft	: Pies
m	: Metro
°F	: Farenheit
C	: Celsius
g/m²	: Gramos por metro cuadrado
mils	: Milésimas
mm	: Milímetros
g/cm³	: Gramos por centímetro cubico
lb	: Libras
In	: Pulgadas
N	: Newton
atm	: Atmósfera
O₂	: Oxigeno

XII.BIBLIOGRAFÍA

- Alfonso, E. T., Leyva, Á., & Hernández, A. (1998). Microorganismos Beneficios Como Biofertilizantes Eficientes Para El Cultivo Del Tomate (*Lycopersicon Esculentum*, Mill). *Revista Colombiana Y De Biotecnología*. Vol. 7, No. 2, 47-54.
- Arrieta, W. (2016). Diseño De Un Biodigestor Doméstico Para El Aprovechamiento Energético Del Estiércol De Ganado. Piura, Perú.
- Bernal Patiño, L. E., & Suárez Ramirez, L. S. (2018). Diseño Conceptual De Un Biodigestor Partiendo De Estiércol Vacuno. Bogotá D.C.
- Botero, R. (14 De Septiembre De 2018). El Biodigestor De Polietileno De Bajo Costo Para La Producción De Combustible Y Fertilizante A Partir De Excretas Animales, Humanas Y De Otros Remanentes Orgánicos. *Ergomix.Com*, Pág. 30.
- Brahim, Arhoun. (2017). Digestión Y Codigestión Anaerobia De Residuos Agrícolas, Ganaderos Y Lodos De Depuradora . Málaga .
- Cabal, S. (Enero 2014). Guía De Buenas Prácticas En Proyectos De Biodigestores. Managua, Nicaragua: Cabal,S.A.
- Corona, I. (2007). Biodigestores. Hidalgo, México.
- Díaz Corzo, L. A. (2019). Diseño De Un Reactor De Tanque Agitado Continuo Con Fines Didácticos . Guatemala.
- Energía, M. D. (2011). Manual De Biogás. Chile: Proyecto Chi/00/G32 .
- Fe, S. (2019). Manual De Uso Del Biodigestor . Argentina: Santa Fe.
- Gajardo Alarcón, N. L. (2013). Estudio De La Producción De Biogás En Función De La Temperatura, En Un Biodigestor Tipo Chino. Santiago, Chile.
- García Páez, V. (S.F.). Manual De Biogás Conceptos Básicos. Beneficios De Su Producción Y La Aplicación De Sus Sub-Productos. Buenos Aires : Dirección De Sustentabilidad, Medio Ambiente Y Cambio Climático.
- García Rodríguez, A. M., & Gómez Franco, J. D. (2016). Evaluación De La Producción De Biogás A Partir De Residuos Vegetales Obtenidos En La Central De Abastos De Bogotá Mediante Digestión Anaerobia. Bogotá D.C.
- Gómez Muñoz, S. (31 Octubre 2012). Diseño, Construcción Y Puesta A Punto De Un Biodigestor Tubular Carazo, Nicaragua . Laganés, España .
- Herrero, J. (2008). Biodigestores Familiares: Guía De Diseño Y Manual De Instalación . Bolivia : Gtz-Energía.
- Humberto, G., & Román, D. L. (2008). Análisis Y Diseño De Experimentos . México: Mcgraw-Hill Interamericana.
- Ibid. (S.F.).
- Jones, W., & José, U. (2012). Diseño Y Cálculo De Las Instalaciones De Un Biodigestor . Uruguay.
- Latina, I. A. (2003). Innoación Para El Desarrollo Y La Cooperación Sur-Sur. *Ideass*, 1-12.
- López Aguirre, A. M., & Ruiz Restrepo, C. (2014). Evaluación De La Producción De Biogás A Partir Del Buchón De Agua Mediante Codigestión Anaerobia Con Estiércol Bovino. Medellín, Colombia.
- Mandujano, M. I., Félix A., A., & Martínez, A. M. (1981). Biogas, Energía Y Fertilizantes A Partir De Desechos Orgánicos . Cuernavaca, Morelos, México : Olade.
- Martí Herrero, J. (2019). Biodigestores Tubulares, Guía De Diseño Y Manual De Instalación. Ecuador.
- Mojica, C., Vidal, E., & Rueda, B. Y. (Marzo 2016). Estudio De Las Características Físico-Químicas De Residuos Orgánicos Para Su Uso Potencial En La Producción De Biogás. *Revista De Energía Química Y Física*, 8.

- Moreta Criollo, M. L. (2012-2013). "Diseño De Un Biodigestor De Estiércol Porcino Para Una Granja Agrícola Ubicada En El Barrio La Morita, Parroquia De Tumbaco Para El Año 2012-2013" .
- Network, B. U. (2002). Manuales Sobre Enegia Renovable: Biomasa. San José, Cr: Biomass Users Network .
- Oma., E. A. (2011). El Informe De La Energía Renovable. México: Wwf.
- Orrala, K. (2021). Manejo De Excretas De Origen Porcino En La Comuna San Pedro, Parroquia Manglaralto Provincia De Santa Elena . La Libertad, Ecuador.
- Pérez, A., & Estela, B. (Octubre 2015). Evaluación Del Residuo Paja De Trigo Del Cultivo De Pleurotus Djamor Como Sustrato Para La Digestión Anaeróbica . Mexico D.F.
- Pérez, W. (2014). Nicaragua Apuesta Por El Biogás Para Energía En Zonas Rurales . La Prensa .
- Reyes Aguilera, E. A. (Octubre-Diciembre, 2017). Generación De Biogás Mediante El Proceso De Digestión Anaerobia, A Partir Del Aprovechamiento De Sustratos Orgánicos. Revista Científica De Farem-Estelí. Medio Ambiente, Tecnología Y Desarrollo Humano. Año 6 | N° 24, 22.
- Rohstoffe, G. N. (2010). Guía Sobre El Biogás, Desde La Producción Hasta El Uso. Alemania.
- Ruiz Bastidas, R. C. (2017). Aprovechamiento Del Estiércol Bovino Generado En El Municipio De Cumbal-Nariño Para Obtener Energía Renovable Mediante Digestión Anaerobia. Palmira, Colombia .
- Toruño, L., Casco, D., & Edinson, L. (2016). Estudio De Producción De Biogás Por Medio Del Proceso De Digestión Anaerobia No Controlada A Partir De Diversos Sustratos Orgánicos En La Facultad Regional Multidisciplinaria (Farem –Estelí), li Semestre De 2016. Estelí, Nicaragua: Investigación De Tesis .
- Toruño, L., Casco, D., & Lira, E. (2016). Estudio De Producción De Biogás Por Medio Del Proceso De Digestión Anaerobia No Controlada A Partir De Diversos Sustratos Orgánicos En La Facultad Regional Multidisciplinaria (Farem – Estelí), li Semestre De 2016. Estelí.
- Yauyo Ramos, L. M. (2016). Elaboración De Un Biodigestor Piloto Tubular Para El Manejo De Estiércol Porcino. Villa El Salvador .

XIII. ANEXOS

Inicio del montaje de los experimentos para obtener Biogás



Recolección de excretas de cerdo



Llenado de los recipientes con excretas



Montaje para el experimento de obtención de biogás

Relación de la mezcla 1:4
1 kg de estiércol de cerdo: 4 kg de agua

Toma del pH inicial de las muestras



Experimento 3



Experimento 14

Los valores de pH oscilan entre 7.0 a 8.5 (ver grafica 6)

Control inicial del peso de la relación de mezcla



Pesado



Identificación de los recipientes

Obtención del biogás



Peso final de la mezcla



Toma del pH final de las muestras



Experimentos fallidos



Fotografía de la porqueriza González





Tabla 25: Recuperación de inversión por instalación de biodigestor capacidad de 18.66 m³

Recuperación de inversión por instalación de biodigestor capacidad de 18.66m³	
m ³ /biogás/mes	3.11
m ³ /biogás/año	37.3
Gasto x mes en propano (\$)	62.5
Gasto x año en propano (\$)	750
Costo de la inversión (\$)	2,239
Recuperación de la inversión/año	3.0
Ahorro en abonos por uso de biol/anual/\$	2,867
Recuperación de la inversión tomando en cuenta uso de abono/año	0.62

Nota: Estos datos son aproximados ya que son sugeridos por un proveedor de biodigestores.

Tabla 26: Aplicación de los principios de producción más limpia en granjas porcinas.

Principios de PML (Producción más limpia)	Opciones de PML (Producción más limpia)
Buenas prácticas de manufactura	<ol style="list-style-type: none"> 1. Realizar limpieza en seco de los corrales y galeras previo al lavado a presión. 2. Instalar pistolas de presión para disminuir el gasto de agua
Mejor control de proceso	<ol style="list-style-type: none"> 1. Implementar procedimientos de limpieza de corrales y galeras. 2. Adicionar enzimas o enmascarantes al alimento para disminuir los olores. 3. Implementar indicadores ambientales de desempeño para evaluar el consumo específico de los recursos e insumos empleados en la granja porcina.
Sustitución de materias primas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Utilización de productos químicos de limpieza usados en galeras y corrales por productos químicos biodegradables
Modificación de equipo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sustitución de lámparas de calentamiento de salas de maternidad por calentadores a base de biogás
Cambios de tecnologías	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sustitución de lámparas por ahorrativas en las áreas de oficinas, galeras o corrales. 2. Sustitución de bombas de extracción de agua de los pozos
Recuperación in situ y reutilización	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reutilización de las aguas residuales generadas en las granjas porcinas para riego de pastos y grama
Producción de subproductos útiles	<ol style="list-style-type: none"> 1. Producción de abono orgánico a partir de porquinaza, mediante técnicas de compostaje y/o lombricultura
Modificación de productos	No aplica

Tabla 27: Ficha técnica; Geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE).

Es una geomembrana hecha de polietileno de alta densidad (HDPE) con acabado liso. Posee características superiores, las cuales incluyen una alta estabilidad dimensional, excelente impermeabilidad y alta resistencia contra los ataques químicos y agresivos, excelente resistencia al sometimiento ambiental y contra rayos UV.

Los espesores óptimos de la membrana de polietileno esta entre 1.0mm a 1.5mm, la cual se usa para la construcción del biodigestor tubular anaeróbico.

Propiedades de referencia	Método de prueba	Valores nominales	
		HD 100	HD 150
Longitud de rollo**(aproximado), ft (m)			
Fragilidad a bajas temperaturas, °F (°C)	ASTM D 746	<-107 (<77)	<-107 (<77)
Tiempo de inducción oxidante, minutos	ASTM D 3895, 200 °C 100% O ₂ , 1 atm	< 1.0	< 1.0
Absorción de agua, % cambio	ASTM D 570	<0.01	<0.01
Transmisión de vapor, g/m ² día	ASTM E 96	<0.001	<0.001
Estabilidad dimensional (cada dirección), %	ASTM D 1204, 100 °C, 1 hr	+/-1	+/-12
Espesor, mils (mm)	ASTM D 5199	40 (1.00)	60 (1.50)
Densidad, g/cm ³	ASTM D 1505	0.94	0.94
Resistencia a la atracción (cada dirección)	ASTM D 6693, Tipo IV		
Resistencia a la rotura, lb/in – ancho (N/mm)	G.G.=50 mm (2.0 in) G.G.=33 mm (1.3 in)	163 (28)	250 (43)
Resistencia al límite elástico, lb/in – ancho (N/mm)		93 (16)	145 (25)
Alargamiento a rotura, %		700	700
Alargamiento al límite elástico,%		13	13
Resistencia al desgarre, lb (N)	ASTM D 1004	31 (138)	64 (210)
Resistencia a la perforación, lb (N)	ASTM 4833	79 (352)	119 (530)
Contenido de negro de humo, %	ASTM 1603	2.0	2.0
Dispersión de negro de humo	ASTM D 5596	Cat. 2	Cat. 2
Resistencia a la tracción por crack, horas	ASTM D 5397	400	400
Tiempo de inducción oxidativa	ASTM D 3895, (200°C)	100	100

**La longitud de los rollos corresponde al ancho de 7.0 m x 210 m de largo.

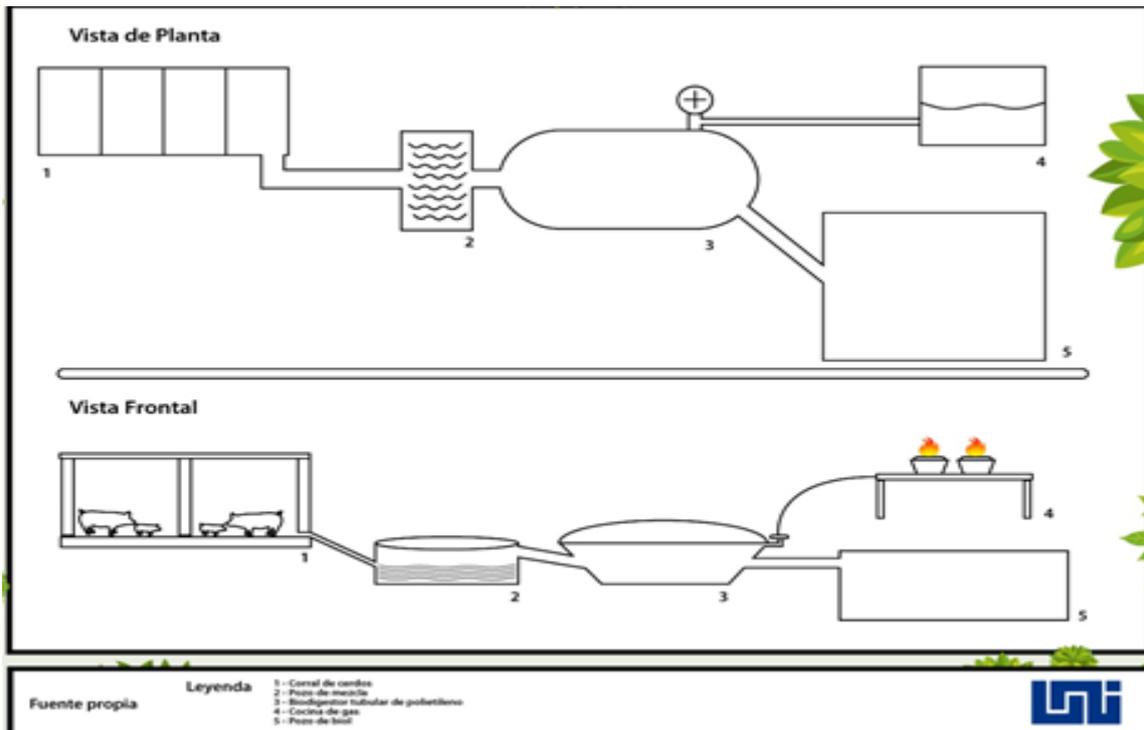


Figura 20: Croquis de planta de producción de biogás-fuente propia

Leyenda:

1. Corral de cerdos
2. Pozo de mezcla
3. Biodigestor tubular de polietileno
4. Cocina de gas
5. Pozo de biol

Tabla 28: Detección de causas de mal funcionamiento y posibles soluciones de problemas.

Indicios	Problema	Acción para remediarlo	Operación óptima
<p>Disminución en la producción de biogás.</p> <p>Acidificación del contenido de la cámara de digestión. Medición de pH inferior a 6.</p> <p>Dificultades para mover el mezclador</p>	<p>Sobrealimentación</p>	<p>Suspender la alimentación por al menos 1 semana, mientras se controla la producción de biogás y el pH, y se verifica que ambos aumenten. En caso de observar demasiado espeso el interior del biodigestor agregar agua y mezclar el biodigestor con el fin de diluir el material que se está biodegradando.</p> <p>Medir pH, en caso de ser pH < 6 o pH > 9, corregirlo con el agregado de un ácido (puede ser vinagre) o una base (preferentemente, soda cáustica - Hidróxido de Sodio) en caso de ser necesario, para acercarlo a 7 (ver recomendaciones).</p>	<p>El rendimiento óptimo se da dentro de un rango de pH de 6.8 a 8.2. Si los niveles de pH del digestor caen, los metanógenos se pueden inhibir, lo que detendrá el proceso de digestión y la producción de biogás.</p>
<p>Disminución en la producción de biogás (sin cambio importante en el valor de pH).</p>	<p>Antibióticos en alimentación - muerte de la población de microorganismos.</p> <p>Disminución de la actividad microbiana por bajas temperaturas.</p>	<p>Vaciar el biodigestor e iniciar la Puesta en Marcha desde el inicio.</p> <p>Disminuir la alimentación a la mitad del valor de diseño, mientras se controla el pH. En caso de notarse una disminución del mismo, suspender la misma por una semana y luego retomar con una cantidad aún menor, por ejemplo, ¼ de la cantidad de diseño.</p>	
Indicios	Problema	Acción para remediarlo	
<p>Disminución en la producción de biogás</p>	<p>Biogás ocluido en el seno del líquido.</p>	<p>Mezclar el contenido más y mejor: accionar el mezclador por más tiempo y más veces por día.</p>	
<p>Llama de hornalla o quemador no enciende o se apaga fácilmente.</p>	<p>Disminución de proporción de CH₄ en biogás.</p>	<p>Alimentar con 1 taza de azúcar o 2 tazas de sorgo molido o maíz molido durante 1 semana.</p>	