

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA GENERACIÓN DE BIOGÁS CON RESIDUOS DE GANADO VACUNO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGA EN AGUA Y SANEAMIENTO AMBIENTAL

Nombres y Apellidos

Verónica Katherine Ramírez Villacrés

DIRECTOR(A): ING. LORENA FERNANDA GALLARDO LASTRA, MSC.

lorena.gallardo@epn.edu.ec

CODIRECTORA: ING. ANA LUCIA BALAREZO AGUILAR M.Sc. Ph.D. MSC.

ana.balarezo@epn.edu.ec

Quito, julio 2021

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta Ramírez Villacrés Verónica Katherine como requerimiento parcial a la obtención del título de Tecnóloga en Agua y Saneamiento Ambiental, bajo nuestra supervisión:



Lorena Gallardo Lastra

DIRECTORA DEL
PROYECTO

Ana Lucia Balarezo Aguilar

CODIRECTORA DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo Verónica Katherine Ramírez Villacrés, con CI: 1805507926 declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 144 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación – COESC-, soy/somos titular/titulares de la obra en mención y otorgo/otorgamos una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional.

Entrego toda la información técnica pertinente, en caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.

DEDICATORIA

No hay palabras suficientes para agradecerle a mi madre todo lo que ha hecho por mí, a pesar de ello lo intentaré, este pequeño fragmento representa mi alegría y anhelo de culminar un período académico muy significativo de mi vida, el cual me ha dejado experiencias, conocimiento, y un enorme crecimiento personal y profesional, el mismo que no sería posible sin el inmensurable trabajo y apoyo de mi madre Mirian, gracias por ser mi luz.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi prestigiosa universidad y a mis docentes a lo largo de mi preparación profesional, me extendieron su mano y me transmitieron más que conocimiento, con sus consejos, charlas y regaños haciendo de mí no solo un buen profesional sino también una buena persona.

A mi amada familia, a mi hermosa Kiki y a mi compañero de vida, gracias a cada uno por su tiempo, paciencia, por su amor incondicional y compartir este pequeño logro junto a mí.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Fundamentos teóricos.....	2
1.3.1. Digestión anaeróbica	2
1.3.2. Biogás.....	3
1.3.3. Biodigestores.....	5
1.3.4. Antecedentes investigativos.....	9
1.3.5. Parámetros de control.....	9
CAPÍTULO 2 Metodología.....	13
2.1. Descripción de los procedimientos experimentales.....	13
2.1.1. Tipo y diseño de investigación	13
2.1.2. Línea base del biodigestor	14
2.1.3. Estiércol.....	15
2.1.4. Agua residual.....	15
2.2. Elección del modelo a emplearse	15
2.3. Procesamiento de datos	17
2.4. Diseño del sistema.....	18
2.5. Manual de operación	19
2.6. Materiales	20
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
3.1. Objetivo específico 1.....	23
3.1.1. Datos generales del lugar	23
3.1.2. Datos recopilados en campo.....	23
3.1.3. Determinación de la carga y volumen	24
3.2. Objetivo específico 2.....	26
3.2.1. Diseño del reactor.....	26
3.2.2. Material del reactor	28

3.2.3.	Dimensiones de la zanja	29
3.2.4.	Presión de operación del biodigestor	31
3.2.5.	Gasómetro	31
3.2.6.	Invernadero	32
3.2.7.	Tuberías de captación y conducción.....	33
3.3.	Objetivo específico 3.....	33
3.4.	Discusión de resultados	33
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		36
4.1.	Conclusiones	36
4.2.	Recomendaciones	37
5.	Referencias Bibliográficas.....	38
ANEXOS.....		41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fases de descomposición anaeróbica.....	3
Figura 2. Etapas del proceso de producción del biogás	5
Figura 3. Digestor de domo fijo	6
Figura 4. Digestor Janata	7
Figura 5. Digestor tubular de polietileno	7
Figura 6. Esquema del biodigestor tubular	17
Figura 7. Secuencia de diseño del biodigestor tubular	19
Figura 8. Ubicación geográfica del sitio de estudio.....	23
Figura 9. Parámetros geométricos de biodigestor tubular y zanja trapezoidal	29
Figura 10. Estructura del invernadero	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del biogás.....	4
Tabla 2. Temperatura y tiempo de fermentación Anaeróbica.....	10
Tabla 3. Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica	10
Tabla 4. TRH en los diversos climas.....	11
Tabla 5. Ficha para la recolección de información	14
Tabla 6. Matriz comparativa de modelos de biodigestores.....	16
Tabla 7. Materiales indispensables por cada elemento del biodigestor.....	20
Tabla 8. Datos del ganado.....	24
Tabla 9. Determinación de la carga diaria teórica	25
Tabla 10. Cálculo de la carga diaria.....	25
Tabla 11. Determinación de la carga diaria.....	26
Tabla 12. Datos del biodigestor T y tiempo de retención	26
Tabla 13. Volumen del biodigestor.....	27
Tabla 14. Tiempo de retención estimado	27
Tabla 15. Requerimientos de uso de biogás.....	27
Tabla 16. Dimensionamiento del reactor.....	27
Tabla 17. Relación en las dimensiones del reactor	27
Tabla 18. Parámetros de los rollos del polietileno tubular	28
Tabla 19. Tabulación de valores de elementos de la zanja.....	30
Tabla 20. Área de la zanja.....	30
Tabla 21. Presiones internas máximas de operación de los biodigestores	31

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Plan muestreo para establecer la capacidad de carga	42
Anexo 2: Fotos recabadas en campo	45
Anexo 3: Esquema del sistema e instalación de biogás <i>in situ</i>	51
Anexo 4: Dimensiones de la zanja	52
Anexo 5: Manual de instalación operación y mantenimiento del biodigestor.	53

RESUMEN

La crisis ambiental demanda implementar acciones de mitigación, una de ellas es el reciclaje de la energía a partir de los residuos animales (biocombustibles), ya que varias investigaciones previas, señalan la factibilidad de generar biogás empleando un biodigestor, en esta investigación se diseña un biodigestor para aprovechar las excretas del ganado vacuno, generadas en la Hacienda Rodeopamba Lote 2.

Al comparar las ventajas y desventajas de los modelos chino, hindú y taiwanés o tubular, bajo las condiciones atmosféricas y climatológicas que presenta la Hacienda Rodeopamba Lote 2, se determina que el biodigestor más adecuado para los posibles usos del biogás es el modelo tubular; éste se diseña siguiendo el procedimiento que establece la Guía de Martí Herrero, siendo las actividades: identificación de la línea base, determinación de la carga y volumen, dimensionamiento del biodigestor, selección del material del reactor, dimensionamiento de la zanja, análisis de la presión de operación, diseño del gasómetro, invernadero y sistema de tuberías de captación y conducción.

Se determina que el volumen del biodigestor es $7,84 \text{ m}^3$, la relación de largo a diámetro es 5,52, que ésta dentro del rango aceptable, considerándose el dimensionamiento adecuado; por las características de los materiales, para este caso se utilizará en doble capa, polietileno con una longitud de 7,5m que tiene suficiente resistencia mecánica y soporta presiones mayores a 10kPa., la zanja se orientará de oeste - este, para optimizar la radiación solar.

Es importante comunicar los resultados generados en la investigación, porque los biodigestores aportan a la mitigación ambiental, sostenibilidad y apoyo económico para quienes deciden emplearlo.

PALABRAS CLAVE: crisis ambiental, digestión anaeróbica, biogás, mitigación ambiental, sostenibilidad, rentabilidad.

ABSTRACT

The environmental crisis demands the implementation of mitigation actions, one of them is the recycling of energy from animal waste (biofuels), since several previous investigations indicate the feasibility of generating biogas using a bio digester, in this investigation a bio digester to take advantage of the cattle excreta, generated in the Hacienda Rodeopamba Lot 2.

When comparing the advantages and disadvantages of the Chinese, Hindu and Taiwanese or tubular models, under the atmospheric and climatological conditions presented by Hacienda Rodeopamba Lot 2, it is determined that the most suitable bio digester for the possible uses of biogas is the tubular model; This is designed following the procedure established by the Martí Herrero Guide, being the activities: identification of the baseline, determination of the load and volume, sizing of the bio digester, selection of the reactor material, sizing of the trench, pressure analysis operation, gasometer design, greenhouse and catchment and conduction piping system.

It is determined that the volume of the bio digester is 7.84 m³, the ratio of length to diameter is 5.52, which is within the acceptable range, considering the adequate dimensioning; Due to the characteristics of the materials, in this case it will be used in a double layer, polyethylene with a length of 7.5m that has sufficient mechanical resistance and withstands pressures greater than 10kPa., the trench will be oriented from west to east, to optimize solar radiation.

It is to be expected that the results generated will be adequately socialized, because bio digesters contribute to environmental mitigation, sustainability and economic support for those who decide to use it.

KEYWORDS: environmental crisis, anaerobic digestion, biogas, environmental mitigation, sustainability, profitability

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Actualmente la mayoría de energías utilizadas son no renovables y contaminantes, esto más el consumismo y crecimiento poblacional, han derivado en el calentamiento global, e impulsado la búsqueda de Energías Renovables No Convencionales (ERNC); una alternativa de éstas son los biocombustibles, obtenidos a partir de la biomasa, materia orgánica proveniente de plantas, residuos de animales y humanos; cuyo aprovechamiento permite contribuir a la mitigación de los efectos del cambio climático (Zarta, 2018).

La industria ganadera tiene alto impacto ambiental, los residuos generados son un problema que debe controlarse, debido a que sus excretas emiten gases que incrementan el calentamiento global, especialmente el óxido nitroso (N_2O) que es 296 veces más perjudicial que el dióxido de carbono (CO_2). Cada animal produce entre 4 y 6 kg de estiércol diarios, 80% del nitrógeno se descompone y volatiliza como amoníaco (NH_3) y desprende de 37 a 170 ml de metano (CH_4) por kilogramo de excretas (Bermúdez, 2017).

En Ecuador, el consumo de gas licuado (GLP) es fundamental para la subsistencia de las personas, pues se usa para cocinar alimentos, lo que incrementa la dependencia por energías no renovables; en zonas apartadas se opta por madera, esto exige buscar alternativas para reemplazar al GLP y la leña, por un gas ecológico, que contribuya a preservar la naturaleza.

El biogás es un combustible gaseoso, proviene de la descomposición de la materia orgánica (MO), bajo la ausencia de oxígeno, proceso que se conoce como digestión anaerobia, a su vez, es una método de tratamiento de residuos, permite reducir la contaminación y producir energía (Mantilla, Duque, & Galeano, 2016).

El presente proyecto buscó diseñar un biodigestor en una finca ubicada en provincia de Pichincha, sector Chillogallo, en la parroquia Lloa en San Juan de Chillogallo, definiendo los parámetros para su construcción; para aprovechar los residuos producidos por el ganado vacuno, para evitar que los mismos sigan contaminando fuentes hídricas cercanas y sus gases sean liberados a la atmósfera.

El diseño y construcción de un biodigestor permite utilizar todos los residuos orgánicos y transformarlos en biol y biogás, su uso presenta oportunidades para incrementar la producción e ingresos de los pequeños agricultores; el biogás tiene entre 50 % a 70 % de metano (CH_4), que es en combustible limpio, permitiendo controlar su emanación hacia la atmósfera y asegura la obtención del abono natural (biol) listo para ser usado en los sembríos (Herrero J. M., 2019).

La construcción de un biodigestor presenta una serie de beneficios: disponer de biogás y generar energía limpia, accesible y segura, además de proveer de biol, fertilizante orgánico; en general de reducen los costos energéticos y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En la región ya se han visto experiencias del empleo de biodigestores, en Ecuador también a través del convenio con otros países se han desarrollado proyectos de biodigestores en distintas provincias del país; ya se promueven modelos de biodigestores, donde la mayor fortaleza es la credibilidad de su funcionamiento, al satisfacer las demandas de los usuarios, por lo tanto, este proyecto ha buscado resolver el problema antes descrito.

1.1 Objetivo general

Diseñar un biodigestor para el aprovechamiento de los residuos orgánicos de ganado vacuno y obtención de biogás.

1.2 Objetivos específicos

- Levantar la información base para conocer el estado actual de la finca agropecuaria y las condiciones del lugar.
- Diseñar el biodigestor con base en los datos levantados y las condiciones del lugar.
- Elaborar un manual para la operación, reparación y mantenimiento del biodigestor.

1.3 Fundamentos teóricos

1.3.1. Digestión anaeróbica

Las actividades ganaderas generan residuos que impactan negativamente al ambiente, o material orgánico que puede aportar a la sustentabilidad. Desde esta perspectiva, el manejo eficiente del estiércol a través de la digestión anaerobia, proceso biológico en el que los reactantes, materia orgánica son descompuestos en subproductos útiles y sustentables como el biogás (Albarracín, 2016).

La digestión anaeróbica es una fermentación microbiana sin presencia de oxígeno, que principalmente genera una mezcla gaseosa, llamada biogás, conformada por metano CH_4 entre 50% a 70%, y dióxido de carbono CO_2 entre 30% a 50%, además de trazas en bajas proporciones de nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno. La composición del biogás resultante, varía en función del material orgánico empleado y el proceso utilizado, se producen 350 litros de biogás por cada kilogramo de sólidos degradables.

Adicionalmente, se produce una sedimentación o lodo, que contiene a los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica, esta biomasa residual tiene alto contenido de humedad, residuos vegetales, animales y humanos (Alvear, 2017). García (2016) señala que el proceso de descomposición anaeróbica se produce en cuatro fases, que se ilustran a continuación.

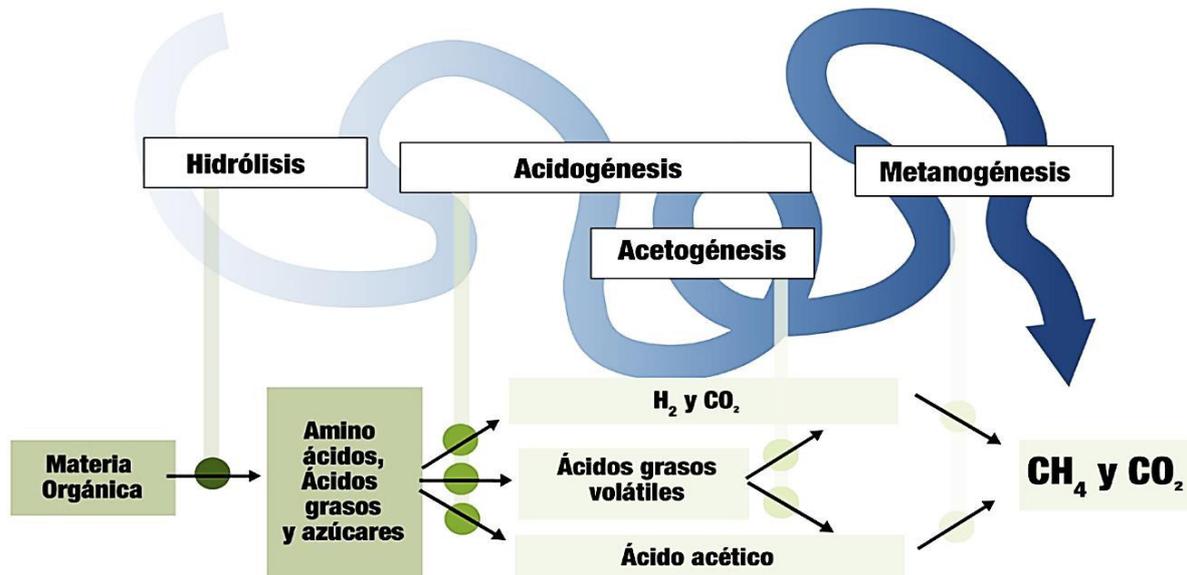


Figura 1. Fases de descomposición anaeróbica

Fuente. (Martí Herrero, 2019, pág. 25)

En la digestión anaerobia intervienen múltiples microorganismos heterogéneos que aportan a la degradación de la materia orgánica e impulsan reacciones bioquímicas complejas. Hilbert (2017) describe cada una de las fases inmersas en este proceso:

- Fase de hidrólisis: en esta fase los compuestos orgánicos más complejos se despolimerizan dando lugar a moléculas más solubles y degradables.
- Fase acidogénica: los compuestos solubles más sencillos se metabolizan por acción de las bacterias acidogénicas, lo que da lugar a ácidos grasos, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios.
- Fase acetogénica: en esta fase los microorganismos acetogénicos transforman los ácidos grasos, de la fase anterior en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Fase metanogénica: finalmente en esta etapa es donde los microorganismos metanogénicos producen metano CH₄ a partir de los productos de la fase anterior.

1.3.2. Biogás

Es una mezcla de gases producto de la digestión anaeróbica, la materia orgánica se descompone principalmente en biogás, además de energía en forma de calor y nueva biomasa (Hilbert & Moreno, 2016).

Cada kilogramo de materia orgánica degradada produce entre 400 y 700 litros de biogás, cuya composición depende del sustrato, la fermentación (digestión) y el diseño técnico de la planta (FNR, 2017). La siguiente tabla muestra las principales características del biogás.

Tabla 1. Características del biogás

Variable	Detalle
Composición	55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido El olor del biogás desulfurado es imperceptible
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Fuente. (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011, pág. 19)

En el proceso de producción y aprovechamiento de biogás se identifican cuatro etapas (García, 2016):

1. La gestión de los residuos comprende el manejo del sustrato, abordando el almacenamiento, preparación, transporte y alimentación.
2. La recuperación del biogás, a través de la digestión anaerobia.
3. Compostaje, que corresponde al almacenamiento, tratamiento y esparcimiento en el campo del digesto (abono orgánico).
4. Almacenamiento, tratamiento y utilización del biogás.

Al mezclar el biogás en una proporción de 1:20 con oxígeno, se vuelve un gas altamente explosivo, por ello, su uso ha crecido y se utiliza como combustible para motores con ignición a diésel o gasolina, para cocina, calentamiento de agua y otros usos, debiendo ser manejado con los cuidados que requiere todo gas combustible (Padilla & Rivero, 2016).

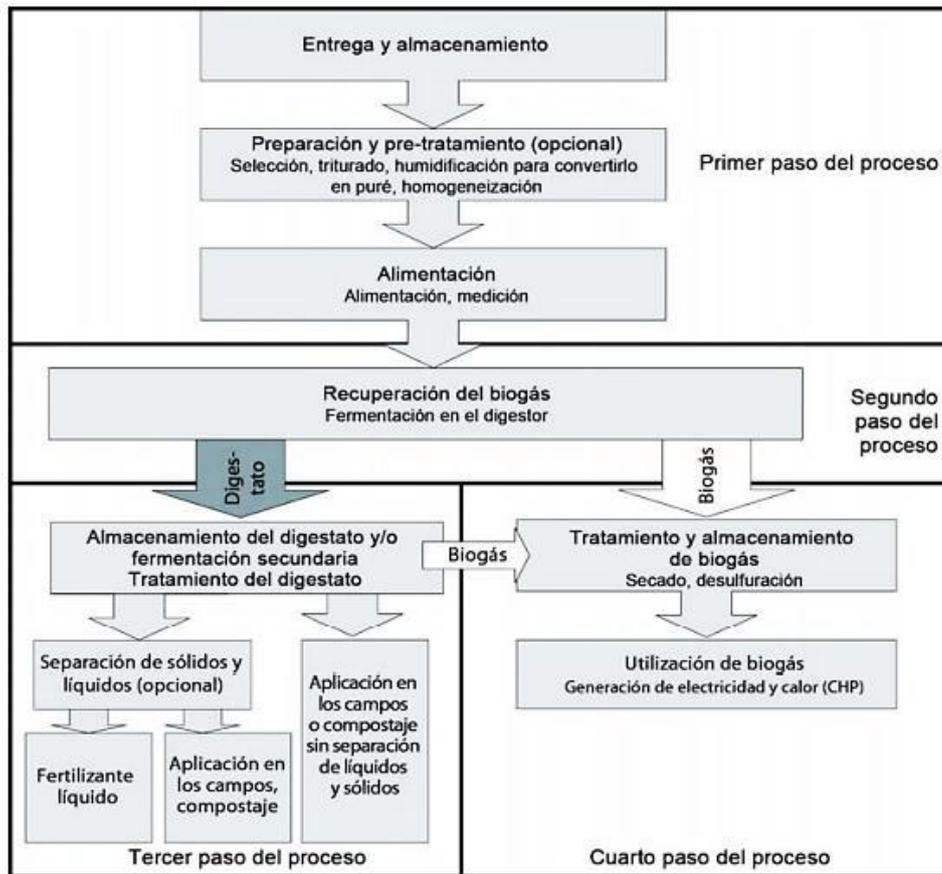


Figura 2. Etapas del proceso de producción del biogás

Fuente. (FNR, 2017, pág. 42)

1.3.3. Biodigestores

Un biodigestor es una estructura en el que la biomasa se mezcla con agua para formar una suspensión y facilitar el proceso de digestión anaeróbica, estabiliza la materia orgánica, transformándola en biogás y fertilizante, cuando el contenido de metano CH_4 es superior a 45% es inflamable (Martí, 2017).

Besel (2016) señala que los biodigestores pueden ser discontinuos o batch, semicontinuos o continuos. En los discontinuos la carga se realiza una sola vez hasta que deje de producir biogás, luego se descarga para nuevamente cargarlo, mientras que, el semicontinuo es el más utilizado en el medio rural y el más aplicable en esta investigación, son digestores pequeños, los diseños más populares son el chino e hindú, diariamente se cargan y producen una cantidad semi constante de biogás al día; los sistemas continuos son plantas industriales grandes que se emplean para tratamiento de aguas residuales.

Son varios los tipos de digestores que se emplean en diversos lugares del mundo, se detallan los más aplicables para esta investigación que son de tipo semicontinuo.

Digestor chino circular de domo fijo. Es uno de los sistemas más difundidos por su forma circular, elaborado en mampostería de ladrillo o cemento, con un domo fijo y sin partes metálicas a excepción de un tubo de acero para entregar el gas.

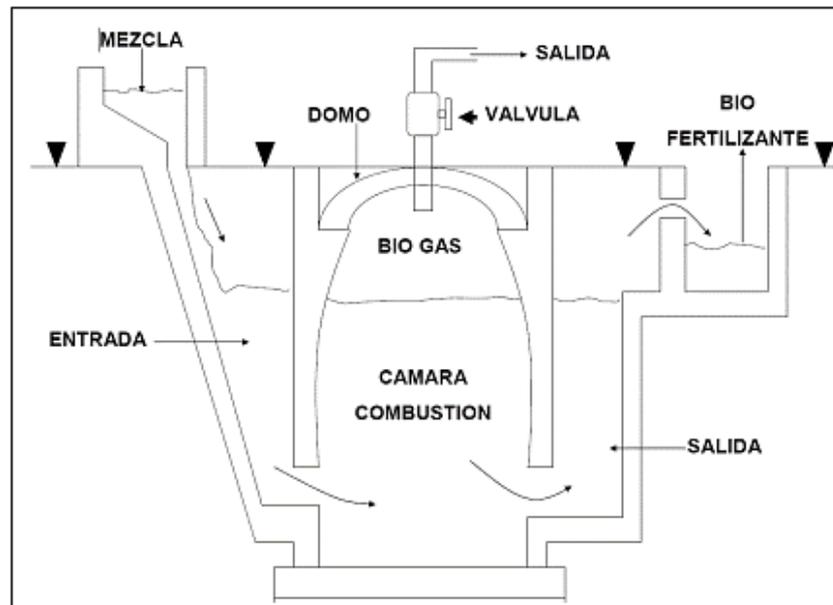


Figura 3. Digestor de domo fijo
Fuente. (Samani, 2017)

Para su construcción se requiere un nivel alto de dominio en conocimientos técnicos. El tanque del digestor es un cilindro de concreto parcialmente bajo tierra con una altura de 2.5 a 4 veces mayor que su diámetro, su tasa de producción de gas es de entre 20 a 30% del volumen del digestor por día; se coloca un domo invertido en acero sobre la mezcla del digestor para recoger el gas producido. En la medida en que se acumula el gas, el tanque de acumulación sube. La capacidad recomendada del tanque de almacenamiento es del 50 al 60% de la producción diaria de gas (Cervantes, 2017).

Digestor hindú de tambor flotante o Janata. Posee una cubierta con forma de domo construida sobre el digestor, que sirve para almacenar el biogás, ésta se levanta o baja de acuerdo a la cantidad de gas almacenado, puede construirse sin el domo de acero, haciendo de ésta una alternativa atractiva. En Pakistán, se ha desarrollado un modelo con sello externo de agua para excluir los malos olores y contrarrestar la acción corrosiva del ácido sulfhídrico alrededor de la campana colectora, lo que reduce el mantenimiento y las pérdidas de gas, pero tiene mayor costo de construcción (Chávez, 2017). En Filipinas se construye un modelo con tanque digestor de dos compartimentos, el lodo mayoritariamente se acumula en el ingreso, en la primera cámara, así prever posibles obstrucciones del tubo de conexión hacia la siguiente cámara, se usa un acumulador de gas flotante (García, 2016).

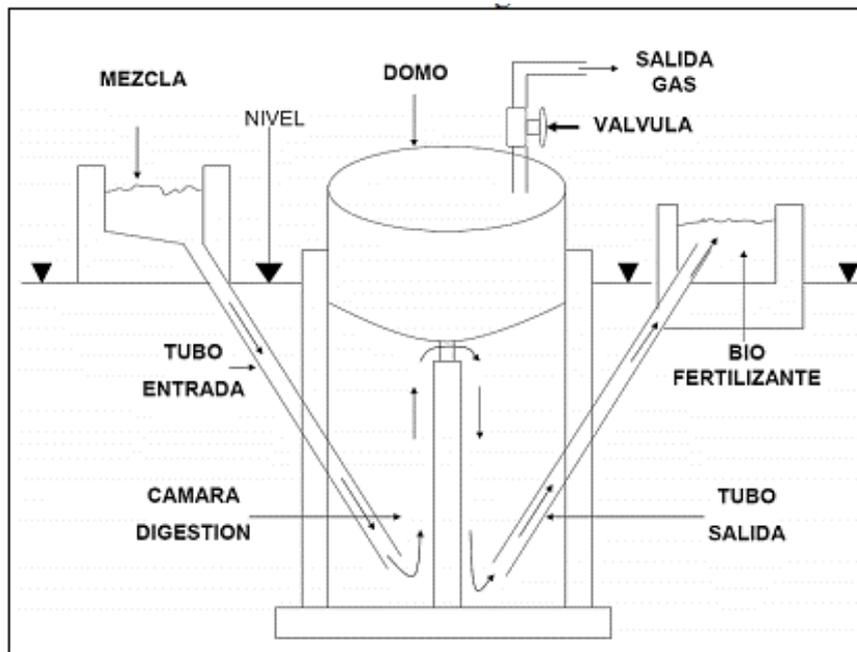


Figura 4. Digestor Janata

Fuente. (Samani, 2017)

Digestor tubular de polietileno. Desarrollos recientes derivan en digestores tubulares fabricados en polietileno de bajo costo y eficiencias considerables, cuya dimensión varía de 100 a 400 m³ en volumen, son baratos, presentan facilidad para transportar e instalar (Besel, 2016).

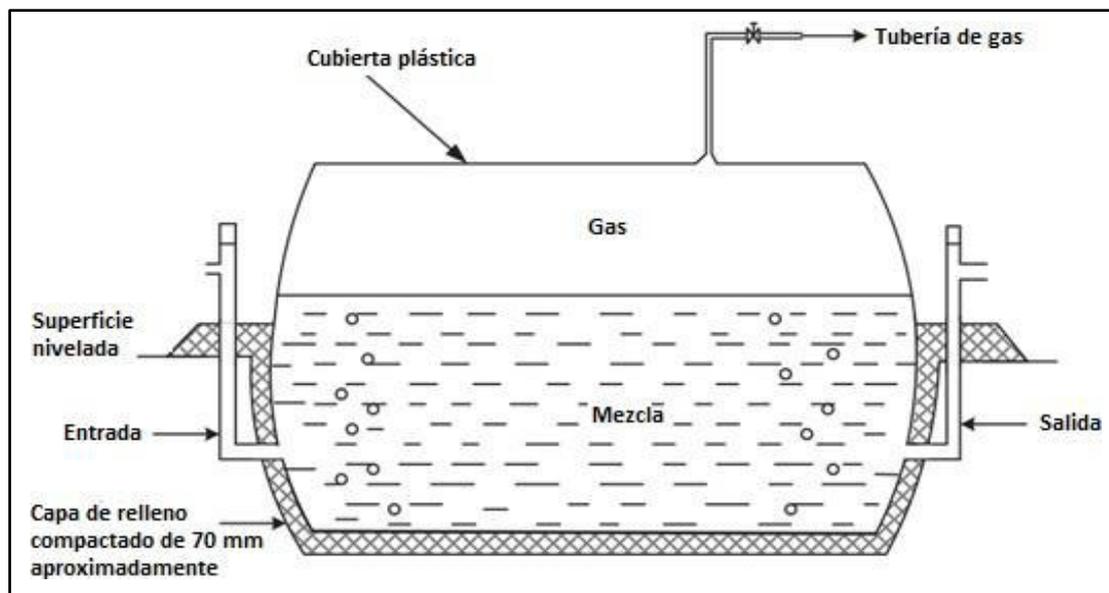


Figura 5. Digestor tubular de polietileno

Fuente. (Cervantes, 2017)

Su origen se remonta a 1960 en Taiwán, está fabricado con una manga o bolsa de material plástico inflable, su diseño integra en un solo cuerpo, la unidad para la digestión, el gasómetro

y el tanque de sedimentación. El sustrato ocupa parcialmente el volumen del digestor y deja un espacio para el gas, conforme la manga se infla, el gasómetro se llena. La bolsa debe apoyarse en el suelo hasta el nivel contenido de mezcla, esto se logra colocándola en una zanja junto con la tubería de salida a nivel del suelo (García, Alamo, & Aldana, 2018).

Este tipo de biodigestor basa su funcionamiento en la digestión anaeróbica por flujo pistón, debido a la forma en la que internamente se traslada la carga. Su reactor es una manga plástica, lo que minimiza la inversión en materiales y mano de obra, en zonas de sierra y altiplano, se construye adicionalmente un invernadero, para calentarlo aprovechando la energía solar (García, Alamo, & Aldana, 2018).

El biodigestor tubular consta de varias piezas y partes, entre las que se resalta las siguientes:

Pozo de entrada, comprende un sistema que canaliza los residuos hacia un tanque de almacenamiento o estercolero, para evitar la infiltración de agua lluvia y que produzca una variación en la relación del estiércol – agua, de 1:3, este tanque debe estar cubierto.

Reactor, es el mecanismo donde ocurre la transformación de la materia orgánica, para el caso es una bolsa de material plástico de geomembrana de poli cloruro de vinilo (PVC) o Polietileno (PE), que contiene toda la materia orgánica sometida al proceso de digestión.

Pozo de salida, para que desfogue o la extracción del afluyente (lodo), consta de 3 a 5 tubos de sobrenadante instalados a diferentes niveles, con un diámetro de 15 cm para evitar obstrucciones, o un único tubo con válvulas a diferentes niveles. Estos se colocan sobre bloques a lo largo del suelo inclinado del digestor, el lodo se eliminará por el centro del reactor (Silva, 2017).

Invernadero, para proteger la manga de los rayos UV, en regiones frías como en la que se asienta la Finca Rodeopamba Lote 2, cuya temperatura oscila normalmente entre 8°C y 23°C, y en los meses más fríos alcanza 4°C con vientos, heladas y lloviznas, su uso es imprescindible para incrementar la temperatura interna de la manga.

Sistema de biogás. Al mezclar el biogás en una proporción de 1:20 con oxígeno, se vuelve altamente explosivo, por ello es utilizado. Al conducirse hacia el sitio de aprovechamiento, debe manejarse como un gas combustible, teniendo cuidado con las tuberías de conducción no tengan fugas, habrá una mayor caída de presión mientras más larga sea la tubería, en este caso se deberá adaptar a la conducción un soplador y un sistema para separar el agua de condensación, pues el biogás suele estar saturado con agua. El ácido sulfhídrico generado al mezclarse con agua condensada forma ácidos corrosivos, a lo que son sensibles los refrigeradores y artefactos para agua caliente, para removerlo se puede usar sistemas donde el H₂S es oxidado biológicamente (Herrero J. , 2019).

1.3.4. Antecedentes investigativos

En todos los países latinoamericanos, entre ellos Ecuador, se ha incitado a implementar biodigestores para generar biogás y gestionar los residuos orgánicos con el fin de promover la sostenibilidad, entre otros fines.

En el país se han identificado varias investigaciones que demuestran la factibilidad de su desarrollo:

- En 2009, Ulises Monar diseñó un biodigestor en la provincia de Bolívar para una finca en el recinto San Luis de las Mercedes, para procesar residuos orgánicos y obtener biogás y bioabono, logrando una producción diaria de biogás de 5 m³ que cubre 35% del consumo de energía y bioabono que sustituye 86% de químicos.
- El 2010, en Intag, cantón Cotacachi, provincia de Imbabura a 4.120 msnm, la Asociación de Campesinos ACAI implementó un biodigestor para la producción de biogás y bioabono líquido (biol).
- En otros países de la región se han identificado investigaciones más recientes: en 2017, la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo desarrolló una investigación que establece la factibilidad de generar biogás mediante un biodigestor, para cubrir la alta demanda de electrificación de la región.
- En 2013, en Ixtapaluca, México, en el establo Los Montañas, Juan Doroteo diseñó un biodigestor para aprovechar las heces de ganado vacuno y generar biogás para cubrir toda la demanda de energía eléctrica del establo.

1.3.5. Parámetros de control

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico complejo, es importante controlar varias condiciones para verificar que se produzcan las reacciones inmersas en ella como: tipo de sustrato, nutrientes y concentración de minerales traza, pH, temperatura, toxicidad y condiciones redox óptimas.

a. Temperatura

La temperatura determina el tipo de fermentación, existen tres los rangos de temperatura en las que los microorganismos anaeróbicos pueden desarrollarse.

Los microorganismos para lograr degradar la materia orgánica requieren de un cierto tiempo, para lo cual la temperatura es determinante. Mientras mayor sea la temperatura, el tiempo de retención o fermentación para obtener biogás será menor, en consecuencia, la temperatura determina el volumen del digestor (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

Tabla 2. Temperatura y tiempo de fermentación Anaeróbica.

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psicrophilica	4-10 °C	15-18°C	20-25°C	Sobre 100 días
Mesophilica	15-20 °C	25-35°C	35-45°C	30-60 días
Thermophilica	25-45°C	50-60°C	75-80°C	10-15 días

Fuente. (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011)

La digestión mesófila permite una permanencia intermedia con temperatura controlada (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

b. Composición bioquímica y naturaleza de la materia prima.

Existen diversas materias primas que pueden emplearse, los mismos pueden ser residuos orgánicos de origen vegetal, animal, doméstico, agroindustrial u otros.

Tabla 3. Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica

Características	Clase	Tipo de sustrato	Características cuantitativas	Degradación
Sólido	1	Basura Doméstica	> 20 % ST 40-70 % Fracción Orgánica	Pueden degradarse eficientemente en digestores tipo Batch (por lotes).
		Estiércol sólido		
		Restos de cosecha		
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	2	Heces animales	100-150 g/l DQO 5%-10% ST 4%-8% SV	Se degradan eficientemente en digestores mezcla completa de operación continua.
Fluidos con alto contenido de sólidos suspendidos (SS)	3	Heces animales de cría y levante diluido con agua de lavado	3-17 g/l DQO 1-2 g/l SS	Presentan mayor dilución y DQO menor, por lo que deben tratarse con digestores de alta eficiencia, como los de filtro anaerobio.
		Aguas residuales de mataderos		
Fluidos muy contaminados, sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de agroindustrias	5-18 g/l DQO	Por su alto contenido de DQO deben ser degradados en digestores aerobios intensivos para mayor eficiencia.
		Aguas negras	4-500 g/l DQO	

Fuente. (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011)

Los sustratos se clasifican en función de su nivel de dilución, apariencia física, grado de concentración y características cuantitativas, como: el porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO). Cada grupo tiene características de degradación que los hace ser eficientes en cierto tipo de biodigestores (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

c. Tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica

El volumen de sustrato a cargar diariamente al digestor, es inversamente proporcional al tiempo de retención, al incrementarse la carga se reduce el tiempo de retención, junto a la velocidad de carga son los principales parámetros de diseño. La materia orgánica o sólidos volátiles (SV) es la parte de la materia seca (MS), que durante la incineración a más de 550°C se volatilizan (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

Los residuos animales contienen más del 10% de MS, por ello deben diluirse antes de ser tratados. La fermentación de biogás requiere un rango de concentración de MS entre 1% a 30%, dependiendo de la concentración óptima de temperatura (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

Tabla 4. TRH en los diversos climas

TRH	Características
30 – 40 días	Clima tropical con regiones planas.
40 – 60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos.
60 – 90 días	Clima temperado con inviernos fríos.

Fuente. (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011)

d. Concentración de los sólidos

El nivel de sólidos totales presentes es importante en la decantación primaria, por ello se busca reducir hasta 30% la demanda de oxígeno y 60% de sólidos suspendidos en el agua residual. Los productos residuales del proceso serán sólidos inorgánicos, líquidos y gases. Los líquidos deberán ser recirculados al proceso de tratamiento del agua residual con el objeto de disminuir el volumen de fango a la salida de la digestión. Los gases deberán ser extraídos del digestor y procesados para obtener energía y la materia inorgánica sólida, por su carácter inerte, no deberá presentar problemas de evacuación (Padilla & Rivero, 2016).

e. Potencial de hidrógeno (pH) y alcalinidad

Los organismos que intervienen en cada fase de la digestión anaerobia son diferentes, siendo necesario equilibrar la producción y regresión de ácidos, para que los diversos micro organismos puedan coexistir y desarrollarse. El control de pH en los lodos en digestión, determinara si los procesos se desarrollan adecuadamente, los microorganismos productores de metano no sobreviven en un pH inferior a 6.2, el pH cae progresivamente y los ácidos no se degradan. El lodo digerido debe tener pH entre 7 y 8, ya que la reacción alcalina es la base para un tratamiento apropiado (Hilbert J. , 2017).

En consecuencia, la concentración de ácidos volátiles, producto de la fermentación, inciden en ella pues pueden acidificar la materia prima del proceso; los valores óptimos están entre 50 y 500 mg/l como ácido acético y el máximo en 2,000 mg/l; el incremento en la concentración de ácidos volátiles puede ser causa de una sobrecarga de alimentación o la inhibición de metano bacterias (Hilbert J. , 2017).

f. Mezcla

La digestión anaeróbica involucra el equilibrio entre varios tipos de bacterias, por ello es importante lograr un mezclado homogéneo continuo para que los microorganismos activos tengan mayor contacto con el estiércol proporcionado, para que exista una homogeneidad térmica y se prevea la estratificación, para reducir el tiempo de biodigestión y acelerar la producción de biogás (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

Para incrementar la producción de gas y disminuir el THR se emplea la agitación, porque permite: que los productos intermedios y finales, de la temperatura y sustrato en el biodigestor tengan una distribución uniforme; mayor contacto entre el sustrato y microorganismos, así evitar que se formen cúmulos alrededor de las bacterias; y prever la acumulación de lodo en la parte superior del digestor, con el fin de impedir que salga el biogás (MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011).

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1. Descripción de los procedimientos experimentales

2.1.1. Tipo y diseño de investigación

El tema desarrollado en el presente proyecto de titulación corresponde a investigación aplicada pues se basa en el conocimiento adquirido sobre los biodigestores y su diseño, para localizar esta infraestructura en una hacienda ganadera de la provincia de Pichincha, cantón Quito.

La investigación se extendió al personal de la hacienda y al entorno; la información se acopió en fichas, videos, fotos y audios.

Los procedimientos realizados para cumplir los objetivos específicos planteados fueron:

- Para levantar la información base y conocer el estado actual de la finca agropecuaria y las condiciones del lugar, se realizaron visitas al campo para verificar: las condiciones del ganado vacuno y su cantidad; el peso de estiércol disponible diariamente, la disponibilidad de agua, el tipo de infraestructura con que cuenta la Hacienda Rodeopamba, el emplazamiento de las construcciones actuales y la disponibilidad de terreno para la construcción del proyecto, además se establecieron las condiciones atmosféricas y climatológicas.
- Para diseñar el biodigestor, se ha considerado la información bibliográfica técnica disponible, y la levantada *in situ*: condiciones climatológicas y atmosféricas del lugar, variaciones de los parámetros del biodigestor, cantidad de biogás a producir y sus posibles usos.
- Para validar el diseño del biodigestor, se han establecido los parámetros a emplear una vez que entre en funcionamiento como: temperatura, tiempo de retención, DBO, DQO₅, porcentaje de sólidos, pH.
- Para elaborar el manual, para la operación y mantenimiento del biodigestor, se han revisado herramientas similares, lo que ha sustentado su contenido, respecto a procedimientos específicos para su alimentación, conexiones, uso del biogás, y las acciones diarias de su operación y control; adicionalmente se ha planificado una capacitación para los propietarios y usuarios.

2.1.2. Línea base del biodigestor

La Finca Rodeopamba Lote 2, se encuentra en la parroquia de Lloa, barrio San Juan de Chillogallo, en el cantón Quito, perteneciente a la provincia de Pichincha, se encuentra a una altura de 3.400 msnm, con una latitud y longitud de: -0.289899 y -78.642881, datos extraídos de la toma con GPS, la temperatura oscila entre los 8°C - 23°C, y a su vez en los meses más fríos alcanza 4°C, con vientos, heladas y lloviznas.

La recopilación de la información en campo fue la base para el diseño del biodigestor, por ello, se determinaron algunos parámetros y consideraciones esenciales que deben obtenerse de campo y tenerse en cuenta para lograr un diseño eficaz.

La ficha empleada para el acopio de información en campo fue la siguiente.

Tabla 5. Ficha para la recolección de información

Datos recopilados en campo			
Ubicación:			
Altitud(msnm):	Temperatura(°C) Max: Min:	N° de animales:	N° de animales Estabulados:
N° de animales Sin Estabular:	N° de horas estabulados:	Estiércol diario:	Disponibilidad de agua:
Limpieza de establos:		Diseño de calefacción solar pasiva:	
Observaciones:			

La información fue proporcionada por los dueños de la finca, quienes realizan todas las labores, estableciéndose que:

La principal actividad que se desarrolla en esta finca, de 15 hectáreas es la ganadería para producción de leche, en este espacio se albergan 25 cabezas de ganado, que se corresponden a:

- 12 vacas de ordeño, ganado productor de leche que se encuentra estabulado por horas y el restante del tiempo se encuentran pastando.

- 9 cabezas de ganado seco, en crecimiento, machos y hembras, y vacas en estado de gestación en su período sin ordeño, siempre pastando.
- 4 terneros, crías recién nacidas y en período de lactancia, estabulado por edades y períodos.

La limpieza del establo, donde se realiza el ordeño 2 veces al día.

La finca cuenta con un estercolero, de 6.4m x 2.10m x 1.45m, el mismo se encuentra conectado a la salida del establo, para recolectar todos los residuos de la limpieza.

2.1.3. Estiércol

Para obtener el volumen del estiércol producido por día, se siguió el procedimiento detallado en el plan de muestreo disponible en el anexo 2. La cantidad de estiércol recolectado en el establo, se determinó de acuerdo al proceso de limpieza realizado por los dueños de la finca.

2.1.4. Agua residual

La cantidad de agua a regar al biodigestor está en función de la cantidad de sólidos totales de los residuos cargados y el tipo de carga, para cargas diarias (semi continuas) el estiércol de ganado bovino se introduce en una proporción de 1:3 (estiércol agua), lo que permite que el residuo se inserte lo más homogéneo posible, con las condiciones fisicoquímicas apropiadas y sin elementos que puedan representar un riesgo para el digestor (Silva, 2017).

2.2. Elección del modelo a emplearse

La implementación de un Biodigestor no solo representa una herramienta de mitigación para contrarrestar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), y disminución del cambio climático, sino también una herramienta de sostenibilidad y apoyo económico, para quienes deciden emplearlo. En este caso en particular, es una inversión, debido a que permitirá en el futuro, disminuir los costos asociados al transporte y consumo que demandaba el uso de GLP.

Con base en la recopilación de datos, la sistematización y fuentes bibliográficas, se estableció el modelo de biodigestor que se adapta de manera óptima a las condiciones atmosféricas y climatológicas presentadas, así como a los posibles usos del biogás.

Se han previsto y considerado posibles escenarios y variaciones para que su funcionamiento sea óptimo.

Para proporcionar un criterio que permita elegir el modelo de biodigestor más apropiado para el caso de estudio, en función del análisis de ventajas y desventajas de los digestores, de domo fijo y tubulares, en la siguiente tabla se compararon los diversos modelos.

Tabla 6. Matriz comparativa de modelos de biodigestores.

Factor	Biodigestor Chino	Biodigestor Indio	Biodigestor Taiwanés
Económico	Costos elevados a causa de los materiales de construcción y obra especializada. Alto riesgo de fisuras, que incide en aumento de costos.	Alta inversión por cúpulas metálicas y materiales de construcción, transporte e instalación de la cúpula.	Puede emplearse material de reciclaje, por lo que su inversión es baja.
Construcción	Se construye <i>in situ</i> con mano de obra especializada.	Demanda mano de obra especializada de construcción y metalúrgica. Cúpula se construye en talleres y se ensambla en el sitio.	Lo puede instalar cualquier persona que se capacite. Se construye y ensambla <i>in situ</i> .
Personal	Albañil experto y ayudantes	Para la colocación de la Cúpula, demanda más de dos personas.	Se requieren dos personas.
Transporte	Requiere de transporte de materiales para construcción (arena, bloques, cemento, entre otros)	Se requiere de transporte de materiales para construcción, y también para la cúpula	Los accesorios y materiales se pueden transportar con facilidad.

Fuente: Análisis propio desarrollado con base en los criterios de Herrero J. (2019).

Como señala Forget (2018), el modelo tubular, en contraste con los otros dos digestores, es el más eficiente, costo menor, con mayor facilidad de instalación, manejo, mantenimiento y reparación. Un biodigestor de geo membrana de PVC con un volumen total de 10 m³, con 7,5 m³ para la fase líquida y 2,5 m³ para almacenamiento del biogás, tiene una vida útil mayor a 10 años, demanda una inversión aproximada de 800 dólares, misma que se recupera entre 8 y 12 meses de iniciada su operación.

En consecuencia, esta investigación se ha enfocado en establecer una metodología de diseño de un biodigestor tubular para instalar en la Finca Rodeopamba, Lote 2, en el barrio San Juan de Chillogallo, donde se ubica la hacienda ganadera, debido a que es el modelo más apropiado para las condiciones geográficas y ambientales de esta región. Este modelo presenta otras ventajas: puede alimentarse con materia orgánica animal, vegetal y humana,

con un tiempo de retención que puede variar entre 25 a 50 días. El biogás puede almacenarse de forma separada en un gasómetro. Por el uso de un material plástico resistente a la radiación UV para evitar que se inactiven las bacterias metanogénicas, el exterior del digestor es delgado, lo que facilita su calefacción por la radiación solar, por lo que su temperatura promedio interna es entre 2°C a 7°C, mayor a la de los otros digestores, así la producción de biogás es mayor (Forget, 2018).

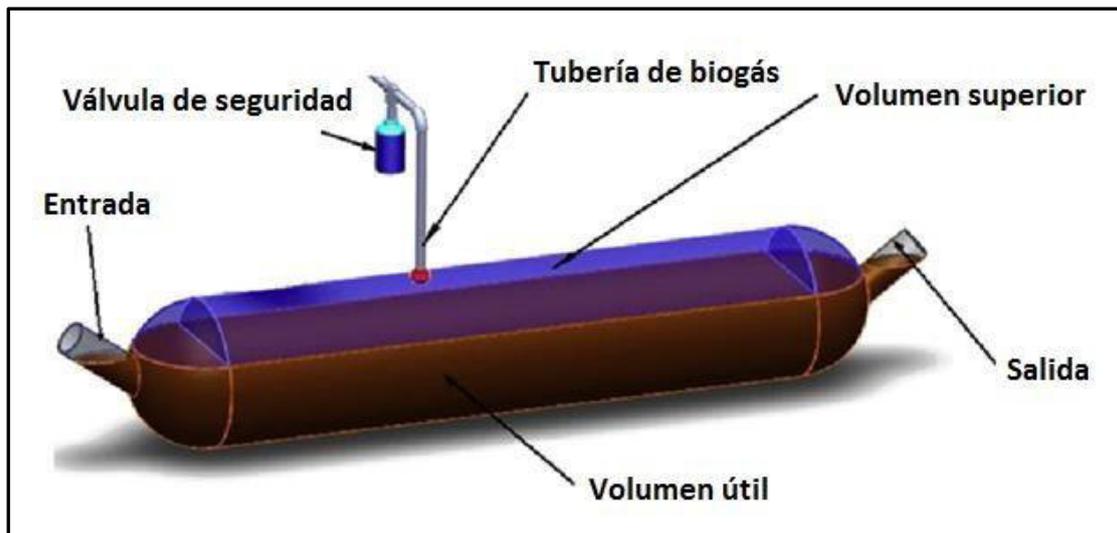


Figura 6. Esquema del biodigestor tubular

Fuente: (Martí, 2017)

Este modelo de biodigestor es de flujo semicontinuo, se alimenta a diario con una mezcla de residuos de ganado vacuno y agua; consiste de un fermentador y cámara de almacenamiento de biogás en forma tubular hecha con polietileno resistente o geomembrana de PVC, que se instala horizontalmente en una zanja excavada en el suelo cubierta de un aislante térmico, con un tubo de admisión del afluente y para la salida del efluente, y un tubo en la parte superior central para la conducción del biogás (Martí Herrero, 2019).

Los residuos entran por un lado y, por el otro sale el material digerido, una parte de la masa se pierde, pues se utiliza para la síntesis de nuevas bacterias, sirve como alimento de las bacterias. Este digestor tiene una válvula de seguridad, está evita la ruptura debido al aumento de presión que puede generarse en caso de producción excesiva de biogás (Herrero J. M., 2019).

2.3. Procesamiento de datos

El modelo de biodigestor empleado fue el *tubular*, por las características climatológicas y su adaptabilidad a las condiciones que se presentan, los datos recopilados en campo se procesan, partiendo de los parámetros a considerar para su diseño.

2.3. Estiércol

En análisis de la cantidad de estiércol medida en campo, tiene el propósito de determinar o estimar la cantidad de residuos que se emplearan para alimentar el Biodigestor, para ello se diferencia el estiércol diario y disponible.

2.3.1. Estiércol diario

La cantidad del estiércol diario corresponde a la cantidad de estiércol que se produce cada día, independientemente de si el ganado, de ordeño y pastoreo, se encuentren o no estabulados, es la cantidad de residuos que se produce en la finca, granja o establecimiento.

Este valor se puede determinar de dos formas, con una medición *in situ* durante una semana y estimar un promedio de los valores medidos, o también se puede determinar este valor a partir de datos teóricos o estimados (Aldana & Sernaqué, 2017).

Es importante conocer si el ganado está pastoreado o estabulado, cuando se diseña el biodigestor, porque cuando el ganado está pastoreado y pasa la noche en un establo, sólo es posible recoger 25% del estiércol; en las zonas rurales de la Sierra en cuanto al estiércol de ganado vacuno, la cantidad de estiércol fresco diario producido por cada 100 kg de peso del animal es de 8kg aproximadamente (García, Alamo, & Aldana, 2018).

Para su determinación teórica se emplea la siguiente formula:

$$\text{Estiércol disponible} = \frac{(\text{Peso del animal en kg})}{100} \times \text{dato teorico de estiércol diario por cada 100kg de peso vivo.}$$

2.3.2. Estiércol disponible

Corresponde a la cantidad de residuos que será cargada al reactor, en este caso, el ganado principal, es decir las vacas, se encuentran semi-estabuladas, la cantidad de estiércol disponible que produce la finca es una parte de la cantidad del estiércol diario, la cantidad cargada al biodigestor será la que se deposite en los establos durante el ordeño.

Calculo de estiércol disponible para animales estabulados un n° de horas:

$$= \left(\frac{n^{\circ} \text{ horas estabulado}}{24 \text{ horas}} \right) \times \text{estiércol diario}$$

2.4. Diseño del sistema

Para el diseño se empleó el documento "Biodigestores Tubulares: guía de diseño y manual de instalación", publicada en el año 2019, la cual tiene sustento científico en la construcción de biodigestores con diseño pasivo de calefacción solar para en clima frío.

Para el dimensionamiento del biodigestor, se consideraron los factores:

- Tipo y disponibilidad de la biomasa.
- Características químicas, biológicas y físicas de la biomasa.
- Aspectos climatológicos y geográficos de la zona

La secuencia que se observó para el diseño del biodigestor fue.

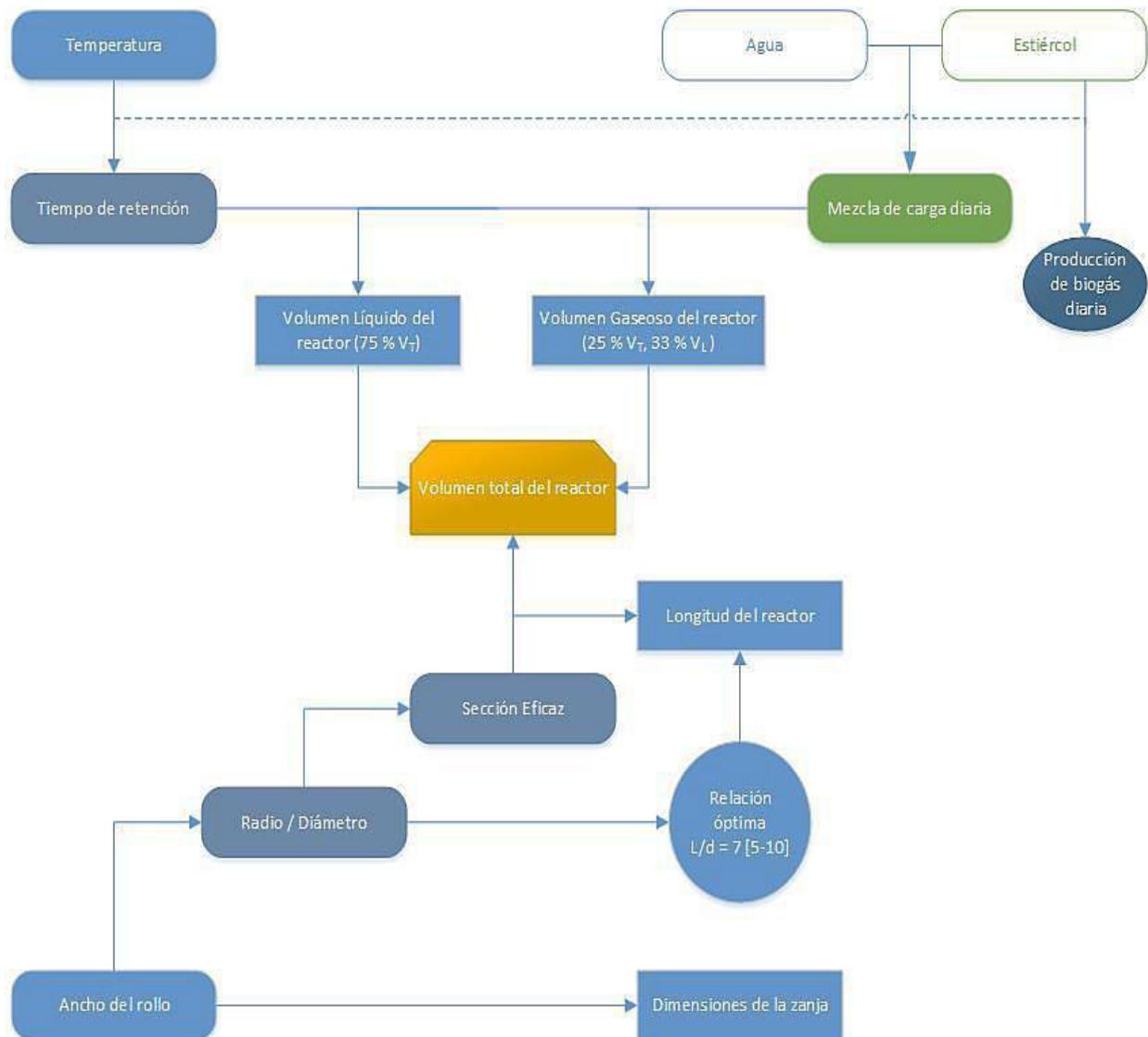


Figura 7. Secuencia de diseño del biodigestor tubular

Fuente. (García, Alamo, & Aldana, 2018)

2.5. Manual de operación

Se elaboró un documento que describe detalladamente cada actividad y los pasos para realizarla, con las instrucciones para las distintas operaciones. Se detalló cómo realizar reparaciones, mantenimiento, operación diaria, problemas más frecuentes y como solucionarlos, lo que permite un manejo óptimo y que el biodigestor tenga una larga vida útil.

Para optimizar la operación del sistema, se capacitó a las personas relacionadas al proyecto, para que conozcan cómo operar correctamente el sistema, para que lo mantengan en buenas condiciones y así prolongar su vida útil.

2.6. Materiales

Es complicado e impreciso elaborar una lista específica de materiales y cantidades a emplearse, porque cada biodigestor debe ajustarse a las condiciones particulares que se presentan, pero es posible proveer una lista de materiales básicos para su construcción.

La lista de materiales, más no cantidades, que se provee a continuación, es una compilación de materiales básicos empleados y sugeridos por la guía empleada en esta investigación.

Tabla 7. Materiales indispensables por cada elemento del biodigestor

Materiales para la construcción de la zanja	
Material	Uso
Sacos o costales	Una vez listo el cavado de la zanja, los sacos permiten darle forma a la zanja donde no la haya tomado.
Plásticos o costales cosidos	Cuando se introduzca el biodigestor a la zanja, se emplearán para protegerlo.

Materiales para la construcción del Biodigestor	
Material	Uso
Manga Tubular	Se recomienda emplear plástico tubular de invernadero de 250 μm en doble capa, por lo que se requiere de dos piezas tubulares, cada una con la siguiente longitud: Long. De la manga = (Longitud zanja +1 m + profundidad zanja) También puede emplearse geo membrana de polietileno de 500 μm , para soldar en forma de manga con el diámetro deseado, en este caso en una sola capa.
Tubería para desagüe de PVC	Puede emplearse de 4" y 6", siendo la de 4" la óptima para cargas líquidas y 6" para estiércoles, siendo el de 6" mejor para realizar el amarre con el plástico tubular. Se requiere un tubo de 3 m, empleándose 1,5 m para la entrada y la otra mitad, para la salida.

Materiales para la construcción del Biodigestor	
Material	Uso
Liga de tubo o cámara de neumático	Dos cámaras de rin 14" o 16", se la puede encontrar en mecánicas como desperdicios, se deben cortar en tiras continuas de 5 cm de ancho.
Brida o adaptador de tanque en PVC	Se emplea normalmente en 1/2" o 3/4".
Tubería de PVC	Al igual que la brida deberá tener las mismas dimensiones 1/2" o 3/4", se empleará para la conducción del biogás.
Complementos de PVC	Se emplea en rosca o pega de PVC, o a su vez unión flex para manguera, los que se necesite para ensamblar el adaptador del tanque con la tee hacia la válvula de alivio.
Cuerda	De al menos 1/4" de pulgada y su largo 2.5 veces la longitud del biodigestor.
Teflón	Para la rosca del adaptador del tanque, 2 aproximadamente
Válvula de alivio	Requiere una tubería en tee de al menos 30 cm, un envase plástico vacío con capacidad de 2 a 3 litros y los accesorios para ajustar la tubería al adaptador.

Materiales para la construcción de la conducción de Biogás	
Material	Uso
Tubería de agua	En tamaños de 1/2" o 3/4" puede emplearse tubería roscable o pegable rígida de PVC, polietileno roscable o tubería flexible para transportar el biogás hasta el punto de consumo.
Válvulas de bola	En tamaños de 1/2" o 3/4" como el adaptador del tanque.
Tee	En tamaños de 1/2" o 3/4" como el adaptador del tanque, 4 aproximadamente.
Codo	En tamaños de 1/2" o 3/4" como el adaptador del tanque. 2 aproximadamente.
Unión universal	En tamaños de 1/2" o 3/4" como el adaptador del tanque.
Cocina	Cualquier cocina o quemador, de preferencia de 2 hornillas, considerando disminuir el nivel de la mezcla con aire aumentando el tamaño del conducto.

Materiales para la construcción de la conducción de Biogás	
Material	Uso
Reservorio	Se lo puede realizar con el mismo material de la manga, pero en forma de almohada de 2m de largo por 2 m de circunferencia es lo recomendable para biodigestores domésticos.

Fuente: (Herrero J. M., 2019).

Si bien la construcción de cada biodigestor requiere una inversión diferente, porque operará en diversas condiciones; al estudiar el mercado local, se tiene como referencia que un biodigestor de similar tamaño al que se diseña en esta esta investigación, con característica de auto limpiable de 8000 litros equivalentes a 8 m³ de marca Rotoplas tiene un precio comercial de 6.450 dólares (Rotoplas, 2021), más 200 dólares para transporte e instalación.

Es importante señalar que, la implementación de un biodigestor a más de una herramienta de mitigación y contribución a la disminución de los efectos del cambio climático, es también un instrumento de sostenibilidad y apoyo económico para quienes deciden emplearlo; en este caso es una inversión, pues permitirá en el futuro, disminuir los costos asociados al transporte y consumo de gas licuado de petróleo.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Objetivo 1

Este objetivo corresponde a “Levantar la información base para conocer el estado actual de la finca agropecuaria y las condiciones del lugar”.

La evidencia del cumplimiento de este objetivo se encuentra en el numeral 2.1.2. Línea base del biodigestor.

3.1.1. Datos generales del lugar

El mapa de la ubicación geográfica de la Finca Rodeopamba Lote 2 es el siguiente.

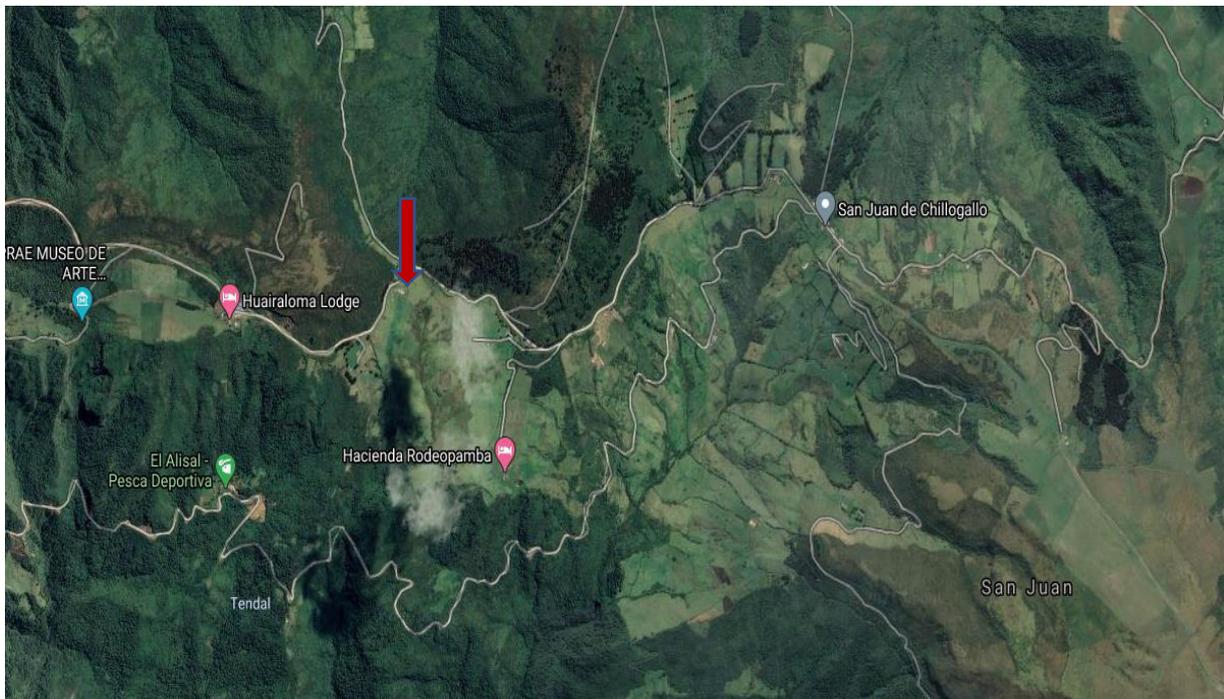


Figura 8. Ubicación geográfica del sitio de estudio

Fuente: (Google Earth, s.f.)

3.1.2. Datos recopilados en campo

Los datos recopilados en el campo, se sintetizan en la siguiente ficha.

Tabla 8. Datos del ganado

Datos recopilados en campo			
Ubicación: Quito, Chillogallo, San Juan de Chillogallo, antigua vía a Santo Domingo, Rodeopamba Lote 2.			
Altitud(msnm): 3200 msnm	Temperatura promedio (°C): 17 Max: 22 Min: 13	N° de animales: 23	N° de animales Estabulados: 13
N° de animales Sin Estabular: 10	N° de horas estabulados: 3 horas diárias	Estiércol diario: 364 kg	Carga diaria: 182 l/d
Estiércol disponible: 45.5 kg	Disponibilidad de agua: Sí	Limpieza de establos: Sí, diaria	Diseño de calefacción solar pasiva. Sí, necesario

Fuente. Estudio de campo

Ya que el barrio San Juan de Chillogallo, donde se asienta la Finca Rodeopamba Lote 2, tiene una temperatura que oscila normalmente entre 13°C y 22°C, y en los meses más fríos alcanza 4°C con vientos, heladas y lloviznas, se requiere diseñar un sistema de calefacción solar pasiva, para aumentar la temperatura interna a la que trabajan las bacterias.

3.1.3. Determinación de la carga y volumen

Es importante establecer la carga real diaria, para evitar el sobredimensionamiento del diseño, afectar los costos para su implementación, y para establecer la dinámica de limpieza y recolección de los residuos.

Para el cálculo de la carga diaria teórica, se emplearon los datos del muestreo de recolección de estiércol, desarrollado en campo cuyo detalle consta en el Anexo 2 de este documento.

Se realizó el cálculo de la carga diaria teórica, siguiendo el procedimiento establecido en la guía de Diseño de Biodigestores Tubulares, éste señala que por cada 100 kilogramos de peso vivo de ganado vacuno se tienen 8 kilogramos de estiércol, obteniéndose una carga diaria teórica de 182 kg/d, y en la carga diaria medida de los datos procesados en campo, se obtuvo un total de 143,78 kg/d.

- **Carga diaria teórica**

Tabla 9. Determinación de la carga diaria teórica

Dato teórico:	8	kg/100 kg peso vivo				
Código y N° de animales	Peso estimado por animal kg	Peso estimado total	Estiércol diario kg	N° Horas estabulado	Estiércol disponible	Carga diaria litros/d
RDP01-13	350	4.550	364	3	45,5	182
Carga diaria total						182

- **Carga diaria calculada**

Tabla 10. Cálculo de la carga diaria

Código y N° de animales	Muestra promedio en kg	Peso promedio por animal kg	Peso total kg	Estiércol diario kg	N° Horas estabulado	Estiércol disponible	Carga diaria total l/d
RDP-01 a RDP-13	82,16	350	4.550	287,56	3	35,95	143,78

$$\begin{aligned} \text{Estiércol diario:} &= \left(\frac{\text{Peso del animal}}{100} \right) * \text{Dato del estiércol} \\ &= \left(350 * \frac{13}{100} \right) * 82,16 \text{ kg} \\ &= 287,56 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Estiércol disponible:} &= \left(\frac{n^\circ \text{ horas estabulados}}{24h} \right) * \text{estiércol diario} \\ &= \left(\frac{3}{24} \right) * 287,56 \text{ kg} \\ &= 35,95 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Carga diaria:} &= \text{estiércol disponible} + \text{agua} \\ &= 35,45 \text{ kg} + (35,45 \text{ kg} * 3) \\ &= 143,78 \text{ kg} \end{aligned}$$

La diferencia entre la carga diaria teórica y la carga diaria real, se debe a que en el proceso de limpieza una parte del estiércol se pierde; esto debe considerarse para evitar el sobredimensionamiento del biodigestor.

- **Volumen medido**

Considerando que el tiempo de retención será de 65 días y que la carga diaria de 109,2 litros, el volumen medido es de 6.269,90 litros.

Tabla 11. Determinación de la carga diaria

Código y N° de animales	Muestra promedio en L	Muestra en m ³	Muestra en kg	Peso promedio por animal kg	Peso total kg	Estiércol diario kg	N° Horas estabulado	Estiércol disponible	Carga diaria Total l/d
RDP-01 a RDP-13	53	0,053	55	350	4.550	192,92	3	24,12	96,42

Volumen medido = *Tiempo de retención * Carga diaria*

$$= 65 * 96,42 \text{ l/d}$$

$$= 6.269,90 \text{ l}$$

El estiércol recolectado al final de la limpieza del establo, después de su mezcla con agua, corresponde a 96 litros de estiércol que alimentarán al biodigestor para la producción de biogás y biol.

3.2. Objetivo 2

Este objetivo corresponde a “Diseñar el biodigestor con base en los datos levantados y las condiciones del lugar”.

3.2.1. Diseño del reactor

La siguiente tabla presenta las temperaturas del ambiente, de trabajo y el tiempo de retención, considerando que el biodigestor va a disponer de calefacción pasiva.

Tabla 12. Datos del biodigestor T° y tiempo de retención

Muestra	Hora	Temperatura ambiente °C	Tiempo de retención (d)	Altitud msnm	Diseño de calefacción pasiva	Temperatura de trabajo (°C)	Consideración
1	05:30	13	65-90	3.400	SI	18-22	Color oscuro + aislante zanja +invernadero
2	12:00	20					
3	18:00	14					

En verano la temperatura es de hasta de 20°C y en invierno 15°C a medio día

Al determinar el volumen de producción de biogás, en función de la temperatura y tiempo de retención esperado, es posible dimensionar el biodigestor, cuyo volumen del reactor depende directamente del volumen líquido que contiene, parámetro que a su vez depende del tiempo de retención y de la carga orgánica diaria; ya que el biogás producido se acumula en la parte superior del reactor, se debe considerar el volumen gaseoso V_G como un tercio del volumen líquido, por lo que el volumen total del reactor es.

$$V_T = V_L + V_G = 4/3 V_L = 1,33 V_L$$

Tabla 13. Volumen del biodigestor

Volumen líquido l	Volumen líquido en m ³	Volumen Biogás m ³	Volumen Total m ³
6.269,90	6,27	1,57	7,84

En consecuencia, se determina que el volumen total que debe tener el biodigestor es 7,84m³.

Tabla 14. Tiempo de retención estimado

Temperatura de trabajo	Tiempo de retención (d)	Biogás (l/kg)
18 – 22 °C	65	33

Tabla 15. Requerimientos de uso de biogás

Se requiere calentar 40 litros de agua diariamente			
Uso	Requerimiento de biogás l/h	Nº Horas al día	Requerimiento final (litros)
Cocina doméstica	300	2	600

$$\text{Circunferencia del cilindro} = \frac{\text{Circunferencia}}{2*\pi}$$

Tabla 16. Dimensionamiento del reactor

	Radio circunferencia							
α	%Volumen Líquido	%Volumen Biogás	Ancho inferior a (m)	Ancho sup b(m)	Prof. p(m)	A. zanja (m ²)	A. biogás (m ²)	A. total (m ²)
7,5	80	20	0,78	1,04	0,98	0,89	0,22	1,11

Tabla 17. Relación en las dimensiones del reactor

α	C (m)	r (m)	a (m) ancho inferior	b(m) ancho superior	p(m) profundidad	A _{zanja} (m ²)	L (m)	D (m)	L/D
7,5	4	0,40	0,64	0,78	0,98	0,89	7,03	1,27	5,5229

Por las características de los materiales, existen distintas opciones para lograr el volumen requerido, es recomendable que el biodigestor no sea demasiado largo ni corto, para favorecer el flujo de la materia orgánica desde la entrada hasta la salida del reactor; la relación entre longitud L y diámetro D debe estar entre 5 y 10, siendo la óptima 7 (Martí Herrero, 2019).

En este diseño, la relación de L a D es 5,5229, que se encuentra dentro del rango aceptable, por lo que el dimensionamiento debe considerarse adecuado.

3.2.2. Material del reactor

Es conveniente que el reactor esté elaborado en plástico tubular, geo membrana de PVC o polietileno (PE); pero estos son materiales difíciles de conseguir en las dimensiones exactas solicitadas. Para el biodigestor, el PE tubular debería tener 300 micrones (μm) de espesor, pero suele fabricarse en 200 μm por ser común su uso en carpas solares, el color del material debe ser negro para que tenga mayor resistencia a los rayos solares (Martí Herrero, 2019).

Por las características de los materiales, existen gran variedad de diseños para lograr el tamaño requerido, es recomendable que los biodigestores, no sean demasiado extenso ni reducido, así permitirá un mejor flujo desde la entrada hasta la salida de la materia orgánica en el interior de la manga. La relación entre longitud de la manga y diámetro del mismo, debe estar entre un resultado de 5 y 10, siendo la óptima 7, como se ha señalado para este caso la relación es 5,52.

Ya que es difícil conseguir el color negro en PE tubular, para este proyecto se empleará PE tubular de 200 μm sin pigmentación en doble capa para que tenga la resistencia suficiente, y se cubrirá el biodigestor con una sábana plástica de color oscuro, para que tenga una mejor protección ante la radiación solar.

En el mercado se dispone de PE en rollos de 50 m y anchos que varían entre 1, 1,5, 1,75 y 2,00m; el ancho de rollo equivale a la mitad de la circunferencia total del plástico.

Tabla 18. Parámetros de los rollos del polietileno tubular

Ancho del rollo (m)	Circunferencia (m)	Radio (m)	Diámetro (m)	Sección eficaz (m ²)
1,00	2,00	0,32	0,64	0,32
1,25	2,50	0,40	0,80	0,50
1,50	3,00	0,48	0,96	0,72
1,75	3,50	0,56	1,11	0,97
2,00	4,00	0,64	1,27	1,27

Fuente. (Martí, 2017)

Se tiene que C corresponde a la longitud de circunferencia del reactor de plástico, para el caso $D= 1,27\text{m}$ por lo que $C= 4\text{m}$, en consecuencia, se empleará PE con un ancho de 2 metros, cuya sección eficaz es de $1,27\text{ m}^2$. Ya que volumen total requerido para el reactor V_T es $7,84\text{m}^3$, el largo de rollo de polietileno requerido es de 6,5 metros al que habrá que incrementar 50 cm a cada lado para realizar el cierre requerido.

3.2.3. Dimensiones de la zanja

Previo al inicio la construcción del biodigestor, se debe diseñar la zanja para colocar el reactor, en regiones frías como la parroquia de Lloa, barrio San Juan de Chillogallo, donde se asienta la Finca Rodeopamba Lote 2, para optimizar la radiación solar la orientación de la zanja debe ser oeste - este.

Es recomendable cavar una zanja de forma trapezoidal con paredes inclinadas, que faciliten el acople a la forma del biodigestor.

Para dimensionar la zanja, primero se debe establecer el área de la campana de biogás, que depende de la longitud de circunferencia del biodigestor; de la longitud y la abertura superior de la zanja (b). Su relación determina el ángulo central θ , mientras mayor sea la longitud de la campana, mayor será la relación entre el volumen gaseoso y el volumen total del biodigestor (García, Alamo, & Aldana, 2018).

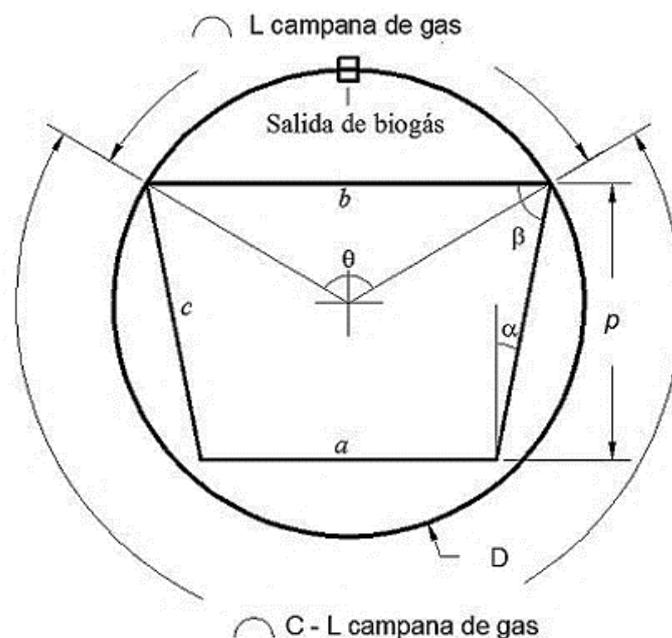


Figura 9. Parámetros de dimensionamiento del biodigestor tubular y zanja trapezoidal
Fuente. (Arrieta Palacios, 2016)

Según la siguiente tabla, el ángulo que incrementa el área de la zanja es entre 5° y 8°, por ello conviene utilizar $\alpha=7^\circ$, para que el volumen líquido (VL) sea aproximadamente 69.5% del volumen total. Al considerar una relación de $f_{\text{campana gas}}= 1,2$ se dispone del valor más adecuado para determinar los demás parámetros de la zanja (Martí Herrero, 2019).

Tabla 19. Tabla de valores de elementos de la zanja

$\alpha_{\text{arbitrario}} (^\circ)$	$\alpha_{\text{arbitrario}} (R)$	$f_{b\text{-fijo}}$	$c (m)$	$a (m)$	f_a	p	$A_z (m^2)$	A_z/A_T
0	0	1.71624043	0.796722495	1.08860247	1.71624043	0.79672249	0.86731408	0.68466649
1	0.01745329	1.71624043	0.810874201	1.06029906	1.67170198	0.8107507	0.87111171	0.68766438
2	0.03490659	1.71624043	0.825533188	1.03098109	1.62556701	0.8250303	0.87436032	0.69022887
3	0.05235988	1.71624043	0.840722511	1.00060244	1.57776295	0.83957033	0.87701723	0.69232626
4	0.06981317	1.71624043	0.856466584	0.96911429	1.52821299	0.85438027	0.87903631	0.69392014
5	0.08726646	1.71624043	0.872791266	0.93646493	1.47683571	0.86947003	0.88036771	0.69497116
6	0.10471976	1.71624043	0.889723975	0.90259951	1.42354485	0.88484997	0.88095751	0.69543675
7	0.12217305	1.71624043	0.907293794	0.86745987	1.36824887	0.90053096	0.88074735	0.69527085
8	0.13962634	1.71624043	0.925531597	0.83098427	1.31085059	0.91652439	0.87967403	0.69442356
9	0.15707963	1.71624043	0.944470183	0.7931071	1.25124681	0.93284219	0.87766903	0.6928408
10	0.17453293	1.71624043	0.964144416	0.75375863	1.18932778	0.9494969	0.87465807	0.69046391
15	0.26179939	1.71624043	1.074936545	0.53217437	0.84064122	1.03830897	0.84143357	0.66423615
20	0.34906585	1.71624043	1.210861528	0.2603244	0.41285618	1.13783764	0.76742989	0.6058169
21	0.36651914	1.71624043	1.241712434	0.19862259	0.31576177	1.15923842	0.74610038	0.58897917
22	0.38397244	1.71624043	1.273954101	0.13413926	0.21429034	1.18118967	0.72214495	0.57006852
23	0.40142573	1.71624043	1.307669786	0.06670789	0.10817985	1.20371638	0.69533301	0.5489029
24	0.41887902	1.71624043	1.342949106	-0.00385075	-0.00285172	1.22684506	0.66541114	0.52528227

Fuente. (Martí Herrero, 2019, pág. 43)

La tabla anterior muestra valores tabulados del área transversal de la zanja, la misma que consta en la guía de Marti.

La longitud conforme el largo del biodigestor debe ser 7 metros aproximadamente; con estas consideraciones se ha determinado el área de la zanja.

Tabla 20. Área de la zanja

A Ángulo	p(m) profundidad	Azanja (m2) Área de la zanja
7,5°	0,9856	0,90112

Se empleará un ángulo de 7.5° para los taludes de la zanja, dado que por el tipo de suelo evitará que se derrumbe.

El recubrimiento o aislante de la zanja puede ser de paja, esto permitirá que la temperatura del biodigestor se mantenga y no se pierda al estar en contacto con la tierra, además protege al material contra la humedad, tendrá una vida útil de 2 años y deberá renovarse con cuidado.

3.2.4. Presión de operación para el biodigestor

El biodigestor es un recipiente cilíndrico de radio interior r y espesor de pared t , que contiene el fluido a una determinada presión; por lo que no existen esfuerzos cortantes, sino sólo normales: tangencial (σ_1) y longitudinal (σ_2), que se relacionan entre sí, donde p corresponde a la presión manométrica del fluido (Arrieta Palacios, 2016).

$$\sigma_1 = 2 \cdot \sigma_2 = \frac{p \cdot r}{t}$$

Considerando la ecuación anterior y el valor del diámetro de 1,27 m determinado, es posible establecer la presión interna máxima del biogás que podría soportar el biodigestor tubular.

Tabla 21. Presiones internas máximas de operación de los biodigestores

Tipo de material	Espesor (t)[m]	Presión interna máxima $p = (\sigma_1 \cdot t) / r$ [kPa]
HDPE Resistencia a la fluencia $\sigma_1 = 12 \text{ Mpa}$	$0,75 \times 10^{-3}$	12,9
	$1,0 \times 10^{-3}$	17,1
	$1,25 \times 10^{-3}$	21,4
	$1,5 \times 10^{-3}$	25,7
PVC Resistencia a la fluencia $\sigma_1 = 15 \text{ Mpa}$	$0,5 \times 10^{-3}$	10,9
	$0,75 \times 10^{-3}$	16,1
	$1,0 \times 10^{-3}$	21,4
	$1,25 \times 10^{-3}$	26,8
	$1,5 \times 10^{-3}$	32,1

Fuente. (García, Alamo, & Aldana, 2018)

Se concluye que la geomembrana de HDPE y el polietileno de PVC tienen suficiente resistencia mecánica para utilizarse eficientemente en la fabricación de biodigestores tubulares, ya que soportan presiones mayores a 1 m de columna de agua, equivalentes a 10 kPa.

Se debe considerar que σ_1 aumenta conforme la geomembrana se va extendiendo (aumento de r y disminución del espesor t), por lo que la presión que puede soportar el material, será cada vez menor.

Para el caso de este proyecto, conviene emplear como material para construir el biodigestor, el rollo de polietileno en doble capa para que tenga 0,6 mm de espesor, porque soporta presiones superiores a 10 kPa.

3.2.5. Gasómetro

De acuerdo con la guía empleada, se recomienda que para un biodigestor doméstico deberá ser en forma de almohada con dimensiones de 2m x 2m, su consumo será diario por lo que la cantidad a almacenarse será muy poca o nula, pero por seguridad y variaciones de consumo recomendable tener un reservorio o gasómetro.

3.2.6. Invernadero

Dado que la temperatura ambiente es menor a los 20° se aplica el criterio de calefacción solar pasiva, con el propósito de mantener el calor dentro transfiriéndolo a la manga, lo que calentará la mezcla de agua con estiércol, con esta técnica se logra incrementar la temperatura interna en 6 y 10°C.

El biodigestor está diseñado para ser auto limpiante y requerir el menor mantenimiento, por ello, las dimensiones del invernadero que lo cubrirá estará a 0,5 m máximo del borde de la zanja, lo óptimo es que el invernadero sea compacto, deberá estar a continuación de la zanja para evitar fugas de calor y proteger al biodigestor.

El material del invernadero puede constituirse por polietileno, geomembrana o a su vez, un modelo válido que también se emplea son construcción con paredes de ladrillo y techo de zinc.



Figura 10. Estructura del invernadero
(Martí-Herrero, 2014)

3.2.7. Tuberías de captación y conducción

Para la tubería de ingreso y salida de acuerdo con la guía empleada, se recomienda emplear tubería de PVC de 6" con una longitud de 1,5 m, cada uno en la entrada y salida, colocado en un ángulo de 45° para la carga diaria del biodigestor, este diámetro facilita el ingreso sin generar obstrucción del estiércol o acumulaciones, favoreciendo la fluidez y carga rápida.

Para la conducción del biogás se empleará un adaptador de ½" o ¾", acorde al diámetro de la tubería, que puede ser de PVC, polietileno o manguera, de acuerdo a la longitud medida en el campo.

3.3. Objetivo 3

Este objetivo corresponde a "elaborar un manual de operación y mantenimiento del sistema", el mismo en el que se detalla el proceso para realizar la instalación, puesta en marcha, operación, mantenimiento y reparaciones, este documento se presenta en el anexo 6.

3.4. Discusión de resultados

La crisis ambiental demanda implementar acciones paliativas como los biocombustibles, que se obtienen a partir de residuos orgánicos. En esta investigación se plantea el diseño de un biodigestor, tecnología limpia, para aprovechar la mayoría de residuos orgánicos que se generan en la Hacienda Rodeopamba Lote 2, y transformarlos en biogás, permitiendo controlar se emanación hacia la atmósfera, lo que es muy positivo pues: los residuos generados por la industria ganadera, al descomponerse emiten gases de efecto invernadero.

Al reemplazar el gas licuado y leña por biogás, se aporta al cuidado de los ecosistemas y las fuentes de agua cercanas a las que se descargan estos residuos. En consecuencia, el objetivo general de la investigación "Diseñar un biodigestor para aprovechamiento los residuos orgánicos de ganado vacuno y obtención de biogás", es relevante, y se alinea a varios estudios que tratan sobre la implementación de biodigestores, que generen biogás, gestionen los residuos orgánicos y promuevan la sostenibilidad.

Al comparar las ventajas y desventajas de los digestores chino, hindú y tubular, respecto a los factores: económico, construcción, personal y transporte, se determina que el tubular es el más adecuado para las condiciones atmosféricas y climatológicas que presenta el caso de estudio. Estos resultados tienen congruencia con lo manifestado por Forget (2018), quien señala que el modelo tubular es el más eficiente, tiene costo accesible, mayor facilidad de instalación, operación, mantenimiento y reparación, que los otros biodigestores.

Las diversas experiencias con su implementación, establecen que un biodigestor taiwanés de geo membrana de PVC con un volumen total de 10m³, 7,5m³ para la fase líquida y 2,5m³ para almacenamiento del biogás, tiene una vida útil mayor a 10 años, demanda una inversión de 800 dólares, que se recupera en alrededor de un año de iniciada su operación.

Ya que como señala Martí (2019), este modelo de biodigestor es de flujo semicontinuo, tiene como componentes un pozo de entrada, reactor en el que se da la transformación de los residuos, pozo de salida para el afluyente, invernadero y un sistema para la gestión del biogás, se han considerado todos estos elementos en el diseño; determinándose mediante la investigación de campo, que la finca Rodeopamba Lote 2, cuenta ya con un sistema canalizado de los residuos hacia un tanque de almacenamiento que se encuentra a la intemperie, por lo que los residuos sólidos además de mezclarse con el agua empleada para la limpieza del establo, se mezcla con agua lluvia, y que en este tanque de almacenamiento se debe construir una cubierta, para evitar la infiltración de agua lluvia y que cambie la relación del estiércol a agua, de 1:3.

La investigación desarrollada ha sido aplicada pues en base al conocimiento se ha diseñado un biodigestor para la producción de tecnología limpia en la Hacienda Rodeopamba Lote 2, ha sido descriptiva porque en base a la información recopilada, se estima la cantidad de biogás a producir en función de la cantidad de excretas de ganado, y el lugar donde debe ubicarse el biodigestor, que a más de ser un mecanismo de mitigación ambiental y sostenibilidad, es una inversión rentable que a futuro permitirá disminuir los costos asociados al transporte y consumo que demandaba el uso de GLP para las labores agropecuarias.

A su vez, esto corrobora lo que señalan Ulises Monar (2009), Juan Wayllas (2010), la Asociación de Campesinos ACAI (2010), Darwin Verdezoto (2013), la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (2017), Juan Doroteo (2013), entre otros investigadores, quienes establecen la factibilidad de generar biogás mediante un biodigestor, para satisfacer necesidades energéticas del sector agropecuario, proveerle de abono orgánico y mitigar el impacto ambiental negativo que la industria agropecuaria y ganadera puede generar, pues los residuos animales al degradarse emiten gases que incrementan el calentamiento global.

Como guía del diseño, se ha empleado el documento “Biodigestores Tubulares: guía de diseño y manual de instalación” (Martí Herrero, 2019), congruente con este texto, el procedimiento de diseño del biodigestor para la Hacienda Rodeopamba Lote 2, ha guardado la siguiente secuencia: identificación de la línea base, determinación de la carga y volumen, dimensionamiento del biodigestor, selección del material del reactor, dimensionamiento de la zanja, análisis de la presión de operación, diseño del gasómetro, invernadero y sistema de tuberías de captación y conducción.

Para garantizar un dimensionamiento y diseño adecuado, se siguió la guía de Martí (2019), para dimensionar el reactor se calculó la carga diaria teórica y la carga diaria medida en campo, determinándose que la carga diaria será de 6.269,90 litros y el volumen total del biodigestor $7,84\text{m}^3$; el diseño guarda una relación de largo a diámetro de 5,52, que se encuentra dentro del rango aceptable de 5 a 10, por lo que el dimensionamiento debe considerarse adecuado; por las características de los materiales, existen varias opciones de diseño, para este caso se utilizará en doble capa polietileno requerido con una longitud de 7,5 metros (1m para el cierre requerido), mismo que tiene suficiente resistencia mecánica y soporta presiones mayores a 10 kPa.; la zanja se orientará de oeste a este, para optimizar la radiación solar.

Los planos adjuntos en los anexos, detallan las dimensiones, ensamblaje y forma que tomará el biodigestor con sus componentes una vez ya instalados en campo, es decir: zanja, reactor o manga, tubería de entrada y salida, e invernadero, con la consideración de las dimensiones y materiales disponibles en el mercado nacional.

Se optó por la implementación de un invernadero hecho con paredes de ladrillos y techo zinc, esto debido a los costos requeridos para su construcción y por los beneficios al incrementar la temperatura de trabajo y disminuir el tiempo de retención, a su vez, su dimensión no es extensa dado que no requiere el ingreso constante de personas para su mantenimiento, así también se evitan fugas de calor.

El ingreso del estiércol que alimenta el biodigestor se da desde el estercolero, con la mezcla de agua adecuada y el control de posibles objetos que puedan obstruir o presentar un riesgo para la manga del reactor, el estiércol ingresa por la tubería en un ángulo de 45° , lo que optimiza su ingreso y su salida se da a través de la conducción directa a los potreros aledaños para su uso, lo que disminuye notablemente los gastos por el uso de químicos fertilizantes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

La aplicación de la digestión anaeróbica en biodigestores es una fuente de energía renovable (biogás), que puede reemplazar a combustibles fósiles como el gas natural, además genera fertilizante orgánico (biol) y disminuye la emisión de gases de invernadero provenientes de la descomposición incontrolada de la materia orgánica, ayudando a cuidar el medio ambiente.

Un biodigestor es una estructura física en la que la biomasa o estiércol se mezcla con agua, para formar una suspensión homogénea que facilite la digestión anaeróbica, para transformarla en biogás y fertilizante; son varios los tipos de digestores que se emplean en diversos lugares del mundo, para las condiciones que presenta la Finca Rodeopamba, Lote 2, en el barrio San Juan de Chillogallo, donde se ubica la hacienda ganadera, el más adecuado es el biodigestor tubular. Ya que la digestión anaerobia es un proceso bioquímico complejo, se deben controlar parámetros como la temperatura, tipo de residuos, tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica, nutrientes, pH, entre otros, para verificar que se produzcan las reacciones inmersas en ella.

Existe en el medio rural poco conocimiento técnico sobre el proceso de la digestión anaerobia y los parámetros que deben controlarse, ello puede disminuir la producción de biogás, sin embargo en esta investigación se determinó que existen varios factores a considerar para evitar la pérdida del volumen de biogás producido; la temperatura determina el tipo de fermentación y por ende un factor determinante del volumen del digestor; la naturaleza y composición bioquímica de los residuos orgánicos, pues cada grupo tiene características de degradación que los hace ser eficientes en cierto tipo de biodigestores. El tiempo de retención hidráulico (TRH) y velocidad de carga orgánica, el volumen de sustrato orgánico que se carga diariamente, es inversamente proporcional al tiempo de retención, estos parámetros son determinantes del diseño; la concentración de los sólidos; el potencial de hidrógeno (pH) y alcalinidad, pues la concentración de ácidos volátiles, producto de la fermentación, pueden generar una sobrecarga de alimentación o la inhibición de metano bacterias; y la mezcla, pues ésta produce una distribución uniforme de los productos intermedios y finales, de la temperatura y sustrato, mayor contacto entre el sustrato y microorganismos.

El biodigestor tubular es una inversión rentable para una familia, siempre y cuando se aprovechen sus productos, es decir el Biol y el biogás, se emplea el biol como fertilizante orgánico, en reemplazo de fertilizantes químicos, pero es necesario un análisis económico más detallado del rendimiento del biol sobre los cultivos y pastos para determinar el ahorro real que puede obtenerse.

4.2. Recomendaciones

Luego de establecer que un biodigestor es una herramienta para generar biogás, fuente de energía renovable, y que aporta a cuidar en medio ambiente, por lo que constituye una inversión viable, se formulan las siguientes recomendaciones:

- Socializar los resultados de esta investigación, pues la crisis ambiental demanda implementar alternativas paliativas y los biodigestores tubulares, son una herramienta de bajo costo, para aprovechar los residuos orgánicos y generar energía limpia, que aporta a mitigar el impacto ambiental y preservar el ecosistema.
- Utilizar para el diseño de un sistema biodigestor, una metodología que permita optimizar el aprovechamiento de los residuos orgánicos, generados por las familias o pequeñas fincas agropecuarias.
- Proponer a los entes gubernamentales, que incentiven la masificación de los biodigestores especialmente en los sectores rurales, a través de créditos o subsidios para las familias de bajos recursos implementen estos sistemas, especialmente porque el país tiene un potencial ganadero importante, y la implementación estos sistemas son una herramienta de mitigación ambiental, sostenibilidad y apoyo económico para quienes deciden emplearlo.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albarracín, D. (2016). *Biblioteca del campo, granja integral autosuficiente.*, 5ta.Ed. Bogotá, Colombia: Disloque Editores.
- Aldana, D. M., & Sernaqué, J. V. (08 de 2017). Recuperado el 04 de 04 de 2021, de https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4097/Proyecto_implementacion_sistemas_biodigestores_para_aprovechamiento_residuos_organicos_generados_usuarios_residenciales_region_Piura.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Alvear, T. (2017). *Manual Agropecuario. Tecnologías orgánicas de la granja integral autosuficiente 4ta.Ed.* Bogotá- Colombia: Limerín S.A.
- Arrieta Palacios, J. (2016). *Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado.* Piura, Perú: Universidad de Piura.
- Bermúdez, J. (2017). *La digestión anaerobia.* Murcia: Universidad de Murcia.
- Besel, S. (2016). *Biomasa. Digestores anaerobios 3ra. Ed.* . Madrid, España: Idea.
- Cervantes, R. (2017). *Diseño de un biodigestor para la producción de biogás en una vivienda 3ra. Ed.* Texcoco: Facultad de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo.
- Chávez, R. (2017). *Biodigestores y el protocolo de Kyoto. 4ta Ed.* Lima: Norma.
- FAO. (2011). Recuperado el 5 de 3 de 2020, de fao.org/3/as400s/as400s.pdf
- FNR, F. N. (2017). *Guía sobre el Biogás. Desde la producción hasta el uso 6ta. Ed.* Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR). Ministerio Federal de Alimentación, Agricultura y Protección al Consumidor - República Federal Alemana.
- Forget, A. (2018). *Manual de diseño y difusión de biodigestores familiares y comunitarios, con enfoque en biodigestores tubulares.* Lima: FAO .
- García, K. (2016). *Co digestión anaeróbica de estiércol y lodos de depuradora para producción de biogás 3ra. Ed.* Cádiz, España: Universidad de Cádiz., Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales.
- García, R. Z., Alamo, M. V., & Aldana, M. D. (2018). *Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región Piura.* Huaraz, Piura: XXIV- SPES - Universidad de Piura.
- Garzón, M. F. (2011). *Estudio de un biodigestor generador de gas metano mediante abono orgánico para prácticas de energías alternativas en el laboratorio de la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.* Ambato: UTA. Recuperado el 3 de 5 de 2020, de

<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/1344/1/Tesis%20I.%20M.%2095%20-%20Garz%C3%B3n%20Cuji%20Marco%20Fabricio.pdf>

Google Earth. (s.f.). Recuperado el 30 de 03 de 2020, de <https://www.google.com.ec/maps/@-0.1081339,-78.4699519,18z?hl=es>

Herrero, J. M. (2019). *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación* (Vol. 1). Ecuador: RedBiolac. doi:ISBN: 978-9942-36-276-6

Herrero, J. M. (2019). *Experiencias Latino Americanas en la implementación de estrategias para democratizar los biodigestores entre pequeños y medianos productores agropecuarios*. Ecuador. doi:ISBN: 978-9942-36-276-6

Hilbert, J. (2017). *Manual para la producción de Biogás 3ra. Ed.* . Castelar: Instituto de Ingeniería Rural INTA.

Hilbert, J., & Moreno, J. (2016). *Compostaje 5ta Ed.* . Madrid: Mundi Prensa Libros.

Mantilla, J., Duque, C. D., & Galeano, C. (2016). Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogás utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno. *Ingeniería e Investigación No 27* , 133-142.

Martí Herrero, J. (2019). *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*. Quito, Ecuador : Redbiolac ISBN: 978-9942-36-276-6.

Martí, J. H. (2017). *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación 3ra. Ed.* . La Paz, Bolivia: GTZ.

MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF. (2011). *Manual de Biogás* . Santiago de Chile: Proyecto Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables - FAO.

Oyala, Y., & González, L. (07 de 2009). UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE PALMIRA, Palmira. Recuperado el 4 de 3 de 2020, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/7967/4/luisoctaviogonzalezsalcedo.20121.pdf>

Padilla, A. S., & Rivero, J. M. (2016). Producción de biogás y compost a partir de residuos orgánicos recolectados del Complejo Arqueológico Huaca de la Luna. *Ciencia y Tecnología No.1 Año 12 ISSN: 1810-6781*, 29-43.

Páez, J. (diciembre de 2016). *DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA EL MANEJO DE RESIDUOS ORGÁNICOS PRODUCIDOS EN EL EMBALSE DAULE-PERIPA*. Recuperado el 29 de 4 de 2020, de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/8789/1/T-UCE-0004-64.pdf>

Riechmann, J. (2015). *De la economía a la ecología 3ra. Ed.* Madrid: Trotta.

- ROTOPLAS. (01 de 04 de 2021). *ROTOPLAS*. Recuperado el 24 de 05 de 2021, de Productos: <https://rotoplas.com.ec/producto/biodigestor-7000/>
- Salamanca, J. A. (mayo de 2009). *Diseño, Cosntrucción y puesta en marcha de un biodigestor a escala piloto para a generación de biogás y fertilizante orgánico*. Tesis, Universidad San Francisco de Quito, Quito. Recuperado el 29 de 4 de 2020, de <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/740/1/94246.pdf>
- Samani, Z. (2017). *Generación de energía y fertilizantes orgánicos a partir de residuos agrícolas 3ra. Ed.* Albuquerque, Estados Unidos: Universidad del Estado de Nuevo México.
- Silva, J. (2017). *Manual para la producción del biogás 3ra. Ed.* . Nueva York: Organización Panamericana de la Salud, disponible en <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/biogas.pdf>.
- Tupiza, S., & Velasquez, D. (5 de 2013). *“DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN BIODIGESTOR PARA EL FUNCIONAMIENTO DE UN MOTOR TERMICO*. Recuperado el 29 de 4 de 2020, de <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/173/1/T-UIDE-0112.pdf>
- Zarta, P. Á. (2018). La sustentabilidad o sostenibilidad: un concepto poderoso para la humanidad. *Tabula Rasa No.28, Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca*, Disponible en. <https://www.redalyc.org/jatsRepo/396/39656104017/html/index.html>.

ANEXOS

Anexo 1: Plan muestreo para establecer la capacidad de carga

Plan de Muestreo

Objetivo

Estimar la cantidad de estiércol producido en el área de ordeño de la finca Rodeopamba lote 2, y con ello, establecer la cantidad de estiércol que se cargará diariamente al Biodigestor.

Muestreo

Lugar de muestreo.

El muestreo se realizará en la finca Rodeopamba lote 2, en el barrio San Juan perteneciente a la parroquia de Lloa ubicado en la provincia de Pichincha.

El área de ordeño se encuentra a 50 metros del camino de la entrada principal que brinda el acceso a esta área. La toma de la muestra del estiércol producido en el área de ordeño se tomará en la puerta del establo donde por un canal subterráneo se envía al estercolero.

Tipo de muestreo

Para su muestreo se esperará que culmine el ordeño con el fin de que el ganado realice la deposición de las excretas, siguiendo el proceso de limpieza realizado por los dueños de la finca para mayor precisión, se recolectará previo a la entrada al canal efluente.

Obtención de la muestra

Para la obtención de la muestra, se lo recogerá a las 5:40 a.m. debido a que está hora se culmina el ordeño, con una escoba se barren las excretas de los animales hasta la entrada del canal al estercolero, sin echar agua.

Una vez que se apilaron los residuos, se los recogerán con una pala, introduciéndolo dentro de un balde y se determinará su volumen en litros.

Responsable del muestreo

La responsable de tomar la muestra y registrar los datos obtenidos será la tesista (Verónica Ramírez).

Instrumentación por utilizar

N°	Materiales
1	Pala
1	Escoba
1	Balde de 10 L
1	Balanza manual de 15 kg

Por las condiciones del lugar y su climatología se emplea el siguiente material:

N°	Material de apoyo
	Botas de caucho
	Pantalón impermeable
	Cámara para evidencia fotográfica

Indispensablemente se debe emplear en campo las hojas o formato de registro para los datos obtenidos *in situ*. Para este caso, debido a que la limpieza del establo se realiza 2 veces al día, se dispone de estiércol fresco por lo que no se realizará análisis de su estado.

Anexo 2: Fotos recabadas en campo



Ubicación del establo (naranja) y el estercolero (celeste).



Medición de las dimensiones del estercolero.



Inicio (naranja) y salida (azul) de la tubería que alimenta el estercolero.



Establo donde se realiza el ordeño e ingresa a los comederos el ganado seco y de ordeño.



Ingreso del ganado al establo.



Recogida de las excretas del ganado para envío al estercolero.



Limpieza del establo



Recolección de las excretas para la determinación del estiércol disponible.



Pesaje de la muestra con la balanza

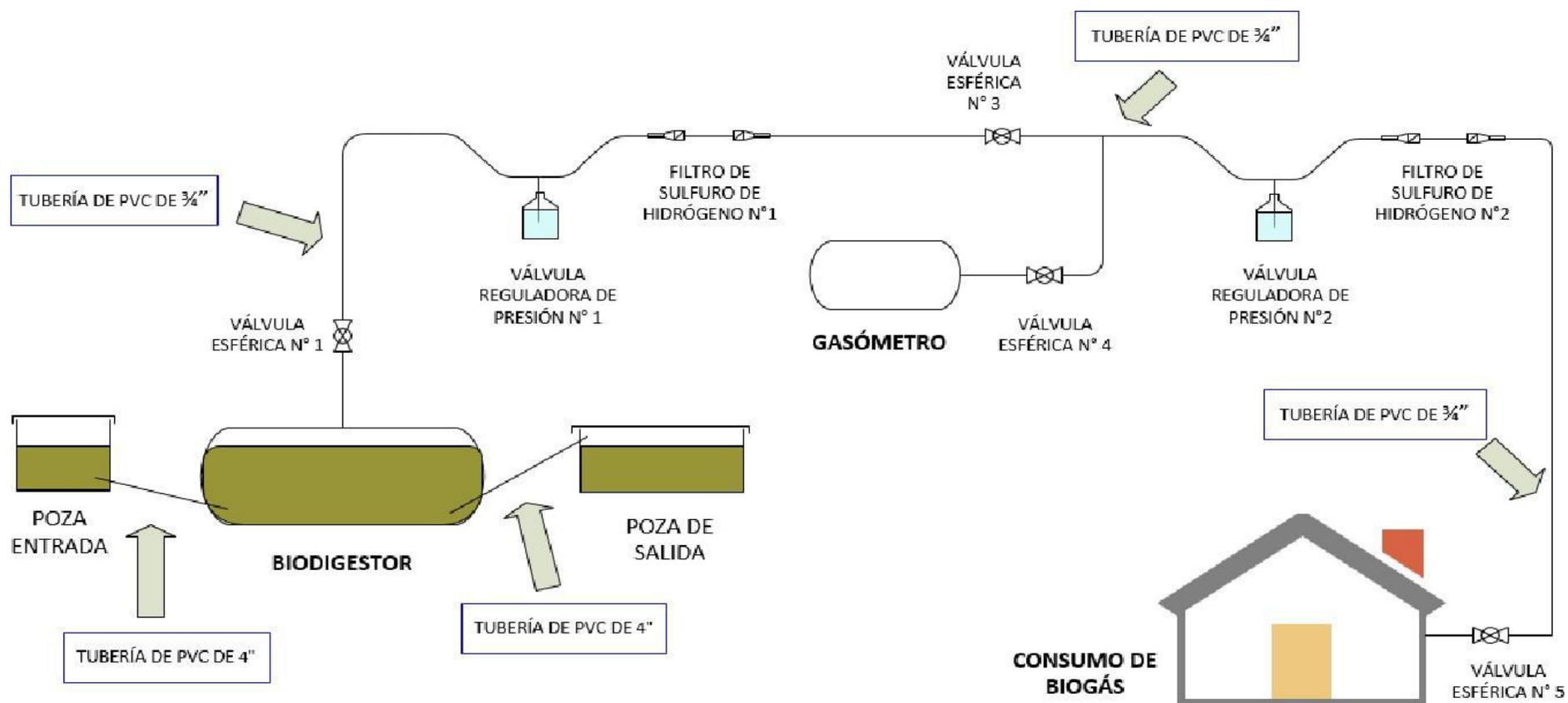


Recolección en el balde para medida de su volumen.



Ganado seco y de ordeño en los terrenos.

Anexo 3: Esquema del sistema e instalación de biogás *in situ*



Anexo 4: Dimensiones de la zanja

Anexo 5: Manual de instalación operación y mantenimiento del biodigestor.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

PROYECTO INTEGRADOR

**MANUAL DE INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y
MANTENIMIENTO DEL BIODIGESTOR TUBULAR
PARA LA FINCA RODEOPAMBA LOTE 2**

ELABORADO POR:

VERÓNICA KATHERINE RAMÍREZ VILLACRÉS

veronica.ramirez@epn.edu.ec

QUITO-ECUADOR

2021

Manual de instalación para un Biodigestor Tubular

Antecedentes

En Ecuador, el consumo de gas licuado (GLP) es fundamental para la subsistencia de las personas, pues se usa para cocinar alimentos, lo que incrementa la dependencia por energías no renovables; en zonas apartadas su uso o dependencia causa un incremento en los costos debido a su transportación según la frecuencia, por ello, exige buscar alternativas para reemplazar al gas licuado, por un gas ecológico, que ayude a preservar el ecosistema; el biogás es un combustible gaseoso, es un eficaz método de tratamiento de residuos, que facilita la reducción de la contaminación y producir energía.

La implementación de un Biodigestor no solo representa una herramienta de mitigación y contribución para contrarrestar los efectos del cambio climático sino también una herramienta de sostenibilidad y apoyo económico para quienes deciden emplearlo, en este caso en particular, es una inversión, debido a que permitirá en el futuro, disminuir los costos asociados al transporte y consumo que demandaba el uso del GLP.

Objetivo

Proveer de parámetros y consideraciones para la instalación, puesta en marcha, operación y mantenimiento del biodigestor para la finca de Rodeopamba Lote 2.

Alcance

El presente documento está dirigido para los propietarios de la finca Rodeopamba Lote 2, con el fin de brindar acompañamiento detallado para lograr con éxito la implementación de un biodigestor tubular, las acciones que deberán realizarse para su operación, mantenimiento y reparación, y así lograr que su rendimiento sea óptimo y duradero.

Descripción

El presente manual está basado y diseñado para la Finca Rodeopamba Lote 2, ubicada en la parroquia de Lloa, en la provincia de Pichincha. El modelo de biodigestor a implementarse se caracteriza por su forma tubular o manga, esta especial característica permite la digestión de

los residuos sin colapsar y creando una mezcla continua al cargarlo con nuevo residuos, a su vez brinda un subproducto de alto valor nutricional, como lo es el fertilizante o biol.

El biodigestor logrará satisfacer la demanda de biogás reemplazando el uso del GLP de manera eficiente, además que, el biogas puede emplearse o satisfacer otras necesidades energéticas como a continuación se presentan las siguientes equivalencias.

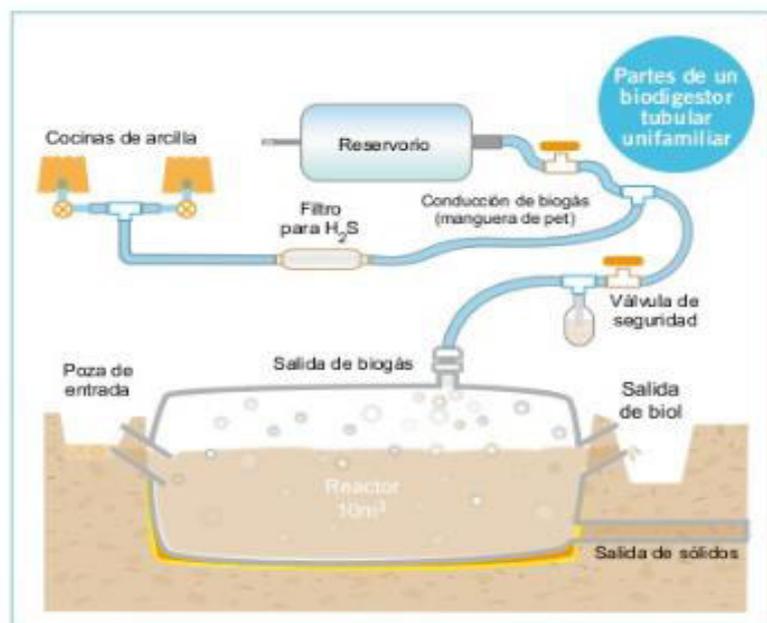
Tabla: Consumo de biogás para diferentes elementos.

Uso biogás	Consumo de biogás (l/h)
Cocina doméstica	300
Cocina Industrial	450
Calefactor para lechones	300
Lámpara de 60 W	120
Olla arrocera de 2l	140
Calefón de agua de 14kW	2500
Refrigerador de 100 l	30 en zonas frías
	75 en zonas calientes
Ordeñadora de 15 hp	2500

Fuente: (Herrero J. , 2019)

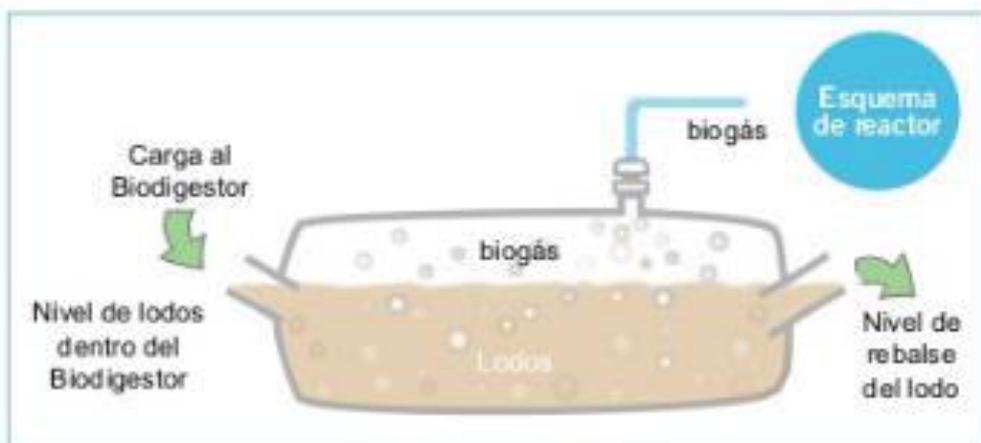
COMPONENTES DEL BIODIGESTOR

Con el fin de distinguir los componentes básicos del Biodigestor y conocer mejor su función, se detallan en el siguiente cuadro.



Fuente: (Cotrina & Villanueva, 2015).

Componentes	Descripción
Estercolero	Realiza la mezcla del estiércol y agua, permite el control de la mezcla y el retiro de ramas u objetos extraños, posterior a ello, se realiza la alimentación
Reactor	Es la parte mas importante del biodigestor, se compone de 75% la mezcla de agua y estiércol, y el 25% de biogas,
Zanja	Se cabará la dimensión del biodigestor para que la manga quepa en el, pero deberá colocarse un recubrimiento o aislante que brinde seguridad y protección de su entorno y mantenga la temperatura.
Salida de biol	Una vez, ya digerados los residuos llegarán al punto de salida donde serán descargados para permitir la nueva carga de residuos o alimentación.
Salida de biogas	Se compone de tubería de PVC, esta realizará la conducción desde la manga hasta el resevorio y a la cocina.
Válvula de seguridad	Se compone de una botella con una pequeña cantidad de agua conectada a la tubería a través de una T, esto permitirá que atrape en agua que se condense en su interior y ayudará a liberar la presión de la manga y del reservorio evitando rupturas.
Reservorio	Permite el almacenamiento en el caso de una producción excedente de biogas.
Filtro para H₂S	Se constituye de una viruta de hierro como filtro, colocada en una parte extraíble de la tubería de PVC, previene la corrosión y malos olores.
Tubería de conducción	Permitirá unir todo el sistema desde la manga hasta la cocina, se constituye de PVC de ½" adicional a sus accesorios.
Invernadero	Permite aislar la manga del exterior previniendola de daños por lluvia, animales o cambios de tempeatura, manteniendola propicia y onstante para que las bacterias realicen la digestión.



Fuente: (Cotrina & Villanueva, 2015).

Parámetros de Diseño

1. Estiércol disponible y la carga diaria ¹

Como el ganado ingresa, por horas, al establo dos veces al día, todo el estiércol que se recoja en ese tiempo, corresponde al estiércol que se dispone o empleará para alimentar el biodigestor.

El estiércol disponible requiere de una mezcla con agua que no deberá superar la relación 1:3, es decir, por cada kilogramo de estiércol se deberá añadir 3 litros de agua, con el fin de tener la cantidad óptima de sólidos disueltos y lograr que la mezcla produzca la cantidad de biogás óptima en el tiempo oportuno mientras circula por la manga.

2. Temperatura y tiempo de retención.

Para que se logre la producción de biogás es necesario mantener una buena y constante temperatura, debido a que el tiempo de retención será menor si la temperatura incrementa, es decir el tiempo que los residuos necesitan para ser digeridos por las bacterias.

Por la altura en que se encuentra la finca Rodeopamba lote 2, su temperatura oscila entre los 8 y 23°C, por ello se considera la incorporación de un invernadero al diseño del biodigestor, y así aumentar la temperatura de trabajo con el fin de optimizar el tiempo de retención, por ello se recomienda un invernadero compacto, no es necesario diseñar para que una persona ingrese, la función del invernadero será contener y cubrir al reactor, para evitar pérdidas de calor, así también brindará protección al biodigestor de agentes externos.

¹ **Estiércol disponible:** corresponde a los residuos depositados en el establo y se empleará para la alimentación del Biodigestor.

Junto con el invernadero se logrará alcanzar temperaturas de 18° a 22° en los meses más fríos, manteniendo una temperatura constante y estable, lo que permitirá una mejor producción de biogás como lo expresa la siguiente tabla:

Temperatura (°C)	Biogás (l/Kg)
33-37	39
28-32	38
23 - 27	35
18 - 22	33
13 - 17	31
8 - 12	29

Fuente: (Herrero J. , 2019)

3. Volumen del biodigestor

Para determinar el volumen o tamaño que tendrá nuestro biodigestor, se determina multiplicando el tiempo de retención en días por la carga diaria, es decir los residuos producidos por el ganado junto con su mezcla de agua:

Tabla de temperatura y tiempo de retención.

Temperatura (°C)	Tiempo de retención (Días)
35	25 - 30
30	30 - 40
25	35 - 50
20	50 - 65
15	65 - 90
10	90 - 125

Fuente: (Herrero J. , 2019)

4. Zanja.

La zanja cumplirá con el propósito de mantener a buena temperatura el biodigestor y brindará protección al mismo.

Para el cabado de la zanja se establecen diferentes ángulos para el talud de las paredes, estos ángulos están en función del tipo de suelo:

- Suelo arenosos: $\alpha = 30^\circ - 45^\circ$
- Suelos arcillosos: $\alpha = 7.5^\circ - 30^\circ$.
- Sin talud para suelos compactos: $\alpha = 0^\circ$ (Herrero J. , 2019).

El ángulo del talud para la finca Rodeopamba lote 2, será de una inclinación de $7,5^\circ$ debido a que cuenta con un suelo arcilloso.

- La relación entre la longitud y el diámetro del biodigestor, (L/D), se encontrará entre 5 y 10, el fin de esta relación es que la manga simule las funciones de un intestino, permitiendo que los residuos que ingresen sean digeridos en el tiempo óptimo.

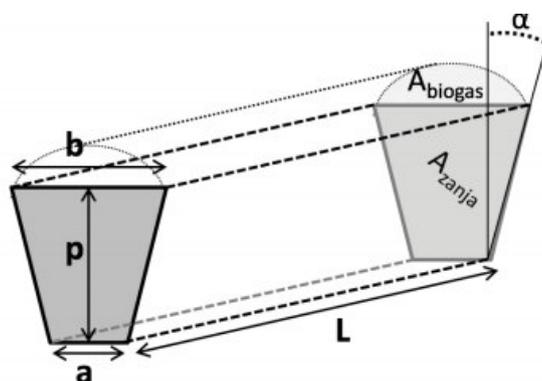


Figura: Esquema de una zanja trapezoidal

Las dimensiones de la zanja vienen determinadas por el volumen líquido, y a su vez, nos permite determinar las dimensiones de la manga o reactor.

De acuerdo con las dimensiones comerciales de plástico disponibles en el mercado podemos elegir el radio y circunferencia del plástico a emplear, con la consideración de mantener dentro del rango la relación L/D .

Tabla: Dimensionamiento de la zanja a partir de α

α ($^\circ$) desde vertical	% VL	%VB	a (m)	b (m)	p (m)	A_{zanja} (m^2)	A_{biogas} (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	$0.72 \times r$	$2.26 \times r$	$1.33 \times r$	$1.98 \times r^2$	$0.66 \times r^2$	$2.64 \times r^2$
45	65	35	$0.43 \times r$	$2.57 \times r$	$1.07 \times r$	$1.61 \times r^2$	$0.86 \times r^2$	$2.47 \times r^2$

Fuente: (Herrero J. , 2019)

Apartir del ángulo de inclinación del talud de la zanja, se puede estimar el volumen del líquido del biodigestor, en este caso, se recomienda que el volumen líquido que ya calculamos tenga

una equivalencia del 80% y el volumen de biogas corresponderá al 20%, siguiendo el proceso para determinar las dimensiones, nos dará como resultado:

	Radio de circunferencia	4						
α	%Volumen Líquido	% Volumen Biogás	a ancho inferior (m)	B ancho superior (m)	p profundidad (m)	A zanja (m²)	A biogas (m²)	A total (m²)
7.5	80	20	0.78	1.04	0.98	0.89	0.22	1.11

α (°)	C (m)	r (m)	a (m)	b (m)	p (m)	A _{zanja} (m ²)	L (m)	D (m)	L/D
Tabla 12	C ₁	=C ₁ /(2 x π)	Tabla 12	Tabla 12	Tabla 12	Tabla 12	=V _L /A _{zanja}	=2 x r ₁	L ₁ /D ₁
Tabla 12	C ₂	=C ₂ /(2 x π)	Tabla 12	Tabla 12	Tabla 12	Tabla 12	=V _L /A _{zanja}	=2 x r ₂	L ₂ /D ₂
	=V _L /A _{zanja}	=2 x r	L/D

Fuente: (Herrero J. , 2019)

α	C (m) Circunferencia	r (m) radio	a (m)	b(m)	p(m)	A zanja (m ²)	L (m) Longitud	D (m) Diámetro	L/D
7.5	4	0.64	0.78	1.04	0.98	0.89	7.03	1.27	5.5229

2.7. Implementación del sistema

Esta actividad no se desarrolló, pero se detallan sus etapas.

Materiales a emplearse

Una vez establecidas las características del material que se empleará y las dimensiones correspondientes, se procederá a su instalación, para ello se necesita una lista de materiales a emplearse, para cada Biodigestor los materiales emplearse pueden variar, por ello, de acuerdo a las características del Biodigestor tubular, se provee una lista de materiales básicos para su construcción

Zanja	
Material	Uso
Sacos o costales	Una vez listo el cavado de la zanja, los sacos permiten darle forma a la zanja donde no la haya tomado.
Plásticos o costales cosidos	Cuando se introduzca el Biodigestor a la zanja, se emplearán para protegerlo.

Biodigestor	
Material	Uso
Manga Tubular	Se recomienda emplear plástico PE de 200 micrones, plástico tubular de invernadero en doble capa, por lo que se requiere de dos piezas tubulares, cada una con la siguiente longitud: Long. De la manga= (Longitud zanja +1m + profundidad zanja)
Tubería para desagüe de PVC.	Puede emplearse de 4" y 6", siendo la de 4" la óptima para cargas líquidas y 6" para estiércoles, siendo el de 6" mejor para realizar el amarre con el plástico tubular. Se requiere un tubo de 3 metros, empleándose 1,5 m para la entrada y salida de la manga.
Ligas de tubo o cámaras de neumáticos.	Dos cámaras de rin 14 o 16, se la puede encontrar en mecánicas como desperdicios, se deben cortar en tiras continuas de 5 cm de ancho.
Brida o adaptador de tanque en PVC	Se emplea normalmente en 1/2" o 3/4".
Tubería de PVC	Al igual que la brida se empleará en 1/2" o 3/4", se empleará para la conducción del biogás.
Accesorios o complementos de PVC	Se emplea en roca o pega de PVC, o a su vez unión Flex para manguera, los que se necesite para ensamblar el adaptador del tanque con la tee de la válvula de alivio.

Cuerda	De al menos mínimo de ¼ de pulgada y su largo 2.5 veces la extensión del biodigestor.
Teflón	Para la rosca del adaptador del tanque, 2 aproximadamente
Válvula de alivio	Requiere una tubería en Tee de al menos 30 cm, un envase vacío de 2 - 3 litros y los accesorios para ajustar la tubería al adaptador.

Conducción de Biogás	
Material	Uso
Tubería de agua	En tamaños de ½" o ¾" puede ser tubería de polietileno roscable o rígida PVC pegable, o tubería flexible para llevar el biogás desde la manga hasta el punto de consumo.
Llaves de bola	En tamaños de ½" o ¾" como el adaptador del tanque.
Tee	En tamaños de ½" o ¾" como el adaptador del tanque, 4 aproximadamente.
Codo	En tamaños de ½" o ¾" como el adaptador del tanque. 2 aproximadamente.
Unión universal	En tamaños de ½" o ¾" como el adaptador del tanque.
Cocina	Cualquier cocina o quemador, de preferencia de 2 hornillas, considerando disminuir el nivel de la mezcla con aire aumentando el tamaño del conducto.
Reservorio	Se lo puede realizar con el mismo material de la manga, pero en forma de almohada de 2m de largo por 2 m de circunferencia es lo recomendable para biodigestores domésticos.

INSTALACIÓN DEL BIODIGESTOR.

Ubicación del biodigestor:

Para lograr la ubicación apropiada para el biodigestor, debe tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Evitar que la ubicación se encuentre cerca de un lugar transitado, caminos o sea de paso para animales, personas o autos, para así evitar daños, vandalismo, destrucción y demás riesgos.
2. Evitar la cercanía a fuentes de agua para evitar inundaciones o escorrentía.
3. Debe colocarse en un terreno plano, la zanja deberá tener una orientación de norte a sur, evitando la sombra, árboles o ramas que puedan caer encima de la manga o invernadero.
4. Colocarse cerca del domicilio o cocina y del establo, de preferencia que pueda alimentarse a gravedad y pueda subir el biogas con una pequeña inclinación, de preferencia en línea recta.



Figura: Ubicación y conducción ideal del biodigestor.

Zanja.

1. Al realizar el cavado de la zanja se recomienda partir en línea recta, que puede marcarse con cinta, y al final afinar los detalles de los taludes, huecos o acabados.
2. En el caso de llegar a la capa freática del suelo se deberá cubrirla con arena hasta tapar y evitar que ingrese agua a la zanja.
3. Posterior al cabado de la zanja y su afinación, se debe cubrir con material aislante para que conserve su temperatura, el mismo puede ser: 10 cm de paja o 5cm de espumaflex.
4. Finalmente, se debe colocar una sábana de costales, que brindarán protección al biodigestor cuando se lo ingrese.



Figura: Cavado de zanja y afinación de taludes.



Figura: Cobertura del biodigestor

Manga o reactor.

Se pueden emplear distintos tipos de plásticos como: geo membrana de PVC, geomembrana de PE, plástico de invernadero, para este caso, en la finca de Rodeopamba lote 2, por las características económicas y su disponibilidad comercial se empleará la geomembrana de PVC doble capa de 200 micrones.

Construcción de la manga

1. Una vez listo el material con las dimensiones calculadas, se lo transportará al lugar de instalación, teniendo la precaución de evitar roces, rupturas o dobleces que afecten las condiciones físicas de la manga y su funcionamiento.
2. En un espacio libre de objeto cortantes o afilados, se colocará las láminas de plástico, se sumará y esas dimensiones se cortarán: la profundidad de la zanja + la longitud de la zanja+ 1m (para el amarre a las tuberías).
3. Verificar que ambas laminas tengan las mismas dimensiones, y retirar la primera lámina, ventear la lámina de abajo y verificar la forma tubular.

4. Con cuidado, una persona deberá ingresar dentro de la manga junto con la otra manga, de preferencia ventear la manga exterior para facilite el ingreso de la otra.
5. Una vez creada la doble capa, la misma persona ingresará con la debida precaución introduciendo una cuerda de 2,5 veces la longitud de la manga, atravesandolo de lado a lado.
6. Es indispensable retirar de ambas capas las arrugas, por ello, de cada extremo se deberá estirar para retirar las arrugas y cuadrar bien ambas capas.



Figura: Construcción de la manga.

Salida del biogás.

1. Tener listo el accesorio para la salida, el adaptador de tanque o brida.
2. En la parte superior del biodigestor se colocará la brida y la tubería de conducción, donde se formará el biogás, a 2 metros de la entrada del biodigestor.
3. Se realizará un pequeño corte y se introducirá la brida macho y desde afuera se colocará la hembra, con su seguro, y ajustar con la precaución de no estirar o romper la lámina.

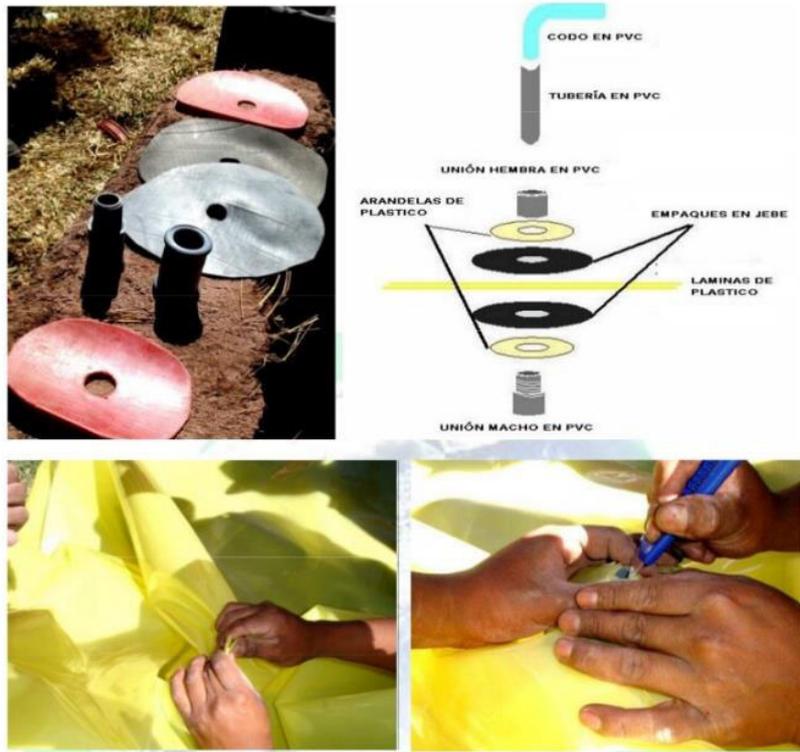
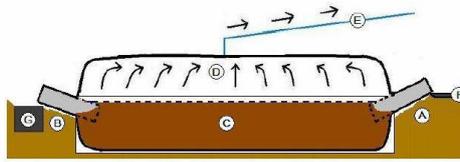


Figura: Instalación de la tubería de conducción.

Tuberías de entrada y salida de biogás.

1. Se emplea un tubo de 6" de diámetro, y se corta por la mitad obteniendo 2 piezas de 1,5 metros de longitud, la una mitad para el ingreso y la otra la salida.
2. La parte de cada tubería que vaya estar dentro de la manga deberá tener una cobertura en el borde para evitar daños dentro de plástico, el borde se cubrirá con ligas de tubo o cinta adhesiva para embalar, dejando un par de centímetros sobrantes fuera de la tubería para protección.
3. Colocar las tuberías en cada extremo centradas, en medio de las capas de la manga.
4. Para proceder con el amarre 70 cm de tubería quedarán fuera de la manga, los siguientes 50 cm sobrantes de tubería se emplearán para el amarre con las ligas de tubo y deberán quedar 30 cm dentro del biodigestor.

Biodigestor de polietileno



- A: Tubería de entrada del biodigestor.
- B: Tubería de salida del biodigestor
- C: Tanque donde se va a digerir la mezcla de agua y estiércol.
- D: Cámara de colección de gas.
- E: Tubería de salida del gas.
- F: Recipiente de entrada para la carga
- G: Recipiente de recolección de Biol.

5. Para el amarre de ambos costados se doblará el plástico sobrante creando pliegues, similar a un acordeón de unos 10 cm, ajustados los pliegues se procede a amarrar desde adentro hasta el fin del tubo exterior, cubriendo los 50 cm de pliegues y creando tensión en el amarre anterior.

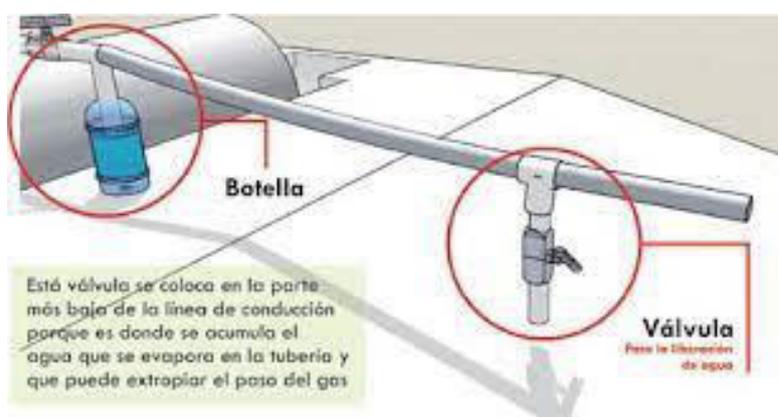


Valvula de alivio o seguridad para el biogás

Cuando el biodigestor presente altas presiones, el biogás podrá escapar, esta válvula se basa en crear un sello de agua.

1. Se empleará una tee de $\frac{1}{2}$ " que se una a la conducción del biogás, conectando en medio, por un lado viene la conducción de biogás y por el otro va hacia el punto de consumo.
2. Desde la tee se coloca 30 cm de tubería, del mismo diámetro hacia abajo, en ella se introduce una botella cualquiera con capacidad de 3 litros, introducir dentro de la tubería con unos 15 a 20 cm de columna de agua.

- Al otro lado de la tee se debe colocar una llave de paso, para que si por algún descuido o vandalismo, el biogás pueda escabullirse por la válvula de alivio, liberando la presión.
- En la botella se controlará el nivel de presión a través de una columna de agua, por ello, para mantener su nivel se deberá hacer unos pequeños agujeros para que el excedente de agua pueda salir.



- Realizar la conducción con cierto nivel de pendiente evitando puntos muertos o valle, para que así si se condensa agua dentro de la tubería pueda regresar al biodigestor o vaya a la válvula de alivio.
- Colocar un poste o sobre una pared la válvula de alivio, fuera del invernadero.
- Verificar a diario que el nivel de agua se encuentre en el nivel deseado sino corregirlo.



Introducción a la zanja

- Teniendo la zanja lista, con los bordes afinados, libre de objetos o riesgos de daño, canales de entrada y salida para la tubería, se procede a ingresar el reactor o manga.

2. Con la cantidad de personas necesarias, se colocará cada una en los extremos y en las partes medias, evitando que sufra de algún roce o fisura en el transporte o introducción a la zanja con suavidad paulatinamente.
3. Una vez introducido se procede a conectar la válvula de alivio, llenar la válvula y cerrar la llave de paso.
4. Colocar una sábana plástica negra para brindar protección contra la radiación.



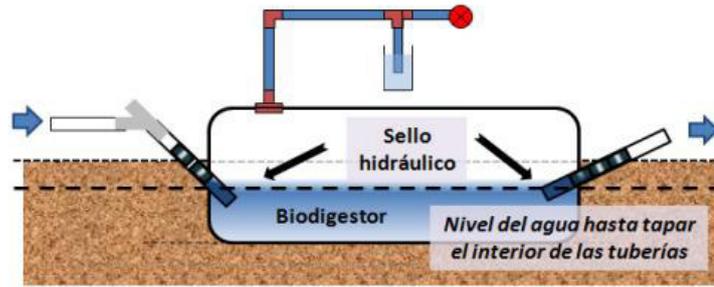
Figura: Introducción de la manga dentro de la zanja.

Inflar el biodigestor con aire.

1. Cerrar la tubería de salida de biol, asegurarla con una bolsa plástica y amarrar con una liga de tubo.
2. Por la tubería de entrada con una bolsa plástica, soplar con 3 personas más venteando o si se dispone, soplador eléctrico, llenar de aire hasta que la válvula burbujee y el aire escape por la válvula de alivio.

Primer llenado de agua.

1. Manteniendo el aire dentro del reactor, con una manguera, se introduce al reactor y se llena de agua hasta el nivel que cubra las tuberías de entrada y salida, así crea un sello hidráulico que evitará que el aire salga.
2. Posterior a ello, ya se pueden retirar y destapar las tuberías obstruidas en el inflado.



3. Considerar que si en la columna de agua se llenaron 15 cm, dentro del reactor se compensarán eso 15 cm levantando la tubería.
4. Una vez acomodada la tubería se puede fijar con piedras y cubrir para prolongar su vida útil con plástico o enterrar para evitar su deterioro por radiación.
5. La entrada deberá quedar ligeramente más alta con el fin de generar un movimiento a la salida por gravedad.

Primer llenado con estiércol

1. Proceder desde el sello hidráulico, si se tiene estiércol acumulado puede emplearse para alimentar el reactor, con una mezcla de agua para que pueda fluir.
2. Una cantidad inicial para cargar es de 80 a 100 kg o dos carretillas, esto permitirá que la producción de biogás se active antes de lo esperado.
3. Para los posteriores días, se deberá seguir alimentando el biodigestor con la cantidad de estiércol programada, la misma que ingresará directamente desde el estercolero, a través de una llave de paso.
4. Tomará varios días o semanas para que el nivel interno rebase la tubería de salida.



Figura: Preparación de los residuos (FAO, 2011).

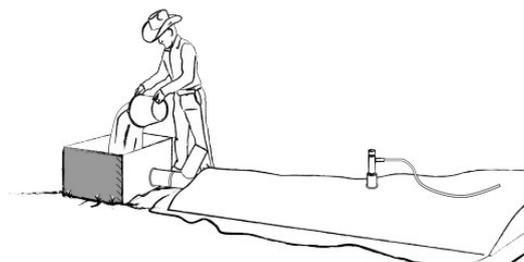


Figura: Alimentación del biodigestor.

Protección del Biodigestor

1. Debe garantizarse desde el primer día de la instalación la protección del Biodigestor, por ello se puede instalar una malla o cercado que impida el paso de animales en cualquier circunstancia.
2. Para este caso, se consideró la construcción de paredes de ladrillo o adobe con un techo de zinc translúcido, el mismo que deberá instalarse de preferencia el mismo día.

Debido a las características del lugar, este modelo de invernadero brindará mayor protección al biodigestor de los agentes externos como posibles rupturas, caídas de ramas, daños causados por los animales, entre otros.



Figura: Construcción del invernadero.

Conducción de biogás

1. Se empleará en tubería de polietileno de PVC para agua doméstica, en 1/2" de diámetro.
2. Se continúa la instalación desde la llave de paso.
3. La conducción deberá ser elevada con suficiente altura, para evitar obstrucciones, ya sea por el paso de animales, y para evitar taponamientos internos, a su vez la condensación que se dé dentro de las tuberías pueda caer nuevamente al reactor o a la válvula de alivio.
4. Minimizar el uso de codos y accesorios, con el fin de evitar la pérdida de presión para que fluya mejor el biogás

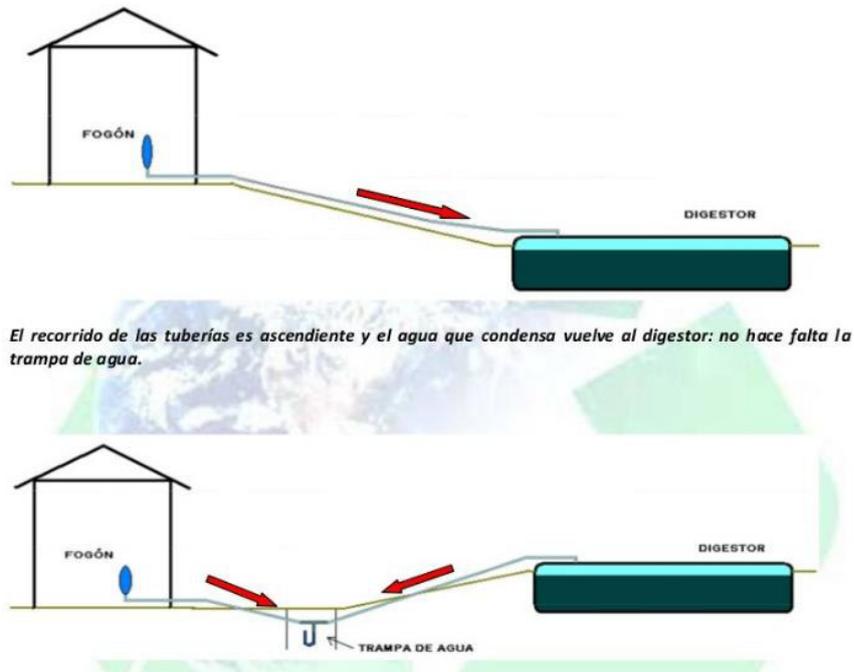


Figura: Conducción de biogás.

Filtro para ácido sulfhídrico

1. De la mezcla de gases como producto de la digestión anaerobia, existe H_2S el mismo que en altos niveles es tóxico y corroe los metales.
2. Para construir el filtro, se empleará un tramo de tubería móvil, dentro como tal, el filtro estará compuesto de lana de hierro o bombril.
3. El filtro debe ubicarse cerca al lugar de consumo, para su mantenimiento.
4. Una noche antes de su uso, se sumergirá en vinagre.
5. Se compone de: llave de paso, unión universal, 30cm de tubería y otra unión universal.
6. Reemplazar cada vez que se presente olor incómodo en la cocina.

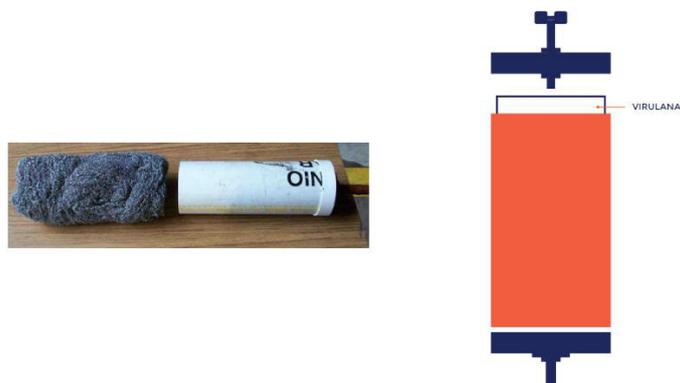
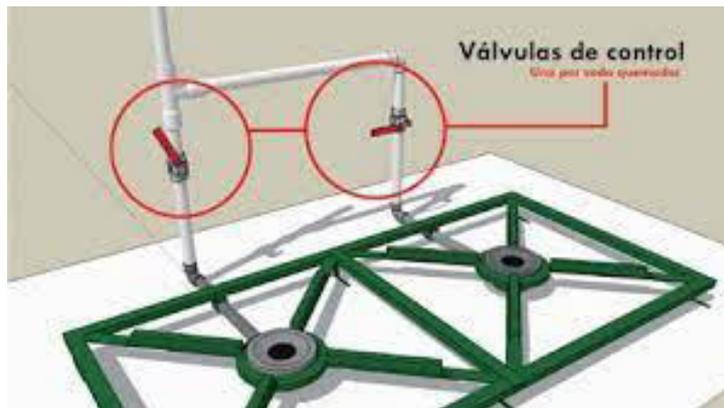


Figura: Filtro de ácido sulfúrico.

Cocina

1. Las cocinas normales de GLP pueden adaptarse al biogás, en su interior cuentan con un chicle que es el que inyecta el GLP, el mismo que puede adaptarse de las siguientes formas:

- Retirar el chicle y así se cierra
- Ensanchar el chicle con un taladro hasta los 5 mm de diámetro, posterior a ello se regula la mezcla de aire al 50%.



Operaciones de carga

1. Para iniciar las operaciones de carga se debe verificar que la tubería de carga y desagüe, se encuentren cerradas.
2. Limpiar el piso del establo próximo al biodigestor sólo con agua, amontonando los estiércoles, lo más cerca de la cámara de carga.
3. Recopilar en una carretilla los estiércoles de sitios distantes y cargarlo directamente en el estercolero.
4. Por cada carretilla de estiércol cargada al estercolero (a ras sin desbordar) se deberán añadir 240 litros de agua, teniendo en cuenta que la capacidad del estercolero y la

manga, registrar en una hoja de control la cantidad de estiércol y agua que se ha añadido.

5. Agitar la mezcla con la soga, que se colocó dentro de la cámara, por 2 minutos con simples tirones, hasta obtener una mezcla homogénea y dejar reposar por 10 o 15 minutos, para que el material sedimentable se deposite.
6. En un vaso tomar una muestra de la mezcla introducida y con papel pH medir el nivel en el que se encuentra, introducir en el vaso la punta del papel, y observar el cambio de color en la tirilla, para compararlo con el parámetro provisto.
7. Registrar en una hoja de control el pH de la muestra:
 - a. Si está entre 7 y 8 no se tomarán medidas correctivas
 - b. Si excede de 8 se debe controlar la mezcla, añadiendo agua.
 - c. Si es menor a 7 se debe añadir más estiércol.

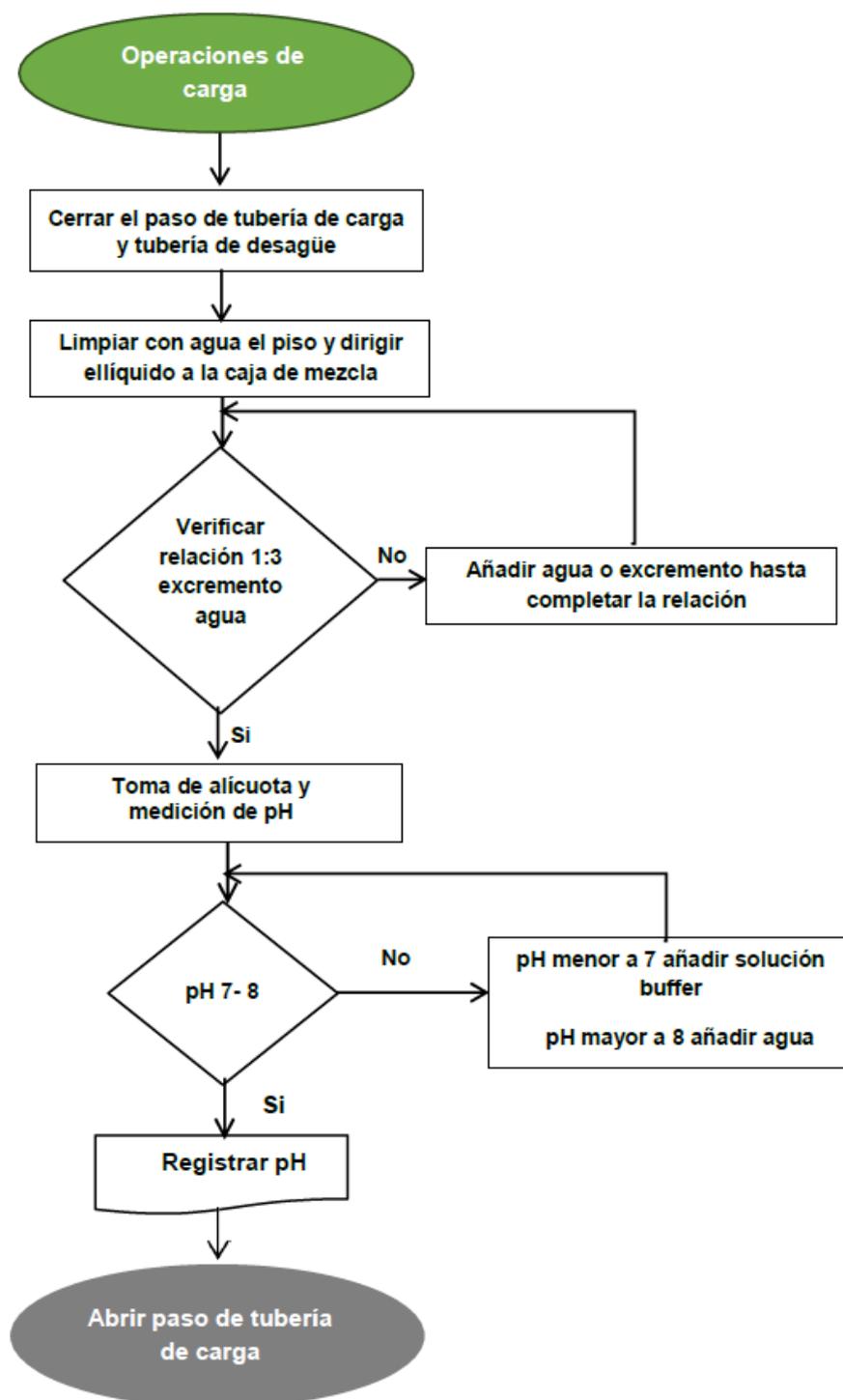
Para tener éxito al equilibrar el pH, se deberá tener en cuenta el volumen de estiércol y agua inicialmente añadido a la cámara de carga.

8. Si el pH se encuentra en un nivel óptimo, se procederá a abrir la compuerta de la tubería de carga, retirar con un rastrillo ramas, piedras o cualquier objeto dañino, posterior a ello, se abrirá la llave de paso del estercolero a la entrada de la manga, se realizará el llenado y se cerrará enseguida la llave de paso.
9. Al culminar la carga, limpiar el residuo sedimentado lavando la cámara de carga con agua y liberando el restante por la tubería de desagüe.
10. Los residuos que ingresen deben estar limpios de materiales que puedan representar un riesgo para la manga, no pueden ingresar residuos que contengan antibióticos o antivirales dentro de 5 días.



Figura: Preparación de los residuos.

El esquema de las operaciones de carga es el siguiente.



- Después de añadir la solución Buffer, se homogenizará la mezcla para su posterior al ingreso al biodigestor, sino se posee la solución Buffer se podrá reemplazar por estiércol fresco hasta que el nivel de pH sea el apropiado.

- Una vez que se añade la cantidad de agua requerida, se procede a abrir la llave de paso y continuar con la carga a la manga del biodigestor.



Operaciones para la gestión del biogás

1. A menos que se requiera, mantener la válvula de uso del biogás cerrada.
2. Comprobar el nivel de agua de la válvula de seguridad.
 - a. Si el nivel se mantiene en 11cm no se deben tomar medidas correctivas.
 - b. Si el nivel es inferior a 11cm, llenar la válvula hasta que la columna de agua alcance este nivel.



Figura: Válvula de alivio.

3. Si en la válvula existe burbujeo, deberá abrirse la llave de paso, encender la cocina y consumir el excedente de biogás hasta que se detenga el burbujeo.
4. Si la válvula no burbujea, verificar que el gasómetro y biodigestor no sigan inflándose.
5. Sí el gasómetro y biodigestor están inflándose:
 - a. Se deberá reducir el nivel de agua en la válvula de seguridad, abrir por unos minutos la válvula de paso hacia quemador y quemar el biogás para retirar el excedente de biogás del biodigestor, hasta que vuelva a su forma original.

- b. Para retirar el excedente del almacenamiento, cerrar la válvula de muestreo y abrir la válvula de uso, encender la hornilla y quemar la sobreproducción hasta que el tanque de almacenamiento regrese a su estado normal.
6. Mensualmente abrir por unos minutos la válvula de seguridad para liberar la acumulación de agua que pueda colmatarse en la tubería o manguera.
7. Trimestralmente verificar el funcionamiento del filtro de ácido sulfúrico instalado entre la manga y gasómetro; para ello se abrirá la válvula de seguridad constatando que no se presente mal olor.
8. Sí se aprecia mal olor, cambiar las limallas de metal del filtro.
9. Si la concentración de ácido sulfhídrico se excede, se deberá reiniciar el proceso de fermentación, limpiando el biodigestor, extrayendo primero el gas almacenado y quemándolo.
10. Verificar que las tuberías de entrada, salida y desagüe no se encuentren obstruidas.
11. Se debe agitar el reactor cuando haya poco o nada de biogás, de preferencia todos los días un estimado de 30 segundos, antes de la alimentación, evitar hacerlo si está caliente.
12. E puede agitar con las manos, de preferencia emplear la soga que se colocó en su instalación.

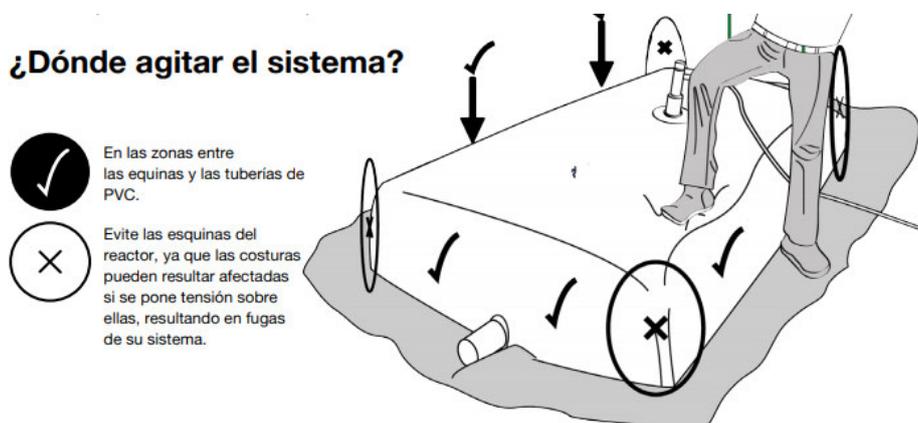
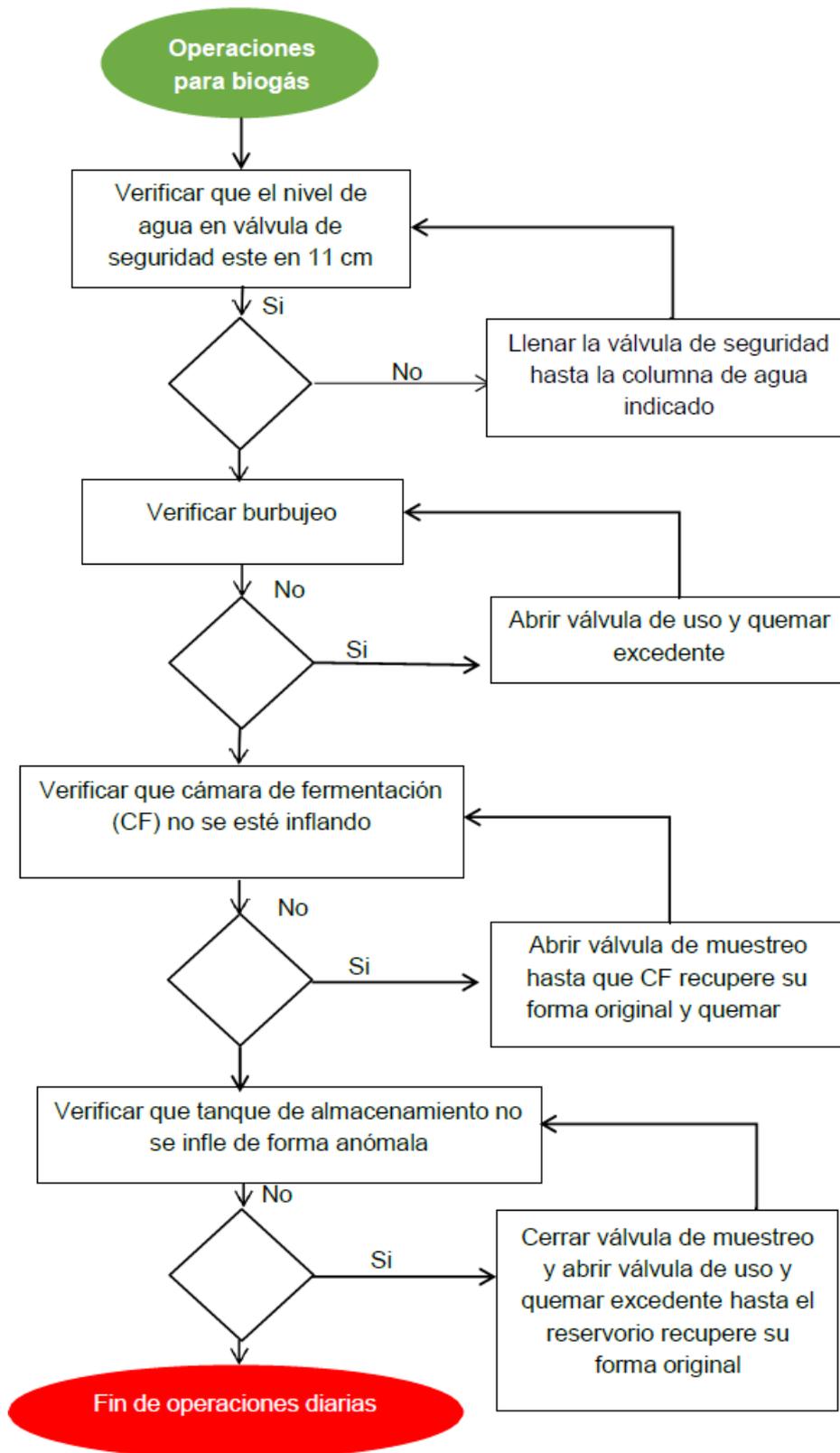


Figura: Agitación del sistema.

El esquema de las operaciones para la gestión del biogás es el siguiente.





Operaciones de descarga

1. Comprobar que se desfogue por la tubería de salida, una cantidad similar de líquido al que se cargue; si se observan anomalías, debe procederse a revisar la tubería y si es necesario desobstruirla.
2. Apenas se empiece a descargar el sistema se debe tomar una muestra para:
 - a. Con un termómetro medir su temperatura².
 - b. Medir su pH con papel reactivo, introduciendo en el recipiente con la muestra una punta del papel reactivo, y observar el cambio de color, para compararlo con las medidas ideales provisto³.
 - c. Tomar una muestra del efluente, para analizarla en el laboratorio y verificar la adecuada concentración de inhibidores (oxígeno, amonio y sulfatos) del proceso⁴.
3. Extraer el biol de la cámara de descarga, cuidando que no se llene totalmente⁵.

Este biol, por sus características y composición nutritiva, será depositado en los distintos potreros, lo que permitirá la fertilización de los mismos y que evitará el uso de químicos contaminantes.



Figura: Descarga de Biol.

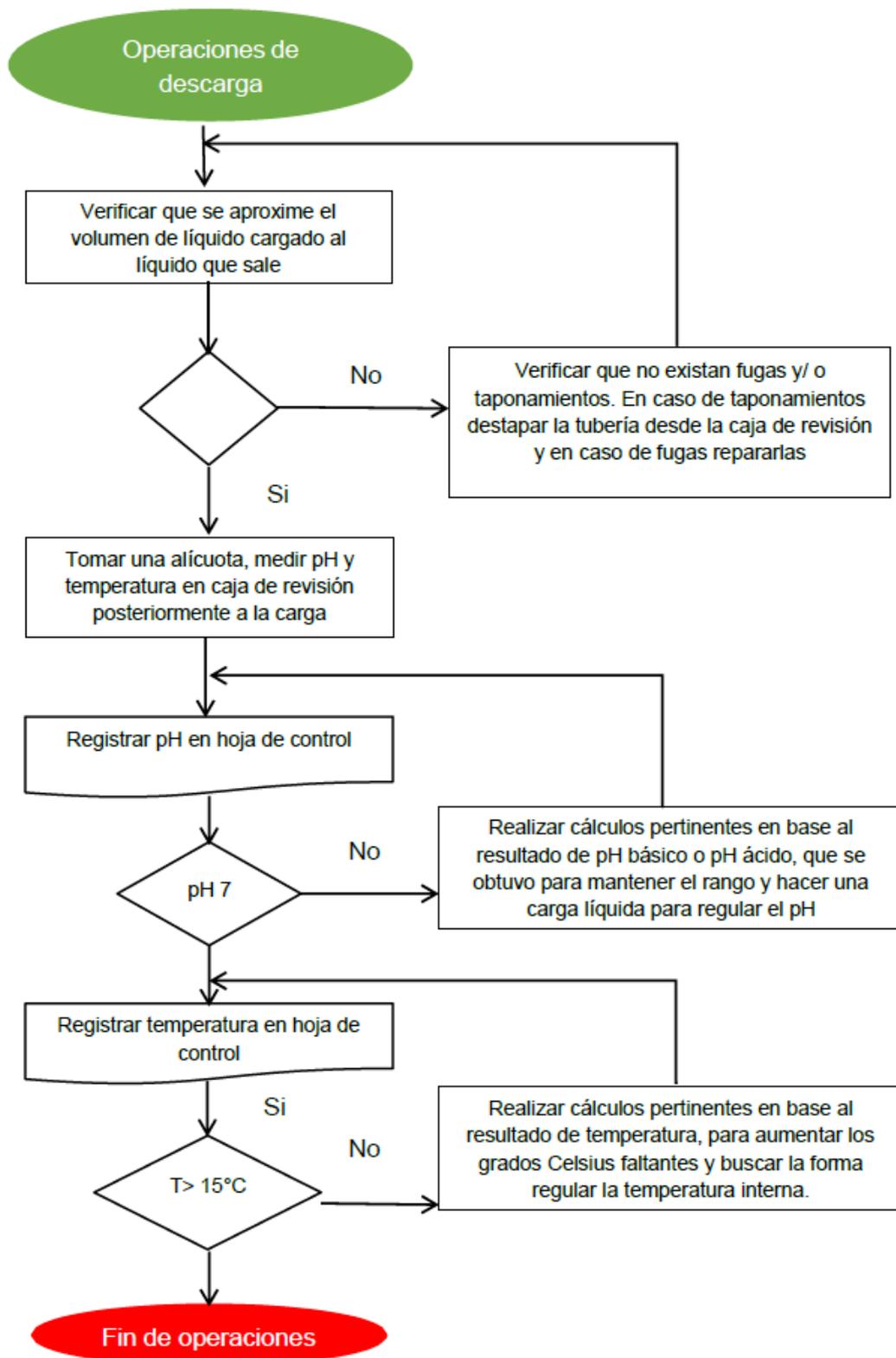
² Esta actividad se debe realizar una vez a la semana.

³ Esta actividad se debe realizar una vez a la semana.

⁴ Esta actividad se debe realizar semestralmente.

⁵ Se estima que la descarga debe hacerse cada 44 días, porque la capacidad del biodigestor es 6269.90 litros y la carga promedio calculada es de 143,78 l/d.

El esquema de las operaciones de descarga del biodigestor es el siguiente.





Operaciones complementarias

1. Precauciones con el equipo

Si se realiza una acción insegura, puede comprometerse la seguridad en la manipulación del equipo.

- a. Asegurarse que el indicador de presión del equipo esté siempre visible.
- b. El biogás es un gas flamable y tóxico, por ello, permanentemente observar el biodigestor y el biogás para evitar explosiones.
 - Verificar que no hayan filtraciones en la línea de conducción de biogás, incluyendo accesorios y uniones; indicadores de fuga son olor a huevo podrido, sonidos en tuberías o conexiones; de detectarlos, se deberán reparar los desperfectos y sellar las fugas con ligas de tubo o reemplazar esa parte.
 - Si no se usa el biodigestor, mantener las válvulas de paso y quemadores cerrados, y cuando se utilice abrirlas.
 - Verificar siempre las llaves de paso a la cocina esten cerradas al finalizar su uso.
 - No encender ningún tipo de fuego en las cercanías del biodigestor, invernadero y almacenamiento.
 - No abandonar materiales inflamables o cortopunzantes cerca al biodigestor, ubicarlos en un lugar seguro.
 - No dejar junto al equipo objetos que obstaculicen el paso.
 - Cerrar el acceso para el tránsito común o cruce de animales.

2. Mantenimiento y limpieza

- a. Siempre mantener ordenado y limpio el lugar donde se encuentra el biodigestor.

- b. Cerrar la válvula de carga y descarga si se limpia el establo con algún detergente, asegurarse que el agua desfogue por el desagüe; al finalizar la limpieza se deberá lavar con agua al menos una vez todo el piso y en caso de la cámara del reactor se llene de detergente, lavar tres veces la cámara para evitar el ingreso de sustancias nocivas en la cámara de fermentación del biodigestor.
- c. Cada semana verificar que el sedimento en la cámara de carga no exceda de 5cm; sí fuese así, retirar manualmente el sedimento y limpiar abriendo el desagüe con agua.
- d. Retirar el lodo sedimentado en la manga después de 2 años y medio de operación, utilizando bombas especializadas.
- e. Revisar los filtros de agua y la viruta de acero del filtro, reemplazarlos cada 3 meses.
- f. No jalar ninguna de las tuberías de conducción, entrada o salida del biodigestor.
- g. Acciones a tomar ante problemas concretos



Figura: Visualización de la acumulación de lodos.

Situación	Acciones
Olor a biogás	Hay pérdidas de biogás, fugas en las mangueras o alguna conexión está abierta, averiada o dañada.
Poco biogás en el reservorio	Verificar el nivel de agua en la válvula de seguridad para que no fugue el biogás. En caso de fisura en el biodigestor, parar su funcionamiento.
No llega biogás a lo quemadores	Purgar la tubería de salida del biodigestor.
Hay poca presión en la línea de conducción	Puede que la línea tenga obstrucciones o pérdidas, se deben colocar manómetros a la entrada y salida, para medir la presión.
No hay producción de biogás	El estiércol añadido al biodigestor es de ganado que ha tomado antibióticos, en la limpieza se introdujo detergente o inhibidores, o se terminó la producción de gas en el biodigestor. No se ha movido o agitado la mezcla. El estiércol dentro del biodigestor posee un pH menor a 6, suspender la caga al biodigestor, por al menos 1 semana, hasta que aumente el pH y retomar su alimentación cuando su pH sea 7 o mayor.
Hay un incendio	Mantener frío el biodigestor. Mantener las válvulas cerradas. Combatir el incendio desde un lugar protegido.
Perforación en la membrana	En el caso de una perforación pequeña se puede reparar, secar la zona, retirar el agua y limpiar que no queden restos que sigan generando rupturas, de ser pequeña parchar con cinta adhesiva industrial o ligar con una liga de neumático. En caso de ser mayor, considerar vaciar el reactor, limpiar y parchar.