

**DISEÑO TEÓRICO DE UN BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS
PARTIENDO DE LA GALLINAZA PRODUCIDA EN LA FINCA “LA VICTORIA”
UBICADA EN LA VEREDA LOS EJIDOS EN VÉLEZ SANTANDER**

KAREN LIZETH SANDOVAL NIÑO

EMMANUEL WUIZA MOSQUERA

Proyecto integral de grado para optar al título de

Ingeniero Químico

Director

HARVEY ANDRES MILQUEZ SANABRIA

Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTA D.C

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Fecha: Agosto de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector de Claustro.

Dr. MARIO POSADA GARCIA-PEÑA

Consejero Institucional

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA PEÑA

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO

Secretario General

Dr. JOSE LUIS MACIAS RODRIGUEZ

Decano de la Facultad de Ingenierías

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA

DEDICATORIA

Dedico este logro principalmente a mis padres, Luisa Edith Niño Castiblanco y Wilson Enrique Sandoval Salamanca, quienes sin ellos esto no sería posible, que, gracias a su sacrificio, esfuerzo, amor, dedicación y sin importar las adversidades han estado a mi lado apoyándome y brindándome todo lo necesario para seguir adelante, así mismo, todos los logros alcanzados a partir de ahora serán por ellos y para ellos, no me alcanzara la vida para amarlos y brindarles todo lo que he recibido, espero poder hacerlos muy felices, los amo mas que a nadie.

A mi hermana Sofia Sandoval, que espero poder brindarle un excelente futuro e indirectamente me ha ayudado con sus locuras y alegrías, por aguantar mi malgenio y hacer más feliz mi día a día, te amo flaquita.

A mi novio y compañero Emmanuel Wuiza, que él ha llevado la mejor y la peor parte de todo este proceso, donde me ha soportado y ayudado durante todo este tiempo de carrera y proyecto, aportándome cada día algo nuevo, te amo.

Karen Lizeth Sandoval Niño

Dedicó este trabajo a mi madre Fanny Mosquera Hernández por enseñarme a ser una buena persona y ser ese gran ejemplo de mujer en la vida, por enseñarme el valor de una familia y que en los momentos más duros que hemos pasado, nunca nos ha dejado caer, siempre has sido un gran ejemplo para mi durante toda tu vida, te amo madre.

A mi padre Ciro Antonio Güiza Castañeda, por siempre estar a mi lado a pesar de mis errores y nuestras peleas, por ser ese ejemplo de hombre trabajador y un padre guerrero que, a pesar de su dura infancia, siempre estuvo con nosotros, enseñándonos a ser buenas personas y a trabajar duro por lo que queremos, te amo padre.

A mi hermana Vannessa Wuiza Mosquera que a pesar de la distancia siempre estuvo pendiente de mí, enseñándome que los sueños si se cumplen, apoyándome de una u otra manera, siendo ese gran ejemplo de mujer y madre que eres ahora, te amo vanne.

A mi abuelita Eufemia Castañeda, que siempre me ha amado y ha estado pendiente de mí, desde que soy un bebe, hace años dijo que me quería ver profesional y hoy en día el destino te tiene con vida para estar a mi lado y ver este logro, te amo abue.

Finalmente, a mi novia y compañera de vida Karen Sandoval, por estar siempre a mi lado apoyándome en todos mis pasos, por estar a mi lado a pesar de todas las dificultades y por amarme tanto como yo a ella.

Emmanuel Wuiza Mosquera

AGRADECIMIENTOS

Agradezco inicialmente a mis padres por brindarme la oportunidad de estudiar y apoyarme para seguir adelante, que gracias a ellos soy la persona que soy y no tengo reclamo alguno de lo excelentes padres que han sido durante este proceso y vida, sin su ayuda nada sería posible y la felicidad se la debo a ellos, también agradezco a mis padrinos Clara Sandoval y Guillardito Niño que me han apoyado y aconsejado, y me han considerado como una hija donde mis alegrías son sus alegrías, a mi novio Emmanuel por realizar este logro juntos y a sus padres por ser tan especiales conmigo, a mis amigos y compañeros Daniela y Juan Pablo por brindarme en esta etapa de vida felicidad, ayuda y amistad y finalmente y no menos importante a nuestro director Harvey Milquez por ayudarnos y apoyarnos durante todo este proyecto en cualquier instante que lo necesitábamos.

Karen Lizeth Sandoval Niño

Le agradezco este trabajo a mis padres y hermana por apoyarme durante estos 5 años, estando a mi lado frente a toda adversidad, los escogería en esta y otra vida. A mis compañeros de universidad por estar a mi lado ayudándonos en todo, en especial a Juan Pablo Martínez que siempre ha estado conmigo en las buenas y en las malas. A mi primo Sergio Mosquera, que ha sido el hermano que nunca tuve, que siempre ha estado conmigo para apoyarme en lo más mínimo y nunca me ha dejado atrás. Finalmente, al amor de mi vida Karen Sandoval Niño y a su familia, por estar a lo largo de este proceso apoyándome en todo y queriéndome tanto, y no menos importante a nuestro director Harvey Milquez por aportar su gran conocimiento a lo largo de este proceso, gracias por siempre estar ahí cuando lo necesitábamos.

Emmanuel Wuiza Mosquera

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

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS	15
1. CARACTERIZACIÓN DE LA FINCA	16
1.1 Finca “La Victoria”	16
<i>1.1.1 Ubicación</i>	16
<i>1.1.2 Manejo de la gallinaza</i>	17
<i>1.1.3 Problemas ambientales generados</i>	17
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 Residuos orgánicos	19
2.2 Residuos de origen animal	19
2.3 Gallinaza	19
2.4 Digestión anaerobia	20
<i>2.4.1 Hidrolisis</i>	20
<i>2.4.2 Acidogénesis</i>	20
<i>2.4.3 Acetogénesis</i>	21
<i>2.4.4 Metanogénesis</i>	21
2.5 Factores determinantes en la digestión anaerobia	22
<i>2.5.1 Temperatura</i>	22
<i>2.5.2 pH</i>	23
<i>2.5.3 TRH</i>	23
<i>2.5.4 Sólidos totales</i>	23

2.5.5 <i>Relación C/N</i>	24
2.5.6 <i>Nutrientes</i>	24
2.5.7 <i>Humedad</i>	24
2.6 Biodigestor	24
2.6.1 <i>Clasificación de los biodigestores</i>	25
2.6.2 <i>Tipo de biodigestores rurales</i>	26
2.7 Matriz pugh	31
3. METODOLOGIA	32
3.1 Características fisicoquímicas de la gallinaza	32
3.2 Características de los biodigestores	33
3.2.1 <i>Caudal</i>	33
3.3 Variables del proceso	34
3.3.1 <i>Temperatura</i>	34
3.3.2 <i>TRH</i>	34
3.4 Dimensiones del biodigestor	35
3.4.1 <i>Tanque de mezcla</i>	35
3.4.2 <i>Tanque de digestión</i>	36
3.4.3 <i>Tanque de compensación</i>	42
3.5 Tuberías y accesorios	44
3.5.1 <i>Tubería de carga y descarga</i>	44
3.5.2 <i>Tubería de biogás</i>	44
3.5.3 <i>Accesorios</i>	45
3.6 Costos	45
4. RESULTADOS	46
4.1 Características fisicoquímicas de la gallinaza	46

4.2 Matriz pugh	49
4.2.1 Costos	49
4.2.2 Facilidad de construcción	50
4.2.3 Caudal	50
4.2.4 Producción de biogás	53
4.2.5 Vida útil	53
4.3 Variables del proceso	55
4.3.1 Temperatura	55
4.3.2 TRH	55
4.3.3 pH	55
4.3.4 Sólidos totales	56
4.3.5 Relación C/N	56
4.4 Dimensiones del biodigestor	56
4.4.1 Tanque de mezcla	56
4.4.2 Tanque de digestión	57
4.4.3 Tanque de compensación	59
4.5 Tuberías y accesorios	60
4.5.1 Tubería de carga	60
4.5.2 Tubería de descarga	61
4.5.3 Tubería de biogás	61
4.5.4 Válvula para entrada de carga	63
4.5.5 Válvula para salida del biogás	63
4.5.6 Trampa de agua	63
4.5.7 Trampa de ácido sulfhídrico	63
4.6 Especificaciones de construcción	64

4.6.1 Partes principales	64
4.7 Puesta en marcha	65
4.8 Mantenimiento	66
4.8.1 Mezclado	66
4.8.2 Sedimentos	66
4.8.3 Trampa de agua	67
4.8.4 Trampa de ácido sulfhídrico	67
4.9 Costos	67
5. CONCLUSIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS	77

LISTAS DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación finca La Victoria, Vélez Santander	16
Figura 2. Etapas de la digestión anaerobia	22
Figura 3. Biodigestor modelo tubular	27
Figura 4. Biodigestor modelo hindú	28
Figura 5. Biodigestor modelo horizontal	29
Figura 6. Biodigestor modelo chino	30
Figura 7. Partes del tanque de digestión	37
Figura 8. Esquema general del balance de masa	50
Figura 9. Dimensiones del tanque de digestión	58
Figura 10. Dimensiones del cuello	59
Figura 11. Alturas para cálculo de presiones	60
Figura 12. Dimensiones para el cálculo de tubería	61
Figura 13. Diámetro de tubería PVC y acero galvanizado	62
Figura 14. Nutrientes de estiércol de diferentes animales	77
Figura 15. Parámetros fisicoquímicos del estiércol de gallina	78
Figura 16. Parámetros fisicoquímicos de la gallinaza	79
Figura 17. Elementos fisicoquímicos de la gallinaza	80

RESUMEN

El presente trabajo realizó una alternativa para el aprovechamiento de gallinaza producida en la finca la victoria ubicada en Vélez Santander, el cual corresponde a un diseño teórico de un biodigestor para producir biogás partiendo de esta excreta.

Se investigaron diferentes referentes teóricos que brinden información sobre las características físico-químicas de la gallinaza de piso, donde se promedió el pH dando como resultado un dato de 7,01, sólidos totales de 93,12%, relación C/N de 11,79%, humedad de 30%, nutrientes como potasio de 1,89% y fosforo de 4,27%; con base a esto se procedió a seleccionar el tipo de biodigestor mediante una matriz Pugh, relacionando y puntuando aspectos como costos (30%), caudal (25%), facilidad de construcción (20%), producción de biogás (15%) y vida útil (10%), obteniendo el modelo chino como el biodigestor más favorable con un puntaje de 3,9.

Posteriormente se realizó el diseño del biodigestor seleccionado, donde el tanque de mezcla dispone de un volumen de 2.200L, para el tanque de digestión, el volumen total de la cúpula es de 18,86m³, el volumen de la parte cilíndrica es de 52,1m³, y el volumen de la parte cónica es de 6,97m³, finalmente, el tanque de compensación tendrá un volumen de 13,55m³, así mismo se añadieron tuberías y accesorios que se requieren para el adecuado funcionamiento del biodigestor.

Finalmente, y debido a que el proyecto es netamente teórico se realizaron los costos de la implementación de este sistema teniendo en cuenta materiales, accesorios y demás, dando como resultado un costo de \$6.600.464.

Palabras claves. Residuos orgánicos, Gallinaza, Biogás, Biodigestor, Digestión anaerobia, Diseño, Modelo chino.

INTRODUCCIÓN

En Colombia la avicultura es una de las actividades económicas con gran importancia porque satisface necesidades proteicas donde el consumo de huevo y carne de pollo va aumentando continuamente, lo que equivale al incremento de la producción avícola, según los datos reportados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) esta actividad económica ha aumentado un 79,74% en los últimos ocho años, así mismo la producción de huevos en el año 2020 tuvo un equivalente a 982.895 toneladas que a comparación con el año 2019 su producción aumentó un 12%, incrementando los volúmenes de estiércol a aproximadamente 70.946 toneladas en el año [1].

Uno de los productores de huevo se ubica en los galpones avícolas de la finca “La Victoria” ubicada en la vereda los ejidos de Vélez Santander, allí se producen 7.500 huevos diarios, generando aproximadamente 405 toneladas de gallinaza cada 18 meses, debido a que la finca no es tecnificada, esta gallinaza no está siendo tratada y manejada correctamente lo que implica graves problemas ambientales.

Actualmente la mayoría de la gallinaza es vendida para fincas aledañas y el restante es utilizado como fertilizante en varios cultivos pertenecientes a esta, la materia orgánica es recolectada cada vez que las gallinas finalizan su tiempo de postura. Lo que implica que durante todo este tiempo esta se acumula en el suelo ganando una alta carga de nutrientes, afectando la calidad el agua, suelo y aire, donde “los nutrientes principales que despiertan preocupación son el nitrógeno y el fósforo. Los compuestos de nitrógeno contenidos en la gallinaza desaparecen en la tierra por su absorción por el cultivo receptor o su conversión en gases que se volatilizan en la atmósfera en forma de amoníaco” [1], así mismo el nitrógeno se oxida convirtiéndose en nitratos que al contacto con agua causarían afectaciones a la salud, y el sulfuro de hidrogeno emiten olores desagradables que propician la proliferación de vectores y microorganismos patógenos [2].

Debido a lo anteriormente mencionado, se plantea diseñar un biodigestor para la producción de biogás, aprovechando esta materia orgánica, donde contribuiría con la reducción de los contaminantes ocasionados, donde el desarrollo de este trabajo se basa en cinco capítulos de los cuales el primero hace referencia a la caracterización de la finca como la ubicación, el manejo de la gallinaza y los problemas ambientales generados, en el capítulo dos se expone el marco teórico

que contiene las definiciones y explicaciones de términos importantes del proyecto, en el capítulo tres se desarrolla la metodología aplicada para el cumplimiento de los objetivos, en el capítulo cuatro se exponen los resultados del proyecto y finalmente en el capítulo cinco se encuentran las conclusiones.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar teóricamente un biodigestor para la producción de biogás partiendo de la gallinaza producida en la finca “La Victoria” ubicada en la vereda los ejidos en Vélez Santander.

Objetivos específicos

1. Diagnosticar las características de la gallinaza y el biodigestor.
2. Diseñar un biodigestor que se adecue a las características de la gallinaza.
3. Analizar los costos del sistema para el aprovechamiento de la gallinaza.

1. CARACTERIZACIÓN DE LA FINCA

1.1 Finca “La Victoria”

Se dedica a la cosecha de café, caña de azúcar y principalmente a la producción de huevos, contando con un galpón de 7.500 gallinas ponedoras, cuenta con 60.000 m², en donde se cuenta con dos aljibes, los cuales abastecerán el agua necesaria para este proceso.

1.1.1 Ubicación

Se ubica en el km 8 de la vereda los ejidos del municipio de Vélez Santander llegando al municipio de Chipatá, como se muestra en la Figura 1, esta cuenta con 60.000 m² de terreno, de los cuales se dispone de 1.000 m² para el diseño del biodigestor.

En Vélez, durante el transcurso del año la temperatura generalmente varía de 12 °C a 19 °C, en el caso de Chipatá, su temperatura oscila entre los 12°C a 25°C, y su temperatura máxima se presenta en las horas del mediodía hasta la tarde. [3]

Figura 1.

Ubicación finca la victoria, Vélez Santander



Nota. La Figura esquematiza la ubicación de la finca la victoria en Vélez Santander. Tomada de Google. (s.f.). [Indicaciones de Google Maps para llegar a la finca “La victoria” en Vélez-Santander]. Disponible: <https://cutt.ly/eQQ7fLY>

Debido a que la finca se encuentra en las afueras de Vélez vía Chipatá, su temperatura ambiente es de 12°C a 25°C, que correspondiente a las condiciones climáticas del municipio de Chipatá, el cual queda más cercano a la finca.

1.1.2 Manejo de la gallinaza

Actualmente hay 7.500 gallinas ponedoras, las cuales colocan un huevo diario, y cada una de estas gallinas produce en promedio 100 gr de gallinaza diaria, para un total de 405 toneladas cada 18 meses de este subproducto. Se aprovecha una mínima cantidad de este residuo orgánico que corresponde al 25% dentro de la finca, donde es utilizado como fertilizante en varios cultivos pertenecientes a esta, sin embargo, esto puede ocasionar afectaciones al ambiente debido a que no se tienen en cuenta los pre tratamientos que se le deben realizar, la parte sobrante es vendida a fincas aledañas y ganaderas.

1.1.3 Problemas ambientales generados

Debido a que la gallinaza es recolectada cada 18 meses, esta materia orgánica se acumula en el suelo durante todo este tiempo ganando una alta carga de nutrientes. Una vez levantada y reubicada la cama de gallinaza se convierte en posibles contaminantes, generando impactos negativos en el aire, agua y suelo.

1.2.3.a Afectación en la calidad del aire. Como contaminante se encuentra el nitrógeno, el cual es uno de los principales nutrientes que causa preocupación debido a la conversión de gases que se volatilizan en la atmósfera en forma de amoníaco, también se encuentra el sulfuro de hidrógeno donde perjudica a quienes habitan cerca de esta finca, causando un fuerte olor [4].

1.2.3.b Afectación en la calidad del agua. Debido a que “el nitrógeno es muy móvil en el suelo y puede ser transportado a las aguas subterráneas y/o las aguas superficiales cercanas” [4], este nitrógeno se oxida y permanece en forma de nitratos que al contacto con agua potable causaría afectaciones a la salud, “El fósforo excretado también es liberado mediante la acción de las fitasas contenidos en los microorganismos del suelo dando lugar a los fenómenos de eutrofización en los cuerpos de agua por lo cual hay un incremento acelerado de algas y agotamiento del O₂ lo que provoca mortalidad de fauna acuática” [2].

1.2.3.c Afectación al suelo. Los compuestos de nitrógeno contenido en la gallinaza y las camas son muy dinámicos, desapareciendo de la tierra por su absorción. Teniendo en cuenta que una pequeña parte de la gallinaza es utilizada en cultivos de la finca, lo cual indica que la acumulación de metales presentes en este como lo son el cobre y el zinc, puede ser perjudicial específicamente tóxico a los cultivos, afectando la tierra y los cultivos [4].

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Residuos orgánicos

Son residuos naturales que se descomponen fácilmente en el ambiente. Entre estos se encuentran: restos de residuos vegetales y alimenticios, papeles no aptos para reciclaje que no tengan tintas, pasto, hojarasca, estiércoles de la cría de animales domésticos, residuos de cosechas, aserrines puros o con mezclas de excretas animales, líquidos biodegradables, madera, y otros residuos que puedan ser transformados fácilmente en materia orgánica [5]. Este proyecto se enfoca en el aprovechamiento de los residuos orgánicos de origen animal específicamente el estiércol producido por gallinas ponedoras en la finca “La Victoria”.

2.2 Residuos de origen animal

Son residuos producidos de diferentes actividades agrícolas, donde pueden ser productos o subproductos, estos residuos están integrados básicamente por las excretas de los animales [6], la acumulación de estas pueden transformarse y constituir un daño para el medio ambiente, sin embargo; actualmente existen diferentes alternativas para el aprovechamientos de estas, donde se generan fertilizantes, compostaje y energías alternativas como el biogás.

2.3 Gallinaza

Es el estiércol producido por las gallinas ponedoras en los galpones avícolas, dicho estiércol se utiliza para fertilizantes en la agricultura y alimento bovino combinado con otros insumos. “La gallinaza es un abono orgánico de excelente calidad. Se compone de eyecciones de las aves de corral y del material usado como cama, que por lo general es la cascarilla de arroz mezclada con cal en pequeña proporción, la cual se coloca en el piso” [7].

“En el país se producen cerca de 59.000 toneladas diarias de gallinaza producto de la deposición de 380 millones de pollos y 24 millones de ponedoras. Cada pollo produce 150 gramos de gallinaza mientras que una gallina ponedora genera 120 gramos” [8].

2.4 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es una reacción bioquímica que utiliza biomasa con ciertas características, como los residuos orgánicos, por ejemplo, los residuos animales de una granja como el estiércol, la sobra de alimentos de los que viven en ella o aguas residuales de distintas actividades agrícolas, con el fin de generar biogás. En donde ciertos microorganismos en un ambiente anaerobio descomponen la materia orgánica como las proteínas, carbohidratos y grasas en moléculas con una menor masa atómica, donde los compuestos finales son metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) a esto se le conoce como biogás, el cual es una energía renovable [9].

El proceso para la producción de biogás por medio de la digestión anaerobia se divide en 4 etapas, donde en los digestores estos ocurren simultáneamente.

2.4.1 Hidrólisis

En esta etapa los microorganismos no pueden utilizar la materia orgánica directamente como sustrato de alimento, ya que este contiene grandes moléculas orgánicas como lo son las proteínas, los carbohidratos y las grasas. Por ende este proceso es el que proporciona los sustratos orgánicos para la digestión anaerobia, por medio de enzimas extracelulares producidas por microorganismos, encargadas de descomponer los grandes polímeros en moléculas más pequeñas como lo son aminoácidos, ácidos grasos y azúcares, para que los microorganismos pueden tomar dentro de la célula y utilizarla como una fuente de energía y nutrición [10].

2.4.2 Acidogénesis

En esta etapa las moléculas que quedan de la hidrólisis como lo son los ácidos grasos, aminoácidos y azúcares son descompuestos por microorganismos acidógenos los cuales, por medio de la fermentación en un ambiente bastante ácido en el biodigestor, se generan principalmente compuestos como alcoholes, ácidos grasos volátiles y ácidos orgánicos. Estos microorganismos acidogénicos a parte de producir y generar una fuente de alimento para la próxima etapa, también elimina cualquier traza de oxígeno en el sistema [10].

2.4.3 Acetogénesis

En esta etapa se tiene como fin producir acetato que pueda ser consumido por las bacterias metanogénicas, por medio de dos tipos de microorganismos; las bacterias acetogénicas que transforman las moléculas de etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos en acetato e hidrógeno; y las bacterias homoacetogénicas que consumen dióxido de carbono e hidrógeno formando acetato [11].

2.4.4 Metanogénesis

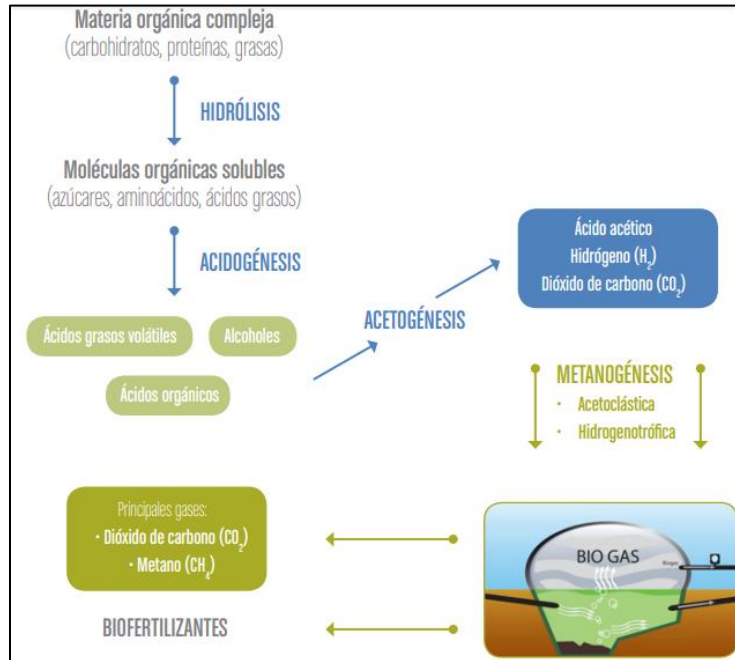
Esta es la última etapa del proceso, en donde elementos como el oxígeno, hierro, sulfato y manganeso se reducen, mientras que el hidrógeno y el dióxido de carbono se acumulan, junto a otros compuestos orgánicos ligeros debido a la fermentación.

La metanogénesis elimina los compuestos finales de la composición como el hidrógeno, compuestos orgánicos pequeños y el dióxido de carbono, este es un proceso que realizan los microorganismos conocidos como metanógenos que usan dióxido de carbono para producir metano, finalmente en esta fase se produce el 90% de metano del biodigestor [12].

En la Figura 2 se puede observar gráficamente las 4 etapas de la digestión anaerobia.

Figura 2.

Etapas de la digestión anaerobia



Nota: La figura representa las etapas de la digestión anaerobia. Tomado de FAO, “Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores”, *Colección Doc. Técnicos*, p. 104, 2019, [En línea]. Disponible en: http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuideBiogasyBiodigestores-19-07-10.pdf

2.5 Factores determinantes en la digestión anaerobia

2.5.1 Temperatura

La temperatura es de vital importancia en la digestión anaerobia, como en otros procesos biológicos, pero de esta dependen varios factores para su control, como lo son el tipo de biodigestor, el material de construcción, la temperatura ambiente donde se ubica y la temperatura de la materia prima. Dentro de este factor se involucra la velocidad de crecimiento de los

microorganismos para la producción de biogás y esto depende de la temperatura en el que se encuentre el sistema.

Los microorganismos anaeróbicos pueden trabajar dentro de 10°C-55°C y se dividen en tres rangos de temperatura los cuales son: psicrófilos (operan entre 10°C-25°C), mesófilos (operan entre 25°C-40°C) y los termofílicos (operan entre 40°C - 55°C), dentro de cada uno de estos rangos se puede producir biogás. Sin embargo, una temperatura alta influye en gran parte a la digestión anaerobia, ya que la producción de biogás aumenta, al igual que el crecimiento microbiano y la viscosidad de sólidos disminuye haciendo que la necesidad de la agitación sea más baja [9].

2.5.2 pH

Es una característica principal en la digestión anaerobia, ya que si no se controla o no se tiene un óptimo pH puede afectar este proceso y la eficiencia de la digestión. Para la etapa de la hidrólisis y acidogénesis el rango de pH está entre 5,5 – 6,5 y para la etapa de la metogénesis el pH debe estar entre 7,8 – 8,2; debido a que la producción de metano depende de los microorganismos metanogénicos es recomendable tener un pH cercano a la neutralidad, para que la producción de biogás sea estable [13].

2.5.3 TRH

Es el tiempo de retención hidráulico, que significa el periodo de tiempo que dura la materia orgánica en degradarse y es el cociente entre el volumen del biodigestor y el caudal de la materia orgánica a ingresar. El TRH está directamente relacionado con la temperatura, ya que a mayor temperatura menor es el tiempo de retención, en base a esto los organismos psicrófilos tienen la mayor duración y los termofílicos la menor [9].

2.5.4 Sólidos totales

Los sólidos totales es la fracción seca o sólida de la materia prima, al tener un alto contenido de sólidos totales se afecta la movilidad de los microorganismos metanogénicos, encargados de la producción de metano, dando como consecuencia una baja eficiencia y producción del biogás.

Se ha demostrado experimentalmente que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de 8% a 12% de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos, que tienen entre un 40 a 60% de sólidos totales [14].

2.5.5 Relación C/N

La relación de carbono/nitrógeno es de suma importancia para la digestión anaerobia, ya que estos dos elementos son de alimento para las bacterias metanogénicas, y dichas bacterias son fundamentales para el desarrollo del biogás. La función del carbono y el nitrógeno, es la fuente de energía y es usado por los microorganismos para dar formación a células nuevas, respectivamente.

Los microorganismos consumen mayor carbono que nitrógeno, por esta razón la relación C/N ideal para el proceso de digestión anaerobio está entre el siguiente rango 20:1 a 30:1 [14].

2.5.6 Nutrientes

La velocidad del proceso de digestión anaerobia depende del crecimiento bacteriano que ocurra en el biodigestor, donde éste aumenta dependiendo la alta carga de nutrientes que contenga la materia orgánica utilizada, por esto es importante conocer cuáles son “los principales nutrientes que se deben presentar en el sistema anaerobio, los cuales son, nitrógeno, carbono, sulfuro, fósforo, y sales minerales” [15].

2.5.7 Humedad

La biomasa utilizada para la digestión anaerobia debe tener alto contenido de humedad entre el 80%-90%, compuesta principalmente por polisacáridos, proteínas, lípidos y lignina, la combinación de las excretas con agua se le denomina purines [15].

Sin embargo los altos índices de humedad generan que el metano producido sea un gas naturalmente húmedo, por lo que puede dañar las partes metálicas del biodigestor [16].

2.6 Biodigestor

Un biodigestor es un recipiente o tanque sellado herméticamente, que contiene residuos orgánicos de origen vegetal o animal como restos de comida, desperdicios orgánicos de industrias,

subproductos orgánicos de bajo valor comercial, cultivos energéticos, residuos cloacales, estiércol de animales, etc. La descomposición de estos residuos dentro de los biodigestores produce biogás, la cantidad producida depende del tipo de biodigestor y residuos orgánicos que se seleccionen.

“Los biodigestores constituyen una alternativa económica y efectiva en comunidades rurales de todo el mundo. Permiten satisfacer la demanda energética de estas poblaciones y proporcionan un medio adecuado para manejar los residuos de humanos y animales. En resumen, son una alternativa eficaz para hacer frente al calentamiento global” [17].

2.6.1 Clasificación de los biodigestores

Existen diferentes tipos de biodigestores donde cada uno de estos se diferencia por modalidad de carga, estructura, materia prima y demás, por esta razón se va a clasificar y comparar con el fin de hacer una selección considerando el tipo de materia prima, para realizar el diseño en este trabajo.

Según su forma de carga:

2.6.1.a Discontinuo. «Estos biodigestores se cargan con las materias primas en una sola carga o lote, después de un cierto período de fermentación, cuando el contenido de materias primas disminuye y el rendimiento de biogás decae a un bajo nivel, se vacían los digestores por completo y se alimentan de nuevo dando inicio a un nuevo proceso de fermentación. Esto se conoce también como digestores Batch» [14].

La producción de biogás en este tipo de digestores es de 0,5 a 1,0 m³ biogás/m³ digestor [18].

2.6.1.b Semicontinuo. Dentro de estos están los biodigestores que una vez por día se cargan por gravedad, con volúmenes de mezcla que dependen del tiempo de retención hidráulico (TRH) y el volumen total del biodigestor; así, produce una cantidad de gas constante al día si se mantienen las condiciones de operación, descargando regularmente en la misma cantidad del afluente que se incorporó, este se descarga totalmente una o dos veces por año, este proceso es usado principalmente en el medio rural.

Este tipo de digestores presenta una buena eficiencia de producción de biogás, generando entre 0,5 a 1,0 m³ biogás/m³ digestor, y aún más [18].

2.6.1.c Continuo. Este tipo de biodigestores se utilizan para tratamiento de aguas residuales. En general son plantas muy grandes, en las cuales se emplean equipos comerciales para alimentarlos, proporcionarles calefacción y agitación. Por lo tanto, este tipo de biodigestores son más industriales, donde se genera una gran cantidad de biogás.

“La carga y la descarga se realizan en forma periódica; por lo general, todos los días. La construcción no requiere muchas exigencias; pero, el material de fermentación debe ser fluido y uniforme” [19].

2.6.2 Tipo de biodigestores rurales

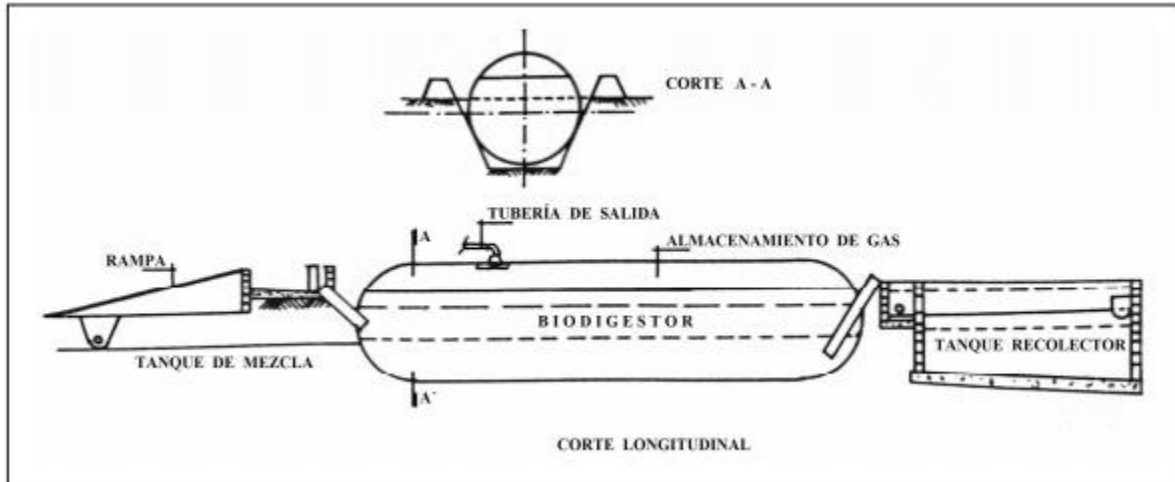
Los biodigestores son utilizados para el tratamiento de los residuos orgánicos y existen variedad de estos, teniendo en cuenta que la carga será semicontinua y que el diseño va dirigido a la finca “La Victoria”, se seleccionaron 4 tipos de biodigestores rurales, que producen biogás utilizando como materia prima el estiércol, con el fin de comparar y realizar una correcta selección del tipo de biodigestor que se ajuste a las necesidades y aspectos importantes considerados por la finca.

2.6.2.a Modelo Tubular. Este tipo de biodigestor también es conocido como biodigestores taiwaneses debido a que “en los años de mil novecientos sesenta en Taiwán, cuando varios ingenieros buscaron una alternativa económica para la fabricación de biogás, desarrollaron un biodigestor de nylon y neopreno, pero con el tiempo descubrieron que era una idea costosa” [20]. Después de varios años esta propuesta fue mejorando, cambiando los materiales para su construcción, con bajo costo y siendo efectivo basándose en polietileno y tubos de PVC, el cual se puede observar en la Figura 3.

Este tiene en la parte superior un biodigestor de bolsa en el cual se almacena el gas, la entrada y la salida se encuentran en la misma superficie de la bolsa, por lo general, son tubos largos, que pueden ir enterrados o sobre el piso. Esta característica alargada permite que, cuando se carga, toda la masa de líquido dentro del biodigestor se mueva hacia la salida, lo que provoca que la misma carga constituya una forma de agitación [21].

Figura 3.

Biodigestor modelo tubular



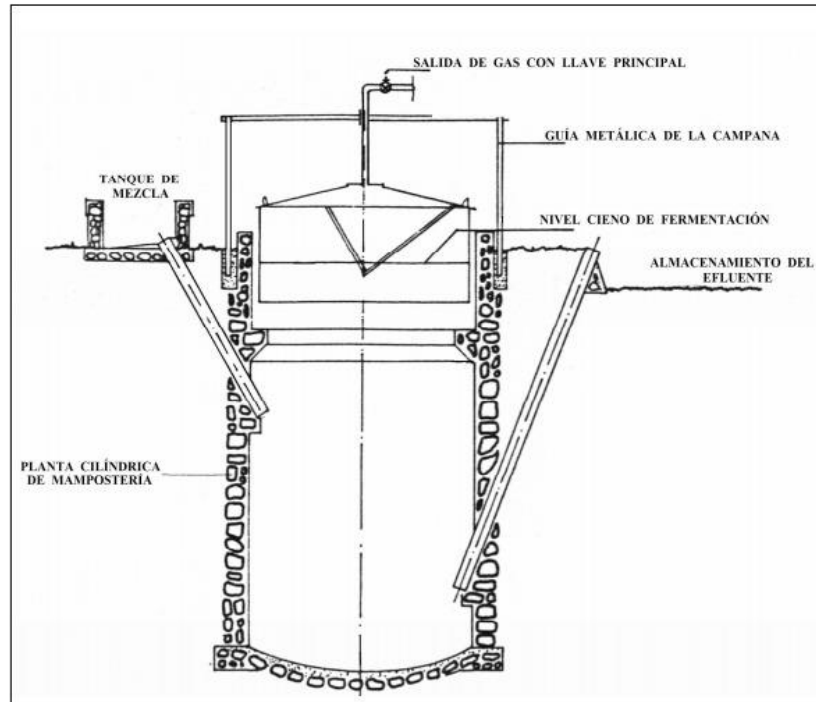
Nota. La figura esquematiza el biodigestor modelo tubular. Tomado de E. R. Razo Azhig y M. I. Villafuerte Lopez, «Diseño, construcción y pruebas de un biodigestor experimental para fines didácticos», p. 93, 2007, [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/306>.

2.6.2.b Modelo Hindú. Estos biodigestores se crearon en los años 50 después de la segunda guerra mundial para satisfacer la necesidad de biogás para los tractores; “Son verticales y enterrados bajo tierra, se cargan de materia orgánica por gravedad una vez al día, con un volumen de mezcla que depende del tiempo de fermentación o retención y producen una cantidad diaria más o menos constante de biogás si se mantienen las condiciones de operación” [14]. En la parte superior del sistema cuenta con un gasómetro y una campana en donde se almacena y distribuye el biogás para su uso, el cual se puede observar en la Figura 4.

Su construcción es relativamente fácil, y si hay errores en la construcción no llevan a problemas mayores en la operación y producción de gas [21].

Figura 4.

Biodigestor modelo hindú

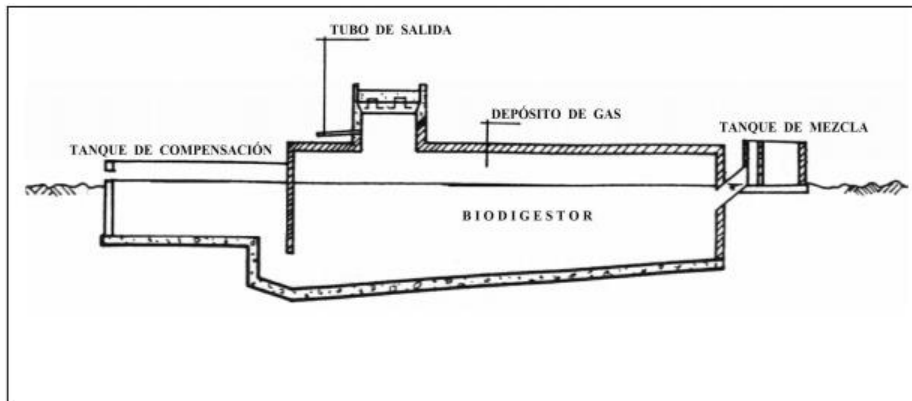


Nota. La figura esquematiza el biodigestor modelo hindú. Tomado de E. R. Razo Azhig y M. I. Villafuerte Lopez, «Diseño, construcción y pruebas de un biodigestor experimental para fines didácticos», p. 93, 2007, [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/306>.

2.6.2.c Modelo Horizontal. Se utiliza en la industria agropecuaria aprovechando los residuos de varios animales, como lo son los criaderos de cerdos y bovinos; algunas veces en pequeñas comunidades rurales para aprovechar los residuos orgánicos de estas. Este tipo de biodigestor se recomienda cuando se requiere trabajar con volúmenes mayores a 15 m³ por cuestiones de diseño ya que su excavación para la ubicación de este es tediosa, como se puede observar en la Figura 5. Una de las principales ventajas de este biodigestor horizontal, es su valor, ya que es 50% más económico que el modelo chino o de cúpula fija, pero su desventaja es que la vida útil es de aproximadamente 5 años [22].

Figura 5.

Biodigestor modelo horizontal



Nota. La figura esquematiza el biodigestor modelo hindú. Tomado de E. R. Razo Azhig y M. I. Villafuerte Lopez, «Diseño, construcción y pruebas de un biodigestor experimental para fines didácticos», p. 93, 2007, [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/306>.

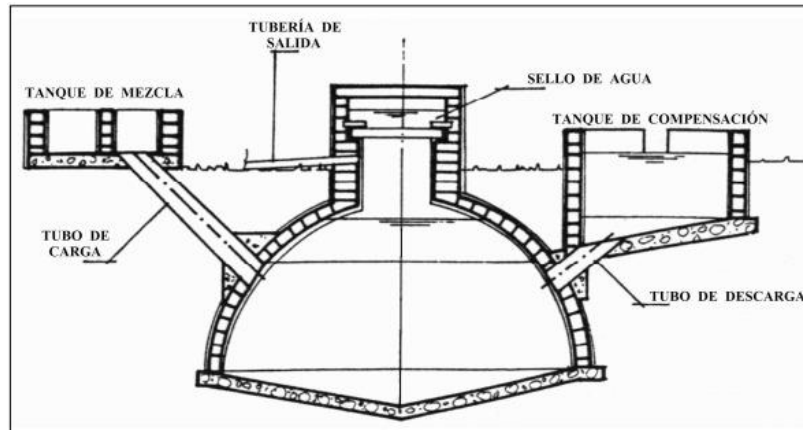
2.6.2.d Modelo Chino. Este modelo también es conocido como biodigestor de cúpula fija, debido a que es un biodigestor cerrado con cámara de gas inmóvil y fija, el gas es almacenado en su parte superior [19]. Este es construido bajo tierra con ladrillos y concreto, y no posee con un gasómetro, por ende el gas se almacena en el interior del sistema, aumentando la presión progresivamente, forzando al biofertilizante salir por el otro extremo [23], como consecuencia de lo anterior el digestor chino es eficiente para la producción de bioabono, y se esquematiza en la Figura 6.

Entre sus ventajas podemos decir que es de bajo costo de construcción, no posee partes metálicas que se puedan oxidar y, por lo tanto, tiene una larga vida útil (20 años o más) como es una construcción subterránea, está ahorra espacio y se protege de cambios de temperatura.

Entre sus desventajas está la dificultad para lograr hermeticidad; como su construcción se realiza con ladrillos y cemento, la porosidad se debe evitar con todos los medios posibles, donde con una pequeña fractura puede causar altas pérdidas de biogás [19].

Figura 6.

Biodigestor modelo chino



Nota. La figura esquematiza el biodigestor modelo hindú. Tomado de E. R. Razo Azhig y M. I. Villafuerte Lopez, «Diseño, construcción y pruebas de un biodigestor experimental para fines didácticos», p. 93, 2007, [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/306>

Este biodigestor se divide en tres partes principales la primera es el tanque de digestión, este es el que define la denominación del biodigestor, el cual está compuesto por dos elementos, el primero es una cámara de fermentación donde se descompone la materia orgánica en un determinado tiempo, llamado tiempo de retención, ocurriendo la degradación y liberación del biogás; como segundo elemento se encuentra la cúpula donde se almacena el gas producido continuamente mientras este es consumido. [24]

La segunda parte es el tanque de mezcla, en este se realiza la mezcla del agua y la materia orgánica en las proporciones establecidas, su volumen debe ser mayor a la cantidad de mezcla diaria que se debe alimentar al biodigestor, este es el ducto por el cual va a ser alimentado el biodigestor por medio de un tubo de PVC ubicado en la parte inferior de este tanque.

Finalmente, la última parte que compone este biodigestor, es el tanque de compensación, en él se acumula la materia orgánica ya fermentada, su volumen es equivalente al volumen de gas contenido en la cúpula del tanque de digestión, debido a que su descarga se efectúa por la presión generada por el gas producido.

2.7 Matriz PUGH

«La matriz de Pugh o método de matriz-decisión es una técnica cuantitativa utilizada para clasificar las opciones multidimensionales de un conjunto de alternativas. Es frecuentemente usada en ingeniería para la toma de decisiones. Una matriz de Pugh consiste en el establecimiento de un conjunto de criterios sobre los cuales se descomponen las opciones potenciales, se ponderan y suman para obtener el score total» [25].

3. METODOLOGÍA

3.1 Características fisicoquímicas de la gallinaza

Con el fin de realizar una digestión anaerobia se deben tener en cuenta diferentes características de la materia prima que son de vital importancia para la producción de biogás, estas deben estar dentro de los datos óptimos presentados en el apartado 2.5, para la realización de la digestión anaerobia, teniendo en cuenta que este proyecto es netamente teórico los datos obtenidos son adquiridos específicamente de revisiones bibliográficas que brinden dicha información.

La gallinaza producida en la finca “La Victoria” es específicamente de gallinaza de piso, por ende, se realizó una búsqueda bibliográfica de artículos, tesis o libros que brinden estas características propiamente de este tipo de gallinaza, una vez se encontró la información requerida, se consideró realizar un promedio en cada una de las características otorgadas en las tablas brindadas por la bibliografía, con el fin de tener un acercamiento a esta materia prima, finalmente, se obtuvo una tabla de resultados que permite establecer si esta materia orgánica es adecuada para realizar la digestión anaerobia o a que proceso se debe someter para mejorar sus características.

Una vez obtenidas las características fisicoquímicas de la gallinaza de piso, se decidió realizar un balance de materia, sobre la cama de las gallinas, en el cual entrara la gallinaza (excremento de las gallinas), pajilla de arroz y aserrín, en unas cantidades exactas para 7.500 gallinas, con el objetivo de saber la relación C/N, entre estos tres compuestos, ya que es de vital importancia para la digestión anaerobia.

Según la FAO, en el artículo “Gestión de residuos de aves de corral en los países en desarrollo”, Ch. M. Charles, las gallinas ponedoras producen una cantidad de 120 kg de heces excretadas por cada 1.000 gallinas, o sea 120 gramos de heces diarias por cada gallina ponedora [4].

Para la cama inicial, en la finca “La Victoria”, se utilizan 1.000 bultos de pajilla de arroz y 4.000 bultos de aserrín, esto y con anteriormente mencionado de las heces fecales, componen la cama de las gallinas ponedoras, que durara 24 meses. En los que los 6 primeros meses ocurrirá la etapa de crecimiento del animal, y finalizado este periodo. Iniciará la postura del huevo, que durará 18 meses, el cálculo para saber la cantidad de heces excretada por cada gallina, se contara desde que inicie el momento de su postura, ya que en la etapa de crecimiento su cantidad no es significativa.

3.2 Características de los biodigestores

Una vez establecidos los tipos de biodigestores rurales más comunes, se procede a seleccionar el tipo de biodigestor adecuado para realizar el diseño, esto se realizó por medio de una matriz PUGH donde se tendrán en cuenta algunos criterios y se les asignara una ponderación sobre 100%, teniendo en cuenta las prioridades y necesidades de la finca.

Para realizar la matriz PUGH, primero se debe tener en cuenta los principales factores que determinarán el tipo de biodigestor para la producción de biogás partiendo de gallinaza, los cuales se dividen en costos, facilidad de construcción, caudal, producción de biogás y vida útil. Para realizar la ponderación, inicialmente se asignaron los porcentajes a cada factor teniendo en cuenta su grado de importancia con el fin de que todos sumen el 100%, cada tipo de biodigestor tendrá un puntaje dentro de cada factor, el cual va desde 1 el más bajo y menos favorable, hasta el 5, el cual es el más alto y más favorable, finalmente se multiplicará cada punto por el porcentaje del factor correspondiente y se sumarán, el tipo de biodigestor con mayor puntaje será el seleccionado para el diseño.

3.2.1 Caudal

Para realizar la comparación de los biodigestores en este factor, se debe calcular el volumen de digestión donde inicialmente se calcula el volumen de carga diaria suministrado al biodigestor, pero la gallinaza debe ser mezclada con agua con el fin de reducir su porcentaje de sólidos totales, donde se calcula mediante la Ecuación 1 otorgada por la FAO. [14]

Ecuación 1.

Porcentaje de sólidos totales

$$\%S. T. = \frac{1 \text{ kg excreta} * \%S. T \text{ excreta fresca}}{1 \text{ kg excreta fresca} + W_A}$$

Donde:

% S.T = Porcentaje de sólidos totales de la carga diluida.

W_A = Cantidad de agua a agregar por kg de excreta fresca (L/kg de excreta fresca).

Una vez calculada el agua que se requiere, se procede a multiplicar el resultado con la cantidad de materia prima que se suministra al biodigestor diariamente, para finalmente calcular el volumen de digestión mediante la Ecuación 2 otorgada por la FAO. [14]

Ecuación 2.

$$V_D = V_{CD} * TRH$$

Donde:

V_D = Volumen de digestión (m^3).

V_{CD} = Volumen de la carga diaria ($m^3/día$).

TRH = Tiempo de retención hidráulico (días).

3.3 Variables del proceso

Ya obtenidas las características fisicoquímicas de la gallinaza se procede a realizar una comparación con los factores determinantes de la digestión anaerobia ubicado en el apartado 2.5 donde se establecen los datos óptimos de la materia orgánica para realizar la digestión.

3.3.1 Temperatura

Para establecer la temperatura ambiente se realiza una búsqueda bibliográfica que brinde una estación meteorológica para establecer el comportamiento de esta variable en el municipio de Chipatá en Santander, y finalmente indicar la temperatura de operación del biodigestor.

3.3.2 TRH

El tiempo de retención hidráulico va directamente relacionado con la temperatura, por ello se realiza una búsqueda bibliográfica donde se realice una metodología empírica dando como resultado el tiempo de retención en diferentes temperaturas teniendo en cuenta que la materia prima

es gallinaza de piso, para así posteriormente realizar la interpolación con la temperatura de operación del biodigestor y obtener el tiempo de retención hidráulico.

Finalmente, para el pH, sólidos totales y relación C/N, se realizó la comparación de estas variables de la gallinaza frente a los factores determinantes de la digestión anaerobia, dando lugar a que estos se encuentren dentro de los datos óptimos, presentados en el apartado 2.5.

3.4 Dimensiones del biodigestor

Para el diseño del biodigestor modelo chino previamente seleccionado por medio de la matriz PUGH, se realizó una búsqueda bibliográfica, sobre diseño, dimensiones, construcción, y proyectos sobre biodigestores, en especial, el modelo chino. Se seleccionó el libro “Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas”, J. Guardado Chacón. [26]

Este libro brinda las ecuaciones para el cálculo de sus dimensiones, de las tres partes fundamentales del biodigestor, el tanque de mezcla, tanque de digestión y tanque de compensación. Partiendo del volumen de alimentación diaria y volumen del biodigestor.

3.4.1 Tanque de Mezcla

Según J. Hernández López, para el cálculo del volumen del tanque de mezcla se toma un sobredimensionamiento del 15%, esto para tener un margen de seguridad a la hora de realizar el mezclado, como se muestra en la Ecuación 3. [27]

Ecuación 3.

Volumen del tanque de mezcla.

$$V_{TM} = 0,15 * V_{PC} + V_{PC}$$

Donde:

V_{TM} = Volumen del tanque de mezcla.

V_{PC} = Volumen de la primera carga de alimentación

3.4.2 Tanque de Digestión

Para las dimensiones del tanque de digestión se utilizará el volumen de digestión (V_D) previamente calculado, este servirá para calcular el volumen de biodigestor (V_B), según R. Chávez Cahahuanca, sugiere que el volumen de un biodigestor tiene que ser este, más un tercio del mismo, ya que se establece que el volumen gaseoso es un tercio del volumen líquido, en base a esto la ecuación es la siguiente. [28]

Ecuación 4.

Volumen del biodigestor.

$$V_B = V_D + \frac{1}{3} * V_D$$

Donde:

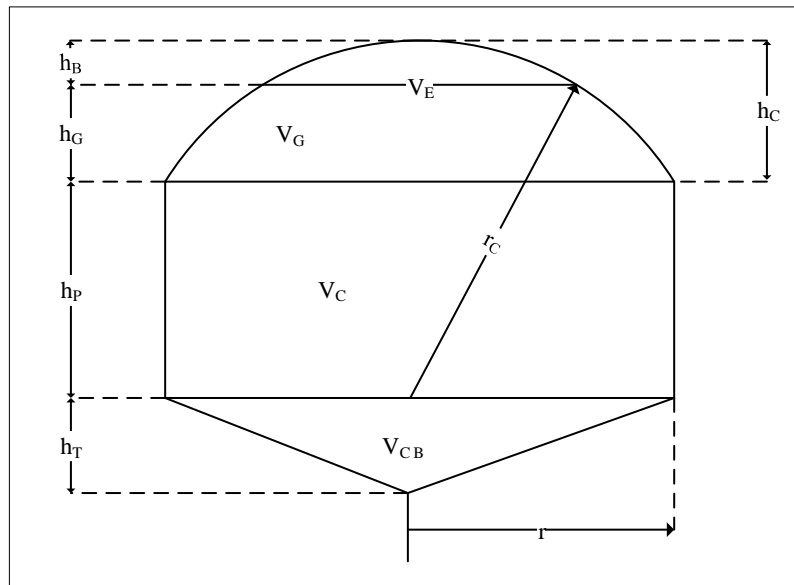
V_B = Volumen del biodigestor (m^3).

V_D = Volumen de digestión (m^3).

En base a esto, J. Guardado Chacón, propone las siguientes ecuaciones para las dimensiones del tanque de digestión, las cuales se podrán observar en la Figura 7.

Figura 7.

Partes del tanque de digestión



Nota. En la figura se esquematiza las partes del tanque de digestión del biodigestor modelo chino. Elaboración propia.

Donde:

r = Radio del volumen predefinido (m).

r_C = Radio de la cúpula (m).

h_C = Altura de la cúpula (m).

h_B = Altura del borde libre (m)

h_G = Altura del gas (m).

h_P = Altura de la pared (m).

h_T = Altura del cono base (m).

V_C = Volumen del cilindro (m^3).

V_E = Volumen del segmento esférico (m^3).

V_G = Volumen de gas (m^3).

V_{CB} = Volumen del cono base (m^3).

Primero, se realiza el cálculo del radio del volumen predefinido (r), esta Ecuación 5 cuenta con una constante experimental de 1,121 la cual permite relacionar el radio básico con el volumen del biodigestor [26].

Ecuación 5.

Radio del volumen predefinido.

$$r = \sqrt[3]{\frac{V_B}{\pi * 1,121}}$$

Donde:

r = Radio del volumen predefinido (m).

V_B = Volumen de biodigestor (m^3).

Seguido de esto se calcula la unidad proporcional (U) Ecuación 6, que depende radio previamente calculado y sirve como una proporción para calcular las dimensiones posteriores [26].

Ecuación 6.

Unidad proporcional.

$$U = \frac{r}{4}$$

Donde:

U = Unidad proporcional (m).

r = Radio del volumen predefinido (m).

A continuación, se calcularán las proporciones del tanque digestión, entre estas proporciones están las alturas y diámetro del biodigestor, se calculan mediante las siguientes ecuaciones, teniendo en cuenta la unidad proporcional previamente calculada.

3.4.2.a Radio de la cúpula (r_C)

Ecuación 7.

$$r_C = 5 * U$$

Donde:

U = Unidad proporcional (m).

3.4.2.b Diámetro del cilindro (D)

Ecuación 8.

$$D = 8 * U$$

Donde:

D = Diámetro del cilindro (m).

U = Unidad proporcional (m).

2.4.2.c Altura de la cúpula (h_C)

Ecuación 9.

$$h_C = 2 * U$$

Donde:

h_C = Altura de la cúpula (m).

U = Unidad proporcional (m).

2.4.2.d Altura de la pared (h_p)

Ecuación 10.

$$h_p = 3 * U$$

Donde:

h_p = Altura de la pared (m).

U = Unidad proporcional (m).

2.4.2.e Altura del cono base (h_T)

Ecuación 11.

$$h_T = 0,15 * D$$

Donde:

h_T = Altura del cono base (m).

U = Unidad proporcional (m).

Como se dijo anteriormente este biodigestor cuenta con tres partes fundamentales, a continuación, se hará el respectivo cálculo del volumen de cada una de estas.

3.4.2.f Volumen del cilindro (V_C)

Ecuación 12

$$V_C = r^2 * h_p * \pi$$

Donde:

$V_C =$ Volumen del cilindro (m^3).

$h_P =$ Altura de la pared (m).

$r =$ Radio del volumen predefinido (m).

3.4.2.g Volumen del cono base (V_{CB})

Ecuación 13.

$$V_{CB} = r * \pi * \frac{h_T}{3}$$

Donde:

$V_{CB} =$ Volumen del cono base (m^3).

$h_T =$ Altura del cono base (m).

$r =$ Radio del volumen predefinido (m).

3.4.2.h Volumen del segmento esférico (V_E)

Ecuación 14.

$$V_E = \frac{\pi * h_C}{6} * (3 * r^2 + h_C^2)$$

Donde:

$V_E =$ Volumen del segmento esférico (m^3).

$h_C =$ Altura de la cúpula (m).

$r =$ Radio del volumen predefinido (m).

A continuación se calculara el volumen de gas (V_G), que está dentro del volumen del segmento esférico, en este volumen se considera que existe un borde libre que oscila entre 0,2 – 0,25 m [29], donde no existirá biogás, por ello se debe calcular el volumen real que ocupará el biogás producido mediante la Ecuación 15 [30].

Ecuación 15.

Volumen de gas

$$V_G = \frac{\pi * h_G}{6} * (3a^2 + 3b^2 + h_G^2)$$

Donde h_G , es la altura de gas, y depende del radio de cúpula (r_C) y (h_B) el cual es el valor seleccionado del borde libre, mencionada anteriormente.

$$h_G = \frac{2 * r_C}{5} - h_B$$

$$h_B = 0,25 \text{ m}$$

Las constantes experimentales a y b, dependen del radio del volumen predefinido (r) y se calculan a continuación.

$$a = \frac{4 * r}{5}$$

$$b = \frac{r}{2}$$

3.4.3 Tanque de Compensación

El volumen del tanque de compensación (V_{TC}) es igual al volumen de biogás (V_G) producido en el tanque de digestión, ya que al generarse el biogás se ejerce una presión, la cual hace que los residuos producidos por la digestión anaerobia entre la mezcla de gallinaza y agua, se arrastren hasta el tanque de compensación por dicha presión.

Para las dimensiones del tanque de compensación, su radio será el mismo que el radio del cilindro de digestión (r) [27], y su altura se calculara con la Ecuación 16.

La cual sirve para hallar el volumen de un cilindro, y a esta se le sumara un margen de seguridad de 0,20 m de altura, sugerido por J. Hernández López. [27]

Ecuación 16.

Altura del tanque de compensación.

$$h_{TC} = \frac{V_{TC}}{\pi * r^2} + 0,20 \text{ m}$$

Donde:

V_{TC} = Volumen del tanque de compensación (m³).

h_{TC} = Altura del tanque de compensación (m).

r = Radio del volumen predefinido (m).

En base a las dimensiones previamente calculadas para el tanque de compensación, se calculó la presión que necesita la mezcla en el tanque de digestión para que esta sea llevada hasta el tanque de compensación, este cálculo se realiza por medio de la Ecuación 17, que la ecuación de Bernoulli.

Ecuación 17.

Ecuación de Bernoulli.

$$P_1 + \frac{1}{2} * \rho * v_1^2 + \rho * g * h_1 = P_2 + \frac{1}{2} * \rho * v_2^2 + \rho * g * h_2$$

Donde:

P = Presión (Pa).

ρ = Densidad (kg/m³).

g = Gravedad (m/s^2).

h = Altura (m).

v = Velocidad (m/s).

3.5 Tubería y accesorios

3.5.1 Tubería de carga y descarga

Para realizar el diseño de estas tuberías, inicialmente su material, diámetro y ángulo de conexión se estableció teniendo en cuenta a H. Morales y C. Bonifaz, [31]. Donde ellos realizan un diseño de un biodigestor tipo cúpula fija para generar biogás a partir de desechos orgánicos; para establecer la longitud de estas tuberías, se indicaron las alturas a las que las conexiones de las tuberías se deben encontrar en los tanques, y así finalmente calcular mediante el teorema de Pitágoras la longitud de estas tuberías se calculara por medio de la Ecuación 18.

Ecuación 18.

$$\text{Sen } \alpha = \frac{Co}{H}$$

Donde:

α = Angulo ($^{\circ}$).

Co = Cateto opuesto (m).

H = Hipotenusa (m).

3.5.2 Tubería de biogás

Inicialmente se buscó bibliográficamente un método por el cual se pueda seleccionar el diámetro de la tubería, donde su diámetro sea dependiente del flujo de biogás conducido por esta tubería, por esto se calculó un volumen aproximado de biogás producido en el biodigestor teniendo en cuenta la cantidad de excreta diaria y la producción específica de biogás de la gallinaza, esto se cumple por medio de la Ecuación 19 otorgado por J. Hernández López. [27]

Ecuación 19.

Volumen de biogás producido.

$$V_{BG} = C_{EF} * \lambda$$

Donde:

V_{BG} = Volumen de biogás (m^3)

C_{EF} = Cantidad de excreta fresca diaria (kg/día).

λ = Producción específica de biogás (m^3/kg).

Ya obtenido el volumen de biogás producido por día se puede hallar el flujo de biogás, que por medio de una tabla tomada de “German Agency for Technical Cooperation”, se puede seleccionar el diámetro adecuado para esta tubería.

3.5.3 Accesorios

Por medio de búsquedas bibliográficas donde se hayan realizado diseños de cúpula fija más conocido como modelo chino, se puede establecer que tipos de accesorios son los necesarios para completar el diseño del biodigestor y mejorar su funcionamiento donde entre estos se involucran válvulas y trampas de compuestos en el biogás.

3.5.3.a Trampa de ácido sulfhídrico. Este accesorio es importante para retirar el ácido que contiene el biogás, en este se utilizan virutas de hierro para su adsorción y es necesario calcular la cantidad de viruta de hierro que se requiere para eliminar el ácido del biogás, para dar cumplimiento a esto se buscó bibliográficamente documentos donde hayan producido biogás partiendo de gallinaza de piso con el fin de conocer la cantidad de ácido sulfhídrico contenido en el biogás, a partir de esto y con ayuda de la reacción producida por esta adsorción se pudo realizar la estequiometría.

3.6 Costos

Se realizó una búsqueda bibliográfica de los materiales, tuberías y accesorios necesarios para la construcción del biodigestor, teniendo en cuenta las dimensiones y medidas ya calculadas.

4. RESULTADOS

4.1 Características fisicoquímicas de la gallinaza

Se tuvieron en cuenta cuatro diferentes referentes teóricos, que brindan las tablas correspondientes a las características fisicoquímicas específicamente de la gallinaza de piso, en los cuatro referentes se realizaron pruebas experimentales para obtener los resultados mostrados en el Anexo 1, estos al ser comparados se observa que sus datos oscilan por el mismo rango, por esto se realiza un promedio entre las tablas con cada característica.

Tabla 1.

Características físicas y químicas de la gallinaza.

Parámetros	pH	Sólidos Totales %	Relación C/N	Humedad %	N%	P%	K%	C%
[32]	6,38	93,12	11,48	26,08	3,37	4,94	2,89	38,7
[2]	8	-	12,1	34,8	2,02	3,6	0,89	24,4
[33]	6,38	93,12	11,48	26,08	3,37	4,94	2,89	38,7
[34]	7,29	-	12,1	34,8	2,02	3,6	0,89	24,4
Promedio	7,01	93,12	11,79	30,44	2,70	4,27	1,89	31,5

Nota. La tabla muestra las características físicas y químicas de la gallina, teniendo en cuenta diferentes referentes bibliográficos.

En la Tabla 1 se obtuvo el resultado del acercamiento a las características fisicoquímicas de la gallinaza, estas se comparan con los factores determinantes de la digestión anaerobia, explicados en el apartado 1.5, donde inicialmente se establece que el pH se encuentre cercano a la neutralidad, los sólidos totales se encuentren en el rango de 8% - 10%, la relación C/N se encuentre entre 20:1 a 30:1 y finalmente la humedad entre el 80% - 90%; gracias a estos datos otorgados por varias referencias bibliográficas, se establece que la materia prima reciba un pretratamiento para mejorar el porcentaje de los sólidos totales, la relación de C/N y el porcentaje de humedad.

En la finca “La Victoria” la gallinaza está compuesta de excreta de gallina, aserrín y paja de arroz, conocida como “cama”, el cual se le agregan esto puede llegar a afectar algunas características fisicoquímicas, como en este caso la relación C/N, por ello se procede a realizar un balance de masa en base seca teniendo en cuenta la composición de carbono y nitrógeno de cada materia

prima, con su respectiva cantidad, esto con el fin de conocer una aproximación a la verdadera relación de la gallinaza.

La FAO realizó una tabla donde involucra diferentes residuos de origen vegetal con rangos de composición de varios nutrientes, entre estos se encuentran los de interés como lo son el nitrógeno y el carbono, así mismo también se encuentran los dos residuos utilizados por la finca para la cama de la gallinaza, en la Tabla 2 se podrá observar parte de la tabla realizada por la FAO con los componentes de interés [14].

Tabla 2

Composición de carbono y nitrógeno en residuos de origen vegetal.

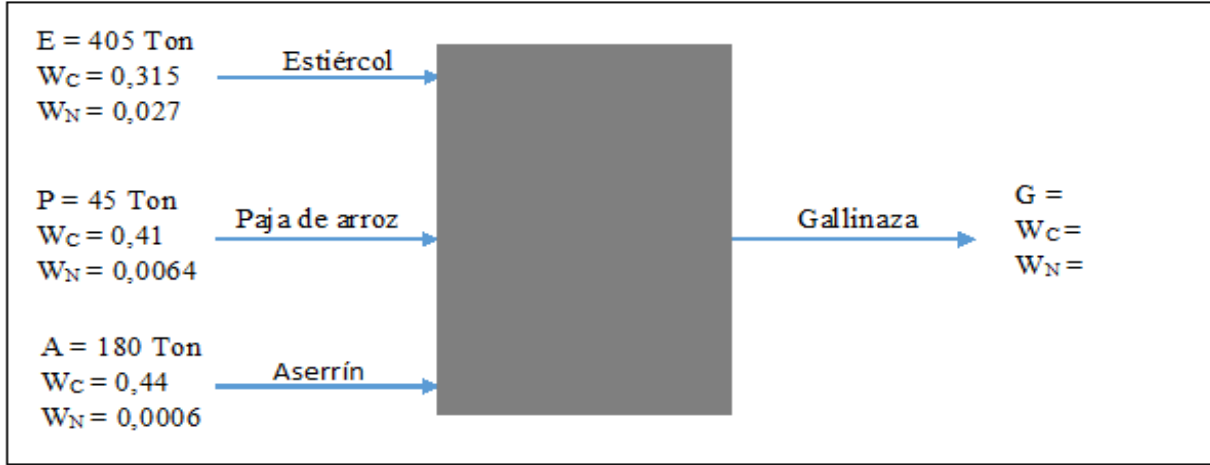
Materia prima	% Nitrógeno	% Carbono
Paja de arroz	0,64	41
Aserrín	0,06	44

Nota. La tabla muestra la composición del nitrógeno y el carbono, para la paja de arroz y el aserrín. Tomado de FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF, *Manual del Biogás*. 2011.

Para dar un mejor entendimiento del balance se puede observar la Figura 8, donde se involucran tres corrientes de entrada, cada una compuesta por la materia prima de la cama de gallinaza, y una corriente de salida que corresponde a la gallinaza utilizada para la producción de biogás.

Figura 8.

Esquema general del balance de masa.



Nota. En la figura se puede observar un esquema general del balance de masa donde se define la proporción y la cantidad de cada corriente conocida. Elaboración propia.

Balance de masa

$$E + P + A = G$$

$$\text{Carbono} = W_C^E * E + W_C^P * P + W_C^A * A = W_C^G * G$$

$$\text{Nitrogeno} = W_N^E * E + W_N^P * P + W_N^A * A = W_N^G * G$$

Utilizando las ecuaciones mostradas anteriormente, se obtuvieron los siguientes resultados

$$G = 630 \text{ Ton}$$

$$W_C^G = 0,3578$$

$$W_N^G = 0,0179$$

Donde obteniendo la composición de carbono y nitrógeno de la cama de gallinaza se halla la relación de C/N el cual es de 19,98:1

4.2 Matriz Pugh

Como se nombró anteriormente, a continuación, se especificarán los 5 principales factores escogidos para la selección del biodigestor, en los que se especificara el puntaje dado en cada biodigestor.

4.2.1 Costos (30%)

Los costos en cualquier diseño o construcción son uno de los factores más importantes, en este proyecto se busca un equilibrio entre el costo y la eficiencia del biodigestor, por esta razón se consideró este criterio el más importante para la seleccionar el tipo de biodigestor que se diseñara. Debido a que este proyecto es teórico, no se cuenta con una inversión establecida para el diseño del biodigestor, sin embargo, se busca poder optimizar los costos y seleccionar la mejor opción, donde se debe tener en cuenta el tipo de material del biodigestor, el tamaño para la instalación, los equipos e instrumentos para su funcionamiento entre otras características importantes.

4.2.1.a Chino (3). Debido a que los materiales con los que se construye son rígidos, como los tanques de plástico, concreto, hormigón, ladrillos, etc. Así mismo pinturas sintéticas para evitar fugas de biogás. Todo esto requiere de un arduo trabajo y supervisión para la construcción de este tipo de biodigestor, por esto se le otorga esta ponderación ya que dichos factores elevan los costos.

4.2.1.b Hindú (1). Este biodigestor tiene las misma características frente a los materiales que el Chino, pero se le añade una campana flotante de gas la cual tiene “un alto costo de construcción ya que el material de la campana está sujeta a corrosión y esto eleva los costos de mantenimiento” [29].

4.2.1.c Tubular o Taiwanés (5). Este modelo es uno de los más económicos para su fabricación, donde este tiene una facilidad en su instalación, operación y mantenimiento haciendo que se generen bajos costos, además este a diferencia de los demás biodigestores depende solamente de una membrana donde puede ser de diferentes materiales y esto aumenta o disminuye su costo.

4.2.1.d Horizontal (4). Finalmente, este modelo tiene varias formas de diseño, donde pueden ser de forma cuadrada, rectangular o forma “V”, cada uno de estos se puede construir con diferentes materiales y tamaños variando sus costos. De acuerdo a una fuente “una de sus principales ventajas

es que su costo es 50% más económico que el modelo chino, pero su vida útil es de tan solo 5 años, en promedio” [22].

4.2.2 *Facilidad de construcción (20%)*

La finca “La Victoria” cuenta con un terreno de 60.000 m² con una disponibilidad de construcción de 1.000 m², con respecto al espacio de construcción este es muy amplio por ende no será un problema para la elaboración del biodigestor, sin embargo, cada biodigestor tiene una complejidad diferente en su forma de construcción, que va arraigado con los costos que este genere. Por esta razón se da una ponderación un poco menor al valor porcentual de los costos.

4.2.2.a Chino (4). Se le otorga este puntaje, ya que para su construcción requiere de una excavación en la tierra para su posicionamiento.

4.2.2.b Hindú (2). Al igual que el biodigestor chino, este requiere de una excavación en la tierra para su posicionamiento, y adicionalmente este cuenta con una campana flotante de gas y un gasómetro para la medición de este.

4.2.2.c Tubular o Taiwanés (5). Este a diferencia del resto presenta una mayor facilidad para su construcción, ya que está hecho de un plástico inflable, y una de sus ventajas es que este diseño combina la cámara de digestión, el tanque de sedimentación y el gasómetro en una sola unidad [22].

4.2.2.d Horizontal (3). Para este prototipo se le asigna esta puntuación debido a que por su gran tamaño se requiere de una mayor excavación para su construcción, dificultando su instalación.

4.2.3 *Caudal (25%)*

Este es uno de los factores más importantes en el proceso de selección, ya que, para decidir el tipo de biodigestor, se necesita saber con qué cantidad de materia prima se cuenta, en este caso se dispone de 101 toneladas de gallinaza cada 18 meses, lo cual es un 25% de la gallinaza total producida en la finca, ósea 203 kilogramos/día. Este tiene un alto valor porcentual frente al resto de aspectos ya que no todos los biodigestores tienen la misma capacidad de almacenamiento afectado el caudal de alimentación, por ende, es de vital importancia la selección de este.

Para establecer el volumen de carga diaria, inicialmente, se debe conocer que cantidad de agua se necesita para diluir la materia orgánica, para dar cumplimiento a esto, esta se calcula mediante la Ecuación 1 [14], en donde el %S.T de excreta fresca corresponde a 0,9312 el cual proviene de la Tabla 1 y el %S.T de carga diluida corresponde a 0,1 [14]; el cual es el valor al que queremos llegar para que la gallinaza este dentro de los datos óptimos para la digestión anaerobia.

Como resultado del agua que se debe utilizar para diluir la materia orgánica, en base a la Ecuación 1 dio un resultado de 8,312 L de agua por cada kilogramo de materia orgánica, a continuación, a esto, se multiplica el resultado por la cantidad de kg diarios de materia orgánica, para saber cuántos litros de agua se necesitan para diluir esta cantidad.

$$8,312 \frac{\text{L}}{\text{kg}} \text{ excreta fresca} * 203 \text{ kg excreta fresca} = 1.686 \text{ L agua}$$

Para saber la cantidad de mezcla diaria que tendrá el biodigestor, se realiza la suma del agua previamente calculada y la cantidad diaria de excreta fresca, el biodigestor tendrá una carga de 1,889 m³/día de la mezcla entre agua y excreta fresca.

$$1.686 \text{ L agua} + 203 \frac{\text{kg de excreta fresca}}{\text{día}} = 1.889 \text{ L} \frac{\text{L}}{\text{día}} = 1,889 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

El volumen de digestión del biodigestor se calcula mediante la Ecuación 2 [14], en donde relaciona el volumen de carga diaria y tiempo de retención hidráulico, el cual depende de la temperatura de ubicación previamente descrita (22°C), este se calcula mediante la Tabla 3 , donde se realizó una interpolación de la información brindada por I. Mullo. 2012, el cual a esta temperatura da un tiempo de retención de 31 días, aplicando la Ecuación 2, el volumen de digestión (V_D) daría un resultado de 58,56 m³.

Tabla 3.

Tiempo de retención hidráulico en base a la temperatura.

Temperatura (C°)	TRH (días)
35	17
30	20
25	25
18	35
15	55

Nota. La tabla brinda los datos del Tiempo de retención hidráulico en base a la temperatura. Tomado de G. I. Mullo, “Manejo y procesamiento de la gallinaza”, *Lasallista Investig.*, p. 79, 2012, [En línea]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/2114/1/17T1106.pdf>.

4.2.3.a Chino (5). Este tipo de biodigestor obtiene el mayor puntaje teniendo en cuenta que la escala doméstica este tipo puede llegar a tener un volumen entre 6 – 90 m³ [35] y el volumen que se requiere para el biodigestor se encuentra dentro de estos límites.

4.2.3.b Hindú (3). A diferencia del prototipo chino este biodigestor a escala doméstica puede llegar a tener un volumen un poco menor, el cual está entre 5-70 m³ [35], teniendo en cuenta que el biodigestor requiere 58,56 m³ este se encuentra dentro de los estándares de este tipo de biodigestor, sin embargo, se le establece esta ponderación debido a que a comparación del chino y el horizontal este brinda menor volumen.

4.2.3.c Tubular o Taiwanés (1). Este tipo de biodigestor a diferencia del resto, tiene un menor volumen de almacenamiento, que es de 5 – 20 m³ [35], donde su dimensionamiento es mucho menor al que se requiere, dejando este tipo de biodigestor como la última opción.

4.2.3.d Horizontal (4). Finalmente para este tipo de biodigestor, se recomienda manejar volúmenes superiores a 15 m^3 , pero no se establece cuánto es su volumen máximo, por esto no se le otorga el mayor puntaje [35].

4.2.4 Producción de biogás (15%)

Se le asigna este valor porcentual ya que es de importancia la cantidad de biogás producida por cada biodigestor seleccionado, sin embargo, no se establece que cantidad de biogás se necesita producir, debido a que el uso del biogás no se define. Los valores son diferentes para cada biodigestor.

4.2.4.a Chino (3). Este tipo de biodigestor presenta la más baja productividad volumétrica que el resto la cual oscila entre $0,2$ y $0,5 \text{ m}^3$ de biogás por m^3 de digestor al día [35].

4.2.4.b Hindú (3). Su productividad volumétrica está entre $0,3 - 0,6 \text{ m}^3$ de biogás por m^3 de biodigestor al día [36]. Este valor es ligeramente superior a la de los biodigestores de tipo Chino, lo cual se debe a la forma uniforme en que fluye la materia orgánica dentro del biodigestor.

4.2.4.c Tubular o Taiwanés (4). Su productividad volumétrica está entre $0,3 - 0,8 \text{ m}^3$, y es el segundo biodigestor que puede llegar a producir mayor cantidad de biogás [36].

4.2.4.d Horizontal (5). Su productividad volumétrica está entre $0,8 - 1,0 \text{ m}^3$ donde a comparación con los demás biodigestores es el que llega a producir mayor cantidad de biogás, por esto se le asigna este puntaje [18].

4.2.5 Vida útil (10%)

Este parámetro es importante para la selección del tipo de biodigestor debido a que existen biodigestores más resistentes que otros, sin embargo, en este proyecto, se le da un mínimo valor de importancia, teniendo en cuenta que la vida útil del biodigestor depende de los materiales utilizados para su construcción, esto estaría enlazado con los costos, por esto entre menor sea su costo su vida útil será menor.

4.2.5.a Chino (5). Debido a que este biodigestor es fijo y no tiene partes en movimiento ni partes donde se involucra la oxidación, su vida útil es larga, alrededor de 15 a 20 años [36].

4.2.5.b Hindú (4). Este a diferencia del chino tiene una campana adicional donde se almacena el biogás, principalmente esta campana está fabricada de materiales metálicos, causando oxidación en algunos años, sin embargo, el biodigestor debido a su estructura y materiales en su construcción tiene una vida útil de hasta 15 años, y la campana de 5 años [36].

4.2.5.c Tubular o Taiwanés (3). Este biodigestor está formado por una “bolsa que es considerada frágil, además de que es susceptible a daños mecánicos y debido a los cambios ambientales este tiene una vida útil entre 2-5 años aproximadamente” [36].

4.2.5.d Horizontal (2), La vida útil de este biodigestor es de aproximadamente 5 años [22].

Finalmente, se seleccionó el biodigestor tipo chino para el diseño debido a que tuvo el mayor puntaje como se puede ver en la Tabla 4, involucrando todos los factores que son de importancia para este proyecto. Este biodigestor se considera como el de mayor vida útil entre los demás y relativamente a un bajo costo, así mismo se requiere de excavaciones para su construcción, sin embargo, no es de mayor dificultad, llega a tener el volumen que se requiere en el biodigestor, y su producción de biogás puede llegar a ser baja a comparación de los demás biodigestores, pero produce una cantidad aceptable.

Tabla 4.

Matriz Pugh.

Factores	Biodigestores			
	Chino	Hindú	Tubular	Horizontal
Costos (30%)	3	1	5	4
Facilidad de construcción (20%)	4	2	5	3
Caudal (25%)	5	3	1	4
Producción de biogás (15%)	3	3	4	5
Vida útil (10%)	5	4	2	3
Total	3,9	2,3	3,5	3,8

Nota. La tabla muestra el puntaje establecido para cada factor de selección. Elaboración propia.

4.3 Variables del proceso

4.3.1 *Temperatura*

La temperatura a la que el biodigestor operará es de vital importancia ya que de esta dependen factores como los microorganismos presentes en la digestión anaerobia y el tiempo de retención hidráulico (TRH), en base a esto, y con ayuda de The Weather Channel y AccuWeather que contienen una estación meteorológica del municipio de Chipatá-Santander en el cual se establece que la temperatura ambiente oscila entre 12°C a 25°C [37], en los meses menos calientes; para la temporada de verano la temperatura que se reporta es de 18°C a 30°C [38], por ende la temperatura media presentada durante el año es de 22°C, cabe aclarar que en algunas temporadas del año esta temperatura va a ser mayor, sin embargo y teniendo en cuenta que esta temperatura se establece para calcular el tiempo de retención hidráulica, y el biodigestor al someterse a una mayor temperatura no afectara la producción de biogás, al contrario esta trabajara en un menor tiempo.

4.3.2 *TRH*

Este tiempo de retención hidráulico va directamente relacionado con la temperatura a la que opera el biodigestor, según bibliografía los rangos entre 18°C y 25°C corresponden a un tiempo de retención aproximado de 25 a 35 días [33] , se estableció que la temperatura de operación es de 22°C, por ende, se realizó una interpolación entre los datos mencionados anteriormente, con un resultado de aproximadamente 31 días de tiempo de retención hidráulico para la degradación de la materia orgánica, la especificación de cómo se halló este tiempo se encuentra en la Tabla 3 del apartado 4.2.3.

4.3.3 *pH*

Se recomienda tener un pH cercano a la neutralidad, para que la producción de biogás sea estable, y teniendo en cuenta la Tabla 1, donde por medio de diferentes referentes bibliográficos se realizó un promedio del pH al que se encuentra la gallinaza, dando como resultado un pH de 7,01 el cual este es óptimo para el proceso de digestión anaerobia de acuerdo a los factores determinantes explicados en el apartado 2.5.

4.3.4 Sólidos Totales

La Tabla 1 nos muestra que la gallinaza tiene 93,12% de sólidos totales, un valor muy alto para poder realizar la digestión anaerobia, el valor seleccionado para la cantidad de sólidos totales es del 10%, ya que es un valor intermedio entre los sugeridos por la FAO, al ser un bajo porcentaje este no afectará la movilidad de los microorganismos metanogénicos los cuales son los encargados de producir metano [14]. Para poder reducir este valor se requiere la adición de agua y el cálculo de la cantidad de agua que se requiere por cada kg de excreta se realiza por medio de la Ecuación 1 y se puede ver en el apartado 4.1.3, donde finalmente se requieren de 8,312 L/kg de excreta fresca.

4.3.5 Relación C/N

Esta relación es importante para el proceso de la digestión anaerobia debido a que estas son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas, para la materia orgánica se establece que la relación de C/N debe estar entre el rango de 20:1 a 30:1; teniendo en cuenta la Tabla 1, esta relación para la gallinaza está en una proporción de aproximadamente 12:1 por esto es necesario mezclar la excreta con un residuo rico en carbono y poder aumentar esta proporción.

La finca “La Victoria” no produce excreta de gallina pura, debido a que previamente se agrega una “cama” para las gallinas compuesta por aserrín y paja de arroz, el cual estos residuos contienen un alto contenido de carbono, por esto en el apartado 3.1 se realizó un balance de masa con el fin de conocer la verdadera relación C/N de la gallinaza dando como resultado un aproximado de 20:1, permitiendo estar dentro de los datos óptimos mencionados anteriormente.

4.4 Dimensiones del biodigestor

4.4.1 Tanque de mezcla

Debido a que la alimentación es semicontinua, y en este se realiza una digestión anaerobia, el volumen de la primera carga debe ser tal que este logre llenar el interior del biodigestor hasta cubrir la abertura del tubo que conecta con el tanque de compensación, garantizando la existencia de un sistema anaerobio dentro del biodigestor [39], así mismo el volumen de este tanque debe ser un mayor que el volumen de carga, el cual corresponde al volumen de alimentación diaria al

biodigestor, este volumen aumenta entre 10 - 20% sugerido por J. Sánchez, A. Hernández [27]. En este tanque se realiza la mezcla de excreta con agua, por ende, mientras se realiza este proceso de mezclado, se requiere de una válvula de paso en el tubo de descarga.

Aplicando la Ecuación 3 el volumen de tanque de mezcla (V_T) es de $2,17 \text{ m}^3$.

4.4.2 Tanque de digestión

En la Tabla 5 se evidencian los resultados las ecuaciones aplicadas para las dimensiones del tanque de digestión, previamente explicadas.

Tabla 5.

Resultado de las dimensiones y volúmenes del tanque de digestión.

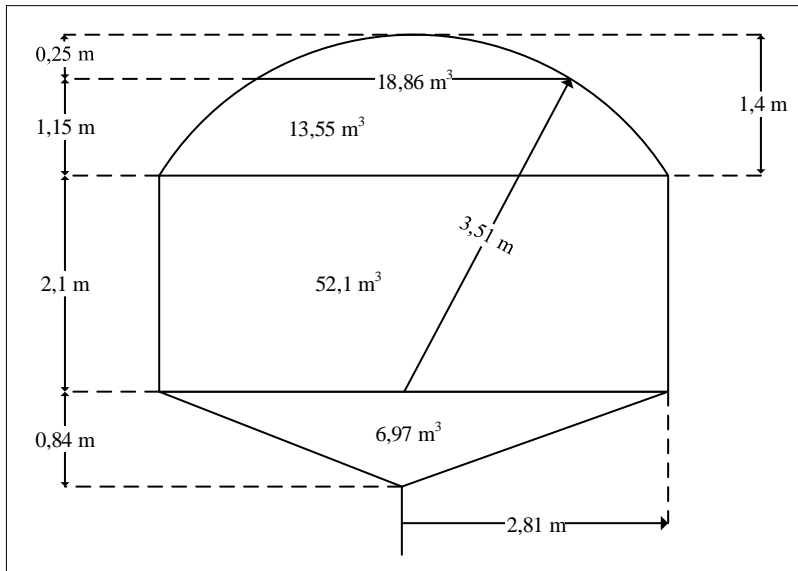
DIMENSIONES		
Radio del volumen predefinido (r)	2,81	m
Unidad proporcional (U)	0,7	m
Radio de la cúpula (r _C)	3,51	m
Diámetro del cilindro (D)	5,6	m
Altura de la cúpula (h _C)	1,4	m
Altura del gas (h _G)	1,15	m
Altura de la pared (h _P)	2,1	m
Altura del cono base (h _T)	0,84	m
VOLUMENES		
Volumen del cilindro (V_T)	52,1	m^3
Volumen del segmento esférico (V_T)	18,86	m^3
Volumen de gas (V_G)	13,55	m^3
Volumen del cono base (V_{CB})	6,97	m^3

Nota. La figura esquematiza las dimensiones del tanque de digestión. Elaboración propia.

En la Figura 9, se ilustra el tanque de digestión con sus respectivas medidas.

Figura 9.

Dimensiones del tanque de digestión.



Nota. La figura esquematiza las dimensiones del tanque de digestión.

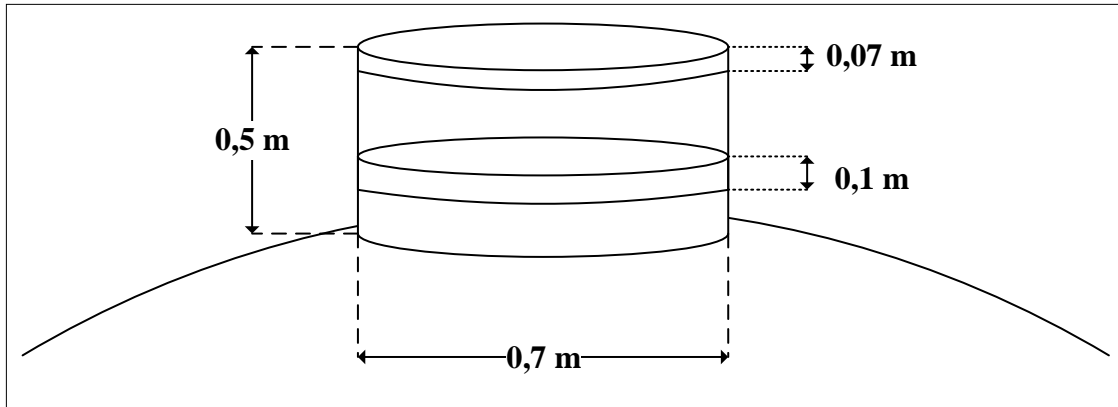
4.4.2.a Cuello. El cuello del biodigestor es un pequeño cilindro ubicado en la parte superior del tanque de digestión, como se puede apreciar en la Figura 10, su función principal es que la persona encargada del mantenimiento pueda entrar al biodigestor y de igual manera poder observar su interior, adicional a esto, se instala la tubería para la extracción del biogás.

Este consta de dos partes; en la primera se colocan los ladrillos, hasta alcanzar la altura a la que va colocada la primera tapa, que sirve como cierre hermético del biodigestor. A continuación, se mantiene el cuello con un muro que encintara hasta su extremo superior, donde va colocada otra tapa de protección.

Su ancho como mínimo debe tener 0,5 m de diámetro, su alto no deberá sobrepasar los 0,5 m; En cuanto a la primera y segunda tapa debe tener un grosor de 10 cm y 7 cm, respectivamente [26], para el ancho y alto del cuello de este diseño será de 0,7 m y 0,5 m respectivamente.

Figura 10.

Dimensiones del cuello.



Nota. La figura esquematiza las dimensiones del cuello en el tanque de digestión.
Elaboración propia.

4.4.3 Tanque de compensación

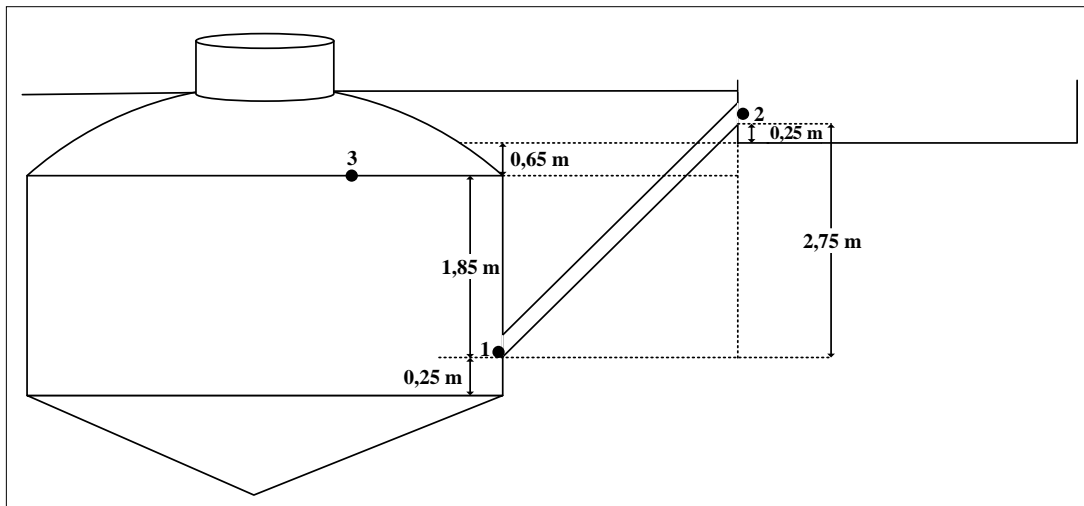
Aplicando la Ecuación 16 la altura del tanque de compensación (h_{TC}) es de 0,75 m, y su radio sería el mismo que el del tanque de mezcla, sugerido por J. Hernández López.

En base a la Ecuación 17 (Bernoulli), se calcula la presión en el punto 1,2 y 3. Ya que los tanques son muy anchos y el flujo es estacionario, las velocidades son 0, por ende, se cancelan. La densidad del biol es de 1.048 kg/m³ [40], la presión en Vélez Santander es de 101.800 Pa [41] y las alturas se especifican en la Figura 11, en donde también se pueden observar los 3 puntos para el cálculo.

La presión necesaria que necesita el biogás para desplazar la mezcla al tanque de compensación es de 111.052,79 Pa, la cual es la presión en el punto 3.

Figura 11.

Alturas para cálculo de presiones.



Nota. La figura esquematiza las alturas para el cálculo de presiones entre el tanque de digestión y el de compensación. Elaboración propia.

4.5 Tuberías y accesorios

4.5.1 Tubería de carga

Este es un tubo de PVC que comunica el tanque de mezcla con el tanque de biodigestión para su alimentación, tiene un diámetro que varía entre 4" y 6", el extremo que conecta con el biodigestor debe estar a una altura entre 40 y 60 cm con respecto al fondo de la altura de la pared (h_p), esto con el fin de evitar que el material sedimentado conocido como lodos lo obstruya, y el tubo debe estar ubicado con un ángulo de 45° [31].

La tubería tendrá un diámetro de 6", donde se tuvo en cuenta el caudal que se maneja y el tipo de fluido, que corresponde a la mezcla de agua y estiércol, obteniendo un fluido viscoso y con sólidos en suspensión; el primer extremo conectado al tanque de mezcla se encontrará a una altura de 30 cm con respecto al fondo del tanque, para así evitar el ingreso al biodigestor de materiales sedimentados como piedras; el segundo extremo conectado al biodigestor, se encontrará a una altura de 50 cm con respecto al fondo de la altura de la pared, para calcular la longitud de la tubería este se realizara por medio del Teorema de Pitágoras, teniendo en cuenta la Figura 12 y aplicando la Ecuación 18, como se mencionó anteriormente, dando como resultado una longitud de 4,6 m.

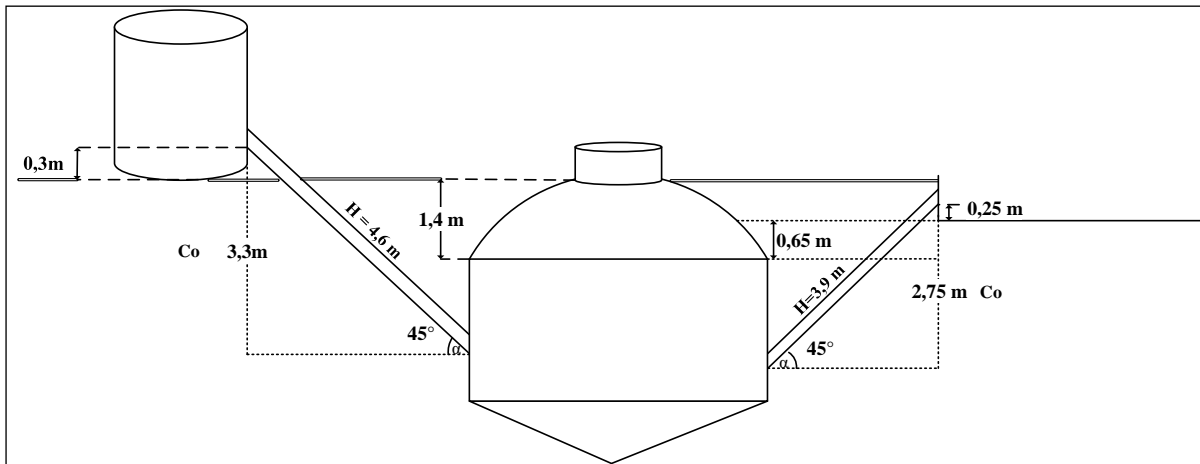
4.5.2 Tubería de descarga

La tubería de descarga se encargará de llevar la mezcla de gallinaza y agua ya fermentada al tanque de compensación, donde se recogerá posteriormente para su uso como fertilizante (biol). La tubería será de PVC ya que resistente a la corrosión, es fácil de instalar y económico, según bibliografía el diámetro sugerido para estos casos, está entre 4" y 6" [26], para este caso se escogerá el mayor diámetro.

La parte del tubo que está conectada al tanque de digestión, estará a 0,25 m, de donde inicia la altura de la pared (h_P), y la parte en donde se conecta con el tanque de compensación estará a 0,25 m de la altura de este (h_{TC}), finalmente la longitud del tubo será de 3,9 m, donde se calcula por medio de la Ecuación 18, y se puede evidenciar en la Figura 12.

Figura 12.

Dimensiones para el cálculo de tubería.



Nota. La figura esquematiza las dimensiones para el cálculo de la tubería. Elaboración propia.

4.5.3 Tubería de biogás

Para la extracción del biogás del biodigestor se utilizará una tubería de presión de PVC, donde su conexión estará desde el cuello del biodigestor hasta las pipetas para su almacenamiento y posterior uso o venta.

La producción de biogás producida por kilogramo de gallinaza es de 0,06 m³/kg de excreta fresca, según la bibliografía, en donde hacen un promedio de varias fuentes experimentales de este tipo de proceso [27].

Para especificar las dimensiones de la tubería es necesario saber qué cantidad aproximada de biogás (m³) vamos a producir, con la materia prima que agreguemos y el tiempo de retención indicado.

El volumen de biogás producido (V_{BG}) aplicando la Ecuación 19, es de 12,18 m³/ día, en base a este volumen, como se mencionó anteriormente se podrá seleccionar el diámetro de la tubería, mediante la Figura 13, la cual es una tabla tomada de “German Agency for Technical Cooperation” [42], donde relacionan el flujo de biogás con tuberías de acero, para obtener el diámetro y longitud de dicha tubería.

Para un flujo de 0,51 m³ / h, se requiere de un diámetro de media pulgada (1/2”), y la longitud de tubería necesaria para realizar la extracción de biogás es de 4 metros aproximadamente.

Figura 13.

Diámetro de tubería PVC y acero galvanizado.

Length [m]:	Galvanized steel pipe			PVC pipe		
	20	60	100	20	60	100
Flow-rate [m ³ /h]						
0.1	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"
0.2	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"
0.3	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"
0.4	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"	1/2"
0.5	1/2"	1/2"	3/4"	1/2"	1/2"	1/2"
1.0	3/4"	3/4"	3/4"	1/2"	3/4"	3/4"
1.5	3/4"	3/4"	1"	1/2"	3/4"	3/4"
2.0	3/4"	1"	1"	3/4"	3/4"	1"

Nota. La figura esquematiza los diámetros de las tuberías teniendo en cuenta el flujo de gas. Tomado de German Agency for Technical Cooperation (GTZ), “Biogas Digest”, vol. II, p. 81, 2007, [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/yg0h>.

4.5.4 Válvula para entrada de carga

La función principal de esta válvula es evitar el paso de la excreta directamente al tanque de digestión, mientras en el tanque se realiza la mezcla de materia orgánica con agua, y una vez se halla obteniendo una mezcla homogénea, esta ingrese al biodigestor, así mismo esta válvula en caso de reboso o escape de biogás evite la salida de estos.

La válvula de bola, es la seleccionada para controlar el paso de la mezcla, ya que este tipo de válvulas son ideales para líquidos viscosos y líquidos que contienen partículas sólidas o semisólidas [43].

4.5.5 Válvula para salida del biogás

Esta válvula tiene la función de permitir el paso del biogás en la salida del biodigestor, para su posterior almacenamiento, el cual es una válvula de bola que ira conectada a un manómetro, el cual servirá para visualizar la presión a la que se encuentra el biogás.

4.5.6 Trampa de agua

Debido a un cambio de temperatura que tiene el biogás al salir del biodigestor por la tubería, la cantidad de vapor de agua que tiene este biogás se condensa, por ende, la función de la trampa de agua es retirar dicha cantidad.

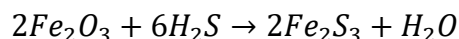
Para esto a lo largo de la tubería de extracción de biogás, se instalará un tubo PVC en forma de T, en donde en la parte vertical de este, tendrá una longitud aproximada de 0,15 m. En este tramo el agua se almacenara cuando se esté extrayendo el biogás, y se podrá retirar cuando la válvula de salida del biogás esté completamente cerrada [27].

4.5.7 Trampa de ácido sulfhídrico

Una vez producido el biogás, este sale con trazas de ácido sulfhídrico (H_2S), el cual es toxico y sumamente corrosivo en piezas metálicas afectando los equipos en los que se use el biogás, así mismo este al tener contacto con agua se transforma en ácido sulfúrico (H_2SO_4). Existen algunos métodos físico-químicos para eliminar este compuesto, entre estos se encuentran los filtros de

carbón activado y la adsorción utilizando virutas de hierro, en este caso se hará uso de las virutas de hierro debido a que el filtro de carbón activado reduce solo pequeñas cantidades de H₂S [44].

La trampa constituye en un recipiente hermético, donde se conecta la tubería de PVC para el paso del biogás, en su interior se encuentran las virutas de hierro que al contacto con el H₂S se produce una reacción descomponiéndose en sulfuro férrico (FeS) sustancia que no es perjudicial, a continuación se observa la reacción producida [45].



Los cálculos de la estequiometría para determinar la cantidad de virutas de hierro necesarias para eliminar el ácido sulfhídrico del biogás se pueden observar en el Anexo 2, donde J. Aguilar establece que el biogás producido a partir de gallinaza contiene 1% en volumen de ácido sulfhídrico [34], este gas se considera como gas ideal por esto se utiliza el parámetro de 22,4 L por 1 mol, finalmente se requieren de 289,80 g de virutas de hierro por día, por ello se considera que para su mantenimiento el cambio de este cartucho sea semanalmente lo que se requiere de 2028,6 g de virutas de hierro por semana.

4.6 Especificaciones de construcción

4.6.1 Partes principales

4.6.1.a Tanque de mezcla, Se propone comprar un tanque de 2200 L en polietileno, debido a que economiza el costo de mano de obra y material de construcción. A este se le realizarían dos configuraciones, en la primera se realiza la abertura del orificio del tubo de carga, el cual tiene un diámetro de 6", y en la segunda, debido a que el tanque tiene una altura aproximada de 1,7 m, se instalara un agitador mecánico, el cual facilitara la mezcla realizada por la persona encargada.

4.6.1.b Tanque de digestión, Debido a que este tanque va por debajo de la tierra, la excavación puede realizarse de forma manual o mecanizada, para la seguridad de los constructores se debe dejar cierta inclinación en las paredes, de acuerdo con el tipo de terreno. La excavación debe abrirse a la profundidad exacta en que este caso será de 4,3 m, para evitar rellenos a la hora de

cimentar, por lo que se debe tomar, cada cierto tiempo, medidas verticales a partir del nivel de referencia.

En la parte inferior, la base del cono, se recomienda que sean losas de hormigón y que esta posea una resistencia de 15 Mpa, para que resista toda la presión de la mezcla entre agua-gallinaza y la del biogás, adicional a esto, la losa debe ser impermeable para evitar fugas o agrietamiento de esta.

La estructura del tanque estará construida por bloques de 15 a 20 cm y en la zona de la cúpula ladrillo de cerámica. En el cuello como en la cúpula, se recomienda un estucado adicional y después de este aplicar una pintura con protección impermeabilizante que generalmente son pinturas con esmaltes o sintéticas, esto con el fin de hacer más hermética las zonas, para evitar fugas del biogás.

Finalmente las dos tapas ubicadas en el cuello, nombradas anteriormente, debe de estar construidas con hormigón y arena fina, adicional a esto se coloca una malla de alambra como refuerzo, para garantizar su hermeticidad [26].

4.6.1.b Tanque de compensación. El tanque un radio igual al del tanque de digestión, el cual es de 2,81 y su altura es de 0,75 m, datos especificados en el apartado 4.4.3. Su construcción será cilíndrica, abierta a la atmosfera y el inferior estará construido por una losa de hormigo, con los mismos aspectos que en el tanque de digestión, a diferencia que el fondo no será cónico, si no plano.

4.7 Puesta en marcha

Después de ser construido el biodigestor este debe ser curado llenándolo de agua sin carga orgánica durante diez o doce días, una vez pasado este tiempo para lograr una producción de biogás constante, es necesario que la primera carga de la mezcla entre agua y gallinaza al tanque de digestión, sea completa, esto quiere decir unos 52 m³ o hasta que la mezcla se pueda observar en el tubo del tanque de compensación, esto garantizara un sistema anaerobio en el tanque de digestión, lo cual es de suma importancia, ya que las bacterias metano génicas, son las encargadas de formar el metano, y estas mueren en presencia del aire.

Una vez lleno el digestor, no se debe adicionar más mezcla hasta haber pasado unos quince días, debido a que las bacterias metanogénicas no aparecerán hasta después de haber ocurrido las etapas de hidrólisis y acidificación, durante este tiempo se debe dejar la válvula de la salida del biogás abierta con el fin de dejar escapar el aire contenido en él. Una vez transcurrido este tiempo se cierra la válvula y podremos cargar el biodigestor, ya que las bacterias metanogénicas se alimentan de esta mezcla, y de esto depende la producción de biogás.

Es importante aclarar que la alimentación debe ser periódicamente constante, en este caso será de manera diaria con una cantidad de 1,8 m³, esto beneficiara a las bacterias metanogénicas ya que eso garantizara una mayor eficiencia en la producción de biogás, si no se alimentan de manera periódica esto podría generar un desequilibrio y la muerte de las bacterias [39].

Finalmente es necesario dejar escapar el biogás producido inicialmente ya que puede ser explosivo y peligroso, o también no ser combustible por exceso de dióxido de carbono (CO₂) [26].

4.8 Mantenimiento [31]

Para obtener un funcionamiento óptimo del biodigestor, es necesario tener en cuenta ciertos parámetros, y evitar fugas, daños, costos y una vida útil corta.

4.8.1 Mezclado

En algunas ocasiones en el interior del biodigestor se presenta la formación de nata que corresponden a los residuos de desechos flotantes y esto viene dado por una no realizar un adecuado mezclado en el tanque de mezcla, por esto es importante que a la hora de realizar la mezcla agua-excreta se realice hasta obtener un fluido lo más uniforme posible, así mismo la alimentación al biodigestor debe ser lo más rápido posible para evitar pre digestión fuera de este.

4.8.2 Sedimentos

En el biodigestor se generan lodos en el fondo de esto, debido al volumen del biodigestor es necesaria retirarlos cada año, donde se puede rentar un camión para bombear estos lodos con ayuda de una manguera que llegue al fondo del biodigestor y se pueda extraer el lodo acumulado.

4.8.3 Trampa de agua

Es necesario drenar las trampas de agua y los puntos bajos de las tuberías aproximadamente cada dos meses para asegurar un correcto funcionamiento del biodigestor, de esta manera también se pueden evitar la acumulación de residuos que vengan del mal funcionamiento en el digestor.

4.8.4 Trampa de ácido sulfhídrico

Es necesario cambiar las virutas de hierro y realizar limpieza al recipiente cada semana o cuando se detecte un olor fuerte de azufre, para realizar el mantenimiento de esta inicialmente mente de debe cerrar la válvula de paso del biogás y se requiere usar guantes y protección de ojos.

4.9 Costos

Una vez realizado el diseño del biodigestor tipo chino para el aprovechamiento de la gallinaza, se procede a definir los costos teniendo en cuenta la implementación y operación del biodigestor, donde se implementarán la construcción, mano de obra, equipos auxiliares y los materiales teniendo en cuenta la dimensión del biodigestor, sin embargo, no se tendrá en cuenta el estudio del terreno, así mismo, estos costos serán un valor aproximado ya que es un diseño teórico, donde se apoyara de referencias bibliográficas, como se puede observar en la Tabla 6, en la cual están los materiales de construcción, tubería y accesorios necesarios para construir el biodigestor,

Debido a que no se establece si el producto y subproducto es vendido o usado en la finca, no se realizara el análisis de las ganancias que estos pueden llegar a ofrecer.

Tabla 6.*Costos*

COSTOS					
Material de construcción	Cantidad	Unidad	Valor por unidad	Total	Fuente
Ladrillo/Bloque #5	630	Ladrillo	\$ 900	\$ 567.000	[46]
Ladrillo común	300	Ladrillo	\$ 700	\$ 210.000	
Pintura impermeabilizante	2	Galón	\$ 88.600	\$ 177.200	[47]
Cemento gris	53	Bultos	\$ 26.264	\$ 1.391.992	[48]
Arena fina	159	Bultos	\$ 5.684	\$ 903.756	
Hormigón	3	m ³	\$ 374.852	\$ 1.124.556	
Tanque cilíndrico (2200 L)	1	Litros	\$ 990.900	\$ 990.900	[49]
Tuberías y accesorios	Cantidad	Unidad	Valor por unidad	Total	Fuente
Tubo PVC (6")	10	Metro	\$ 38.817	\$ 388.170	[50]
Tubo PVC (1/2")	4	Metro	\$ 4.100	\$ 16.400	
Tee (1/2")	1		\$ 600	\$ 600	
Válvula PVC (6")	1		\$ 815.000	\$ 815.000	[51]
Válvula de bola, Gas (1/2")	1		\$ 14.890	\$ 14.890	[52]
TOTAL				\$ 6.600.464	

Nota. La tabla evidencia los costos de los materiales para la construcción del biodigestor.
Elaboración propia.

5. CONSLUSIONES

Para la caracterización de la materia orgánica y teniendo en cuenta que el proyecto es netamente teórico, se realizó un acercamiento de las características físico-químicas de la gallinaza, con apoyo de varias referencias bibliográficas, esto con el fin de comprobar que estos residuos se encuentren dentro de los datos óptimos para realizar el proceso de digestión anaerobia, donde todas sus características eran adecuadas a excepción de los sólidos totales.

Se calculó la cantidad de agua que se requiere para disminuir el porcentaje de los sólidos totales de la gallinaza, donde se necesitan 8,312 L/kg excreta fresca para llevar los sólidos totales a un 10%; debido a que la cama de gallinaza está compuesta de excreta de gallina, aserrín y paja de arroz se realizó un balance de materia teniendo en cuenta la composición de carbono/ nitrógeno contenido en cada uno donde su relación C/N se debe encontrar dentro del rango 20:1 a 30:1, sugerido por la bibliografía, finalmente obteniendo una relación C/N de aproximadamente 20:1 permitiendo a la gallinaza ser un residuo orgánico adecuado para la digestión anaerobia, no se requiere la adquisición de agua debido a que la finca está ubicada en zona rural y cuenta con aljibes que abastecerán la demanda del agua.

Se compararon varios tipos de biodigestores rurales, que cuenten con la capacidad de producir biogás mediante excreta animal, entre estos biodigestores se encuentran, modelo tubular, modelo hindú, modelo horizontal y modelo chino; la selección del biodigestor para realizar el diseño, se realizó por medio de una matriz Pugh donde se establecieron cinco factores con un respectivo porcentaje de importancia de acuerdo a las prioridades y necesidades de la finca, los factores se dividen en costos (30%), caudal (25%), facilidad de construcción (20%), producción de biogás (15%) y vida útil (10%).

El mejor modelo de acuerdo a los factores mencionados anteriormente fue el modelo chino el cual obtuvo el mayor puntaje con respecto a los demás biodigestores, este obtuvo un puntaje de 3.9, debido a que tiene la mayor vida útil a relativamente un bajo costo, así mismo se requiere de excavaciones, sin embargo, no es de mayor dificultad, este tiene un alto rango de volumen y a comparación de los demás biodigestores su producción de biogás puede llegar a ser baja, sin embargo, produce una cantidad aceptable.

Se establecieron las variables del proceso que afectan la digestión anaerobia, la temperatura de operación será la temperatura ambiente entre Vélez y Chipatá donde se ubica la finca, esta se encuentra en el rango psicrófilos con una temperatura de 22°C; se calculó el tiempo de retención hidráulico dependiendo de la temperatura de operación donde se obtiene aproximadamente 31 días, el pH de la mezcla oscila la neutralidad con un dato de 7,03; para los sólidos totales se requiere mezclar excreta con agua para reducir este porcentaje a 10%, finalmente para la relación C/N se debe mezclar pasto seco con excreta para aumentar el contenido de carbono.

Se calcularon las dimensiones del biodigestor tipo chino el cual se dividen en tres partes; tanque de mezcla, tanque de digestión y tanque de compensación, para el tanque de mezcla se dispondrá de un tanque en polietileno de 2.200 L con el fin de reducir gastos, en el tanque de digestión, el volumen total de la cúpula donde se almacena el biogás producido es de 18,86 m³, el volumen de la parte cilíndrica será de 52,1 m³, y el volumen de la parte cónica es de 6,97 m³, finalmente, el tanque de compensación por donde sale la excreta fermentada llamada biol tendrá un volumen de 13,55 m³.

Se estableció que la tubería de carga y descarga serán tubos de PVC con un diámetro de 6” debido a que es de fácil instalación y económico, para la tubería del biogás producido será de igual manera un tubo de PVC de 1/2” de diámetro debido a que este es resistente a la corrosión, existen dos válvulas de control manuales tipo bola, la primera permite el paso de la alimentación debido a que la mezcla de agua-excreta es un fluido con sólidos suspendidos, la segunda permite la salida del biogás producido del biodigestor debido a que es un gas, para la trampa de agua se instalara un tubo de PVC en forma de T con una longitud de 0,15 m, finalmente, la trampa de ácido sulfhídrico constara de un recipiente hermético donde en su interior se encontraran virutas de hierro para la adsorción del ácido sulfhídrico.

Finalmente, en la Tabla 4, se realizó una búsqueda bibliográfica de los costos para los materiales, tuberías y accesorios para el biodigestor, entre los más costosos se encuentran los materiales para la construcción del tanque de digestión y compensación, que son los principales para la mampostería de estas partes, en la parte de accesorios, la llave tipo bola de 6”, es la más costosa debido a su diámetro, que es grande; Todos estos materiales tendrán un costo de \$ 6.600.464 aproximadamente.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. N. de A. de Colombia, “Informacion estadistica,” *FENAVI*.
<https://fenavi.org/informacion-estadistica/#1538599468784-33441e59-1807>.
- [2] F. . Carhuancho, J. . Guerrero, and J. . Ramirez, “Aprovechamiento del estiércol de gallina para la elaboración de biol en biodigestores tipo batch como propuesta al manejo de residuo avícola,” *XIX Simp. Peru. Energía Sol. y del Ambient. (XIX - SPES)*, no. 2010, pp. 12-17pp, 2012, [Online]. Available: <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/01/16.pdf>.
- [3] “Weather Spark,” 2021. <https://es.weatherspark.com/>.
- [4] C. M. Williams, “Gestión de residuos de aves de corral en los países en desarrollo,” *Revisión del Desarro. avícola*, pp. 47–52, 2011, [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/019/i3531s/i3531s.pdf>.
- [5] L. U. A. E. de Servicios and P. (UAESP), “Guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura guía técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura,” *Univ. Nac.*, p. 85, [Online]. Available: https://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP_SR.pdf.
- [6] S. Cuadros, “Residuos agrícolas , forestales y lodos,” *Eoi*, p. 70, 2008, [Online]. Available: <https://www.eoi.es/es/file/18263/download?token=iQLckU-u>.
- [7] N. Rosales Loaiza, J. Bermúdez, R. Moronta, and E. Morales, “Gallinaza: un residual avícola como fuente alternativa de nutrientes para producción de biomasa microalgal,” *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 9, no. 1, pp. 41–48, 2007, [Online]. Available: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/578>.
- [8] “El estiércol es dinero,” *El tiempo*, 1998.
<https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-800746#:~:text=Sólo basta ver las cifras,gallina ponedora genera 100 gramos>.

- [9] FAO, “Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores,” *Colección Doc. Técnicos*, p. 104, 2019, [Online]. Available: http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuideBiogasyBiodigestores-19-07-10.pdf.
- [10] R. A. P. Huertas, “Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria,” *Prod. + Limpia*, vol. 10, no. 2, pp. 142–159, 2015, [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1909-04552015000200014.
- [11] Academia de las renovables, “Curso operación y mantenimiento de sistemas de biodigestión de pequeña y mediana escala,” in *Operacion y mantenimiento de biodigestores*, 2019, p. 21.
- [12] Aqualimpia, “Fases de la digestión anaeróbica,” 2017. [https://www.aqualimpia.com/digestion-anaerobica/#:~:text=METANOGENESIS,H2\) y dióxido de carbono](https://www.aqualimpia.com/digestion-anaerobica/#:~:text=METANOGENESIS,H2) y dióxido de carbono).
- [13] L. Núñez, “Modelamiento y control de proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales,” Universidad de Piura, 2017.
- [14] FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF, *Manual del Biogás*. 2011.
- [15] N. De La Torre, “Digestión anaerobia en comunidades rurales,” Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politecnica Superior, 2008.
- [16] E. E. M. Valenzuela, “Diseño e implementación de biodigestores automatizados para producción de biogas en sonora,” 2018.
- [17] “Descubre todos los detalles acerca del biodigestor,” *Aquae Fundación*, 2020. <https://www.fundacionaquae.org/biodigestor/>.
- [18] Soluciones prácticas ITDG, *Biodigestores*. .
- [19] S. Pizarro, *Biodigestor*, Recursos D. 2005.

- [20] Intagri, “La gallinaza como fertilizante,” *Cienc. e Investig. Agrar.*, vol. 1, no. Nutricion Vegetal, p. 3, 2017, [Online]. Available:
<https://www.google.com/url?q=https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/gallinaza-como-fertilizante%23::~:~:text%3DLa%2520gallinaza%2520es%2520un%2520excelente,fertilidad%2520y%2520calidad%2520del%2520suelo&sa=D&source=editors&ust=1620500144499000&u>.
- [21] I. Corona Zúñiga, “Biodigestores,” Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2007.
- [22] E. R. Razo Azhig and M. I. Villafuerte Lopez, “Diseño, construcción y pruebas de un biodigestor experimental para fines didácticos,” p. 93, 2007, [Online]. Available:
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/306>.
- [23] D. M. Aldana and J. V. Sernaqué, “Proyecto de implementación de sistemas biodigestores para el aprovechamiento de residuos orgánicos generados por usuarios residenciales en la región Piura,” *Repos. Inst. Pirhua*, pp. 1–15, 2017, [Online]. Available:
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.
- [24] B. C. Cuní, “Metodología para determinar los parámetros de diseño y construcción de biodigestores para el sector cooperativo y campesino,” *Rev. Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 20, no. 2, pp. 37–41, 2011, [Online]. Available:
<http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v20n2/rcta07211.pdf>.
- [25] J. Izar, C. Ynsunza, and A. Castillo, “Aplicación del proceso analítico de jerarquización y la matriz de pugh en la selección del personal docente de posgrado,” *Retos las ciencias Adm. desde las Econ. emergentes Evol. Soc.*, p. 17, 2012, [Online]. Available:
https://www.researchgate.net/publication/278322379_Aplicacion_del_Proceso_Analitico_de_Jerarquizacion_y_la_Matriz_de_Pugh_en_la_seleccion_del_personal_docente_de_Posgrado.
- [26] J. A. Guardado Chacón, *Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas*. 2007.

- [27] J. Hernández López, “Diseño de un sistema de aprovechamiento energético de biogás a partir de los residuos generados por el ganado vacuno en la Vaquería 101 perteneciente a la empresa pecuaria ‘Camilo Cienfuegos,’” 2014.
- [28] Ministerio de turismo de Mozambique, “Estudio de alternativas y dimensionamiento de biodigestores para aplicaciones domésticas en la zona rural de Nwadjahane en Mozambique,” pp. 1–111, 2011, [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/14508/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [29] P. E. A. Vélez Correa and S. Pimentel Murillo, “Diseño a escala de un biodigestor anaeróbico para el tratamiento de residuos líquidos y sólidos con alto contenido de materia orgánica,” Corporación Universitaria Autónoma de Occidente, 1997.
- [30] Y. Olaya and L. González, “Fundamentos para el diseño de Biodigestores-Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas,” 2009.
- [31] H. Morales and C. Bonifaz, “Diseño de un biodigestor tipo cúpula fija para generación de biogás a partir de desechos orgánicos,” Universidad Politécnica salesiana, 2012.
- [32] F. Carhuancho L., J. Ramírez C., and J. Guerrero B., “Gestión Ambiental De Residuos Avícolas Mediante Digestión Anaerobia Para La Producción De Fertilizantes Orgánicos Líquidos,” *An. Científicos*, vol. 76, no. 1, p. 125, 2015, doi: 10.21704/ac.v76i1.773.
- [33] G. I. Mullo, “Manejo y procesamiento de la gallinaza,” *Lasallista Investig.*, p. 79, 2012, [Online]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2114/1/17T1106.pdf>.
- [34] J. L. Aguilar, “Estimación del potencial de energía eléctrica a partir de una unidad de volumen de excreta de gallina proveniente de granjas avícolas,” pp. 1–129, 2015, [Online]. Available: <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/10061/CB-0557814.pdf;jsessionid=FA968390576C1A44670A69BF5AC5A472?sequence=1>.
- [35] E. Barrera-Cardoso, L. Odales-Bernal, A. Carabeo-Pérez, and Y. Alba-Reyes,

- “Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural,” *Tecnol. Química*, vol. 40, no. 2, pp. 303–321, 2020, [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852020000200303&lng=es&nrm=iso&tlng=es#B26.
- [36] C. Nzila, J. Dewulf, H. Spanjers, D. Tuigong, H. Kiriamiti, and H. van Langenhove, “Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya,” *Appl. Energy*, vol. 93, p. 11, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.12.020.
- [37] “Temperatura de Chipata-Santander,” *The Weather Channel*. <https://weather.com/es-CO/tiempo/mensual/1/f0607f6d915fef07c16b3fa7a76472b2072150fa07eff34304aa895cc696a4a3>.
- [38] “Temperatura en Chipata-Santander,” *AccuWeather*. <https://www.accuweather.com/es/co/chipata/111285/april-weather/111285?year=2021>.
- [39] J. Sanchez, A. Hernandez, and P. Anivys, “Uso y mantenimiento de biodigestores de cupula fija, una forma de contribuir al desarrollo local sostenible.,” *Univ. Mantanzas, Cuba.*, pp. 1–21, [Online]. Available: <http://monografias.umcc.cu/monos/2014/Facultad de Ciencias Tecnicas/mo1470.pdf>.
- [40] C. R. Huallpa, P. R. Céspedes, and E. V. Blesmi, “Evaluación del efecto de biol bovino en la producción y calidad de la avena forrajera (*Avena sativa* L.) en época de invierno en la estación experimental Choquenaira, Viacha - Paz,” vol. 3, p. 116, 2016, [Online]. Available: http://www.scielo.org.bo/pdf/riiarn/v3n1/v3n1_a12.pdf.
- [41] “El tiempo en Velez, Colombia.,” *Tiempo y Temperaturas*, 2020. <http://tiempoytemperatura.es/colombia/velez.html#por-horas>.
- [42] German Agency for Technical Cooperation (GTZ), “Biogas Digest,” vol. II, p. 81, 2007, [Online]. Available: <https://n9.cl/yg0h>.
- [43] “Válvulas de bola,” *Alfa Laval*, 2019. <https://www.alfalaval.com.co/productos-y-soluciones/manejo-de-fluidos/valvulas/valvulas-de-bola/>.

- [44] P. Rueda, “Estudio de prefactibilidad para el manejo de los desechos orgánicos del Galápagos Science Center,” Universidad San Francisco de Quito, 2013.
- [45] J. M. Alayón, “El biodigestor, Una alternativa energética y ecológica,” *Serv. Nac. aprendizaje, SENA*, p. 37, 1994, [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11404/1304>.
- [46] “Ladrillos estructurales y divisorios,” *HomeCenter-Sodimac Corona*, 2021. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/category/cat1670233/Tubos-PVC>.
- [47] “Pinturas,” *Corona*, 2021. <https://corona.co/productos/pinturas/pintura-impermeabilizante/p/407211001>.
- [48] “Soluciones para estructuras,” *TiendaArgos*, 2021. <https://www.tiendargos.com.co/Soluciones-para-Estructuras?map=c>.
- [49] “Tanques de agua,” *HomeCenter-Sodimac Corona*, 2021. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/487444/Tanque-Agua-Cilindrico-2200-Litros/487444>.
- [50] “Tubería PAVCO,” *HomeCenter-Sodimac Corona*, 2021. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/65855/tubo-sanitario-6%22-x-6-mts>.
- [51] “Valvulas de riego,” *MercadoLibre*, 2021. <https://cutt.ly/6nKEbWJ>.
- [52] “Valvulas y llaves de paso,” *easy CENCOSUD*, 2021. <https://www.easy.com.co/p/valvula-bola-1~2%22-gas/>.

ANEXOS 1

CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS

A continuación, se presentan cuatro tablas con diferentes referentes bibliográficos que nos brindan las características físico-químicas de la gallinaza, esto con el fin de poder realizar un promedio entre estas características y obtener un acercamiento a la excreta, los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 1.

Figura 14.

Nutrientes de estiércol de diferentes animales

Animal	Materia seca %	%N	%P ₂ O ₅	%K ₂ O	%CaO	%MgO	%SO ₄ ⁼
Vacunos(f)	6	0.29	0.17	0.10	0.35	0.13	0.04
Vacunos (s)	16	0.58	0.01	0.49	0.01	0.04	0.13
Ovejas (f)	13	0.55	0.01	0.15	0.46	0.15	0.16
Ovejas (s)	35	1.95	0.31	1.26	1.16	0.34	0.34
Caballos (s)	24	1.55	0.35	1.50	0.45	0.24	0.06
Caballos (f)	10	0.55	0.01	0.35	0.15	0.12	0.02
Gallinas (s)	47	6.11	5.21	3.20	s.i.	s.i.	s.i. (f)

Nota. En la figura se esquematiza los diferentes nutrientes encontrados en el estiércol de varios animales. Tomado de F. . Carhuacho, J. . Guerrero, y J. . Ramirez, “Aprovechamiento del estiércol de gallina para la elaboración de biol en biodigestores tipo batch como propuesta al manejo de residuo avícola”, *XIX Simp. Peru. Energía Sol. y del Ambient. (XIX - SPES)*, núm. 2010, pp. 12-17pp, 2012, [En línea]. Disponible en: <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/01/16.pdf>.

Figura 15.

Parámetros fisicoquímicos del estiércol de gallina

Parámetros	GJ	GP	GM
pH	6.45	6.38	6.21
Conductividad (dS/m)	18.30	14.60	16.40
Humedad (%)	60.88	26.08	40.30
Sólidos totales (%)	31.37	93.12	59.41
Materia orgánica (%)	54.66	66.72	61.23
Carbono orgánico (%)	31.71	38.70	35.52
Nitrógeno (%)	3.24	3.37	3.23
Relación C/N	9.79	11.48	11.00
Potasio (K ₂ O%)	3.14	2.89	2.58
Fósforo (P ₂ O ₅ %)	4.77	4.94	4.85

Nota. La figura esquematiza los parámetros fisicoquímicos de la gallinaza de jaula, piso y mixta. Tomado de F. Carhuacho L., J. Ramírez C., y J. Guerrero B., “Gestión Ambiental De Residuos Avícolas Mediante Digestión Anaerobia Para La Producción De Fertilizantes Orgánicos Líquidos”, An. Científicos, vol. 76, núm. 1, p. 125, 2015, doi: 10.21704/ac.v76i1.773.

Figura 16.

Parámetros fisicoquímicos de la gallinaza

Parámetros	Gallinaza en jaula	Gallinaza en piso	Pollinaza
Ph	9.0	8.0	9.50±0.2
Conductividad (mS/cm)	6.9	1.6	4.1±0.1
Humedad (%)	57.8	34.8	25.8±0.2
Cenizas (%)	23.7	14	39±3
Potasio (K ₂ O%)	1.9	0.89	2.1±0.1
Carbono orgánico (%)	19.8	24.4	23±5
Materia orgánica (%)	34.1	42.1	39.6±8
Nitrógeno (%)	3.2	2.02	2.3±0.1
Relación C/N	6.2	12.1	10.0
Fósforo (P ₂ O ₅)	7.39	3.6	4.6±0.2
C.I.C. (meq/100 g de muestra)	58.2	77	-
C.I.C. (meq/100 g MO)	226	138	125.0

Nota. La figura esquematiza las características fisicoquímicas de diferentes tipos de gallinaza y pollinaza. Tomado de F. . Carhuacho, J. . Guerrero, y J. . Ramirez, “Aprovechamiento del estiércol de gallina para la elaboración de biol en biodigestores tipo batch como propuesta al manejo de residuo avícola”, *XIX Simp. Peru. Energía Sol. y del Ambient.* (XIX - SPES), núm. 2010, pp. 12-17pp, 2012, [En línea]. Disponible en: <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/01/16.pdf>.

Figura 17.

Elementos fisicoquímicos de la gallinaza

Elemento	Gallinaza de Jaula	Gallinaza de piso	Pollinaza
PH	7,4	7,29	7,9
Humedad (%)	57,8	34,8	25,8
Carbono orgánico (%)	19,8	24,4	23
Nitrógeno (%)	3,2	2,02	2,3
Relación C/N	6,2	12,1	10
Fosforo	7,39	3,6	4,6
Potasio (K ₂ O %)	1,9	0,89	2,1

Nota. La figura esquematiza los elementos fisicoquímicos de la gallinaza. Tomado de J. L. A. Genes, “Estimación del potencial de energía eléctrica a partir de una unidad de volumen de excreta de gallina proveniente de granjas avícolas,” pp. 1–129, 2015, [En línea]. Disponible en : <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/10061/CB-0557814.pdf;jsessionid=FA968390576C1A44670A69BF5AC5A472?sequence=1>.

ANEXO 2

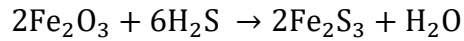
RESULTADO BALANCE DE MASA

Volumen de biogás (V_{BG}) = 12,18 m³/día

Porcentaje de Ácido Sulhídrico = 1%

Ácido sulfhídrico = 0.1218 m³

$$0,1218 \text{ m}^3 \text{H}_2\text{S} * \frac{1.000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ mol H}_2\text{S}}{22,4 \text{ L}} * \frac{34,1 \text{ g H}_2\text{S}}{1 \text{ mol H}_2\text{S}} = 185,42 \text{ g H}_2\text{S}$$



$$185,42 \text{ g H}_2\text{S} * \frac{1 \text{ mol H}_2\text{S}}{34,1 \text{ g H}_2\text{S}} * \frac{2 \text{ mol Fe}_2\text{S}_3}{6 \text{ mol H}_2\text{S}} * \frac{207,9 \text{ g}}{1 \text{ mol Fe}_2\text{S}_3} = 376,82 \text{ g/día Fe}_2\text{S}_3$$

$$376,86 \text{ g Fe}_2\text{S}_3 * \frac{1 \text{ mol Fe}_2\text{S}_3}{207,9 \text{ g Fe}_2\text{S}_3} * \frac{2 \text{ mol Fe}_2\text{O}_3}{2 \text{ mol Fe}_2\text{S}_3} * \frac{159,89 \text{ g Fe}_2\text{O}_3}{1 \text{ mol Fe}_2\text{O}_3} = 289,80 \text{ g/día Fe}_2\text{O}_3$$