



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

**DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO DE TIPO
TAIWANÉS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A TRAVES
DEL ESTIÉRCOL DE GANADO BOVINO PARA LA FINCA
“CASTILLO DE ALTURA”, EN LA PARROQUIA SAN JUAN,
PROVINCIA CHIMBORAZO**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR:

CRISTIAN DAVID LEMA TENELEMA

Riobamba – Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

**DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO DE TIPO
TAIWANÉS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A TRAVES
DEL ESTIÉRCOL DE GANADO BOVINO PARA LA FINCA
“CASTILLO DE ALTURA”, EN LA PARROQUIA SAN JUAN,
PROVINCIA CHIMBORAZO**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR: CRISTIAN DAVID LEMA TENELEMA

DIRECTOR: DR. JOSÉ GERARDO LEÓN CHIMBOLEMA

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Cristian David Lema Tenelema

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Cristian David Lema Tenelema, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Aquellos textos de otras fuentes están correctamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos presentes en este Trabajo de Integración Curricular, el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 30 de junio de 2023

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Cristian David Lema Tenelema', with a horizontal line underneath.

Cristian David Lema Tenelema
0604322933

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA AMBIENTAL

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; tipo: Proyecto Técnico, **DISEÑO DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO DE TIPO TAIWANÉS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A TRAVÉS DEL ESTIÉRCOL DE GANADO BOVINO PARA LA FINCA “CASTILLO DE ALTURA”, EN LA PARROQUIA SAN JUAN, PROVINCIA CHIMBORAZO**, realizado por el señor: **CRISTIAN DAVID LEMA TENELEMA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dra. Lourdes Janneth Jara Samaniego, PhD. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-06-30
Dr. José Gerardo León Chimbolema DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-06-30
Ing. Andres Agustin Beltran Davalos ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-06-30

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres por siempre estar conmigo en todo lo que me propongo, su apoyo incondicional fue vital para sobrellevar los problemas que se cruzaron a lo largo de mi camino académico y lo siguen haciendo en lo que me propongo. Por último, a mis abuelas y hermana por ser mi soporte y motivo para seguir avanzando ante las adversidades.

Cristian

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la bendición que siempre me está brindando y compartir momentos con mis padres, familiares, amigos, y guiar mi camino de formación como hijo, amigo y ser humano. También agradecer al Dr. Gerardo León por ser quien me guio en la culminación de este trabajo, siguiendo sus consejos y experiencias compartidas en el desarrollo de este proyecto. Además, al ingeniero Andrés Beltrán por sus asesorías para la elaboración del proyecto. En especial al señor Juan Castillo y familia por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto en su finca “Castillo de Altura”.

Cristian

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Justificación.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	5

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Impacto ambiental de actividades agropecuarias.....	6
2.1.1 <i>Afectaciones al suelo</i>	6
2.1.2 <i>Afecciones sobre el agua</i>	7
2.1.3 <i>Afecciones sobre el aire</i>	7
2.2 Proceso de digestión anaerobia en el biorreactor.....	7
2.2.1 <i>Digestión aerobia</i>	8
2.2.2 <i>Digestión anaeróbica</i>	8
2.2.3 <i>Etapas de la fermentación metanogénica</i>	9
2.2.3.1 <i>Hidrólisis</i>	9
2.2.3.2 <i>Etapa fermentativa o acidogénica</i>	9
2.2.3.3 <i>Etapa acetogénica</i>	10
2.2.3.4 <i>Etapa metanogénica</i>	10
2.3 Residuos ganaderos y agroindustriales.....	11
2.3.1 <i>Actividades ganaderas</i>	11

2.3.2	<i>Actividades agroindustriales</i>	11
2.4	Digestores o biorreactores	13
2.5	Tipos de biodigestores	14
2.6	Modelos de biodigestores	15
2.6.1	<i>Modelo chino</i>	15
2.6.2	<i>Modelo indiano</i>	15
2.6.3	<i>Biodigestor tubular o taiwanés</i>	16
2.7	Productos para obtener del proceso de digestión anaerobia	17
2.7.1	<i>Biol</i>	17
2.7.2	<i>Biogás</i>	18
2.8	Purificación del biogás	18
2.9	Aplicaciones y usos del biogás	19
2.10	Parámetros fisicoquímicos de control durante el proceso de la biodigestión anaerobia	20
2.10.1	<i>pH</i>	20
2.10.2	<i>Naturaleza y composición bioquímica de materias primas</i>	21
2.10.3	<i>Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO</i>	23
2.10.4	<i>Demanda Química de Oxígeno, DQO</i>	23
2.10.5	<i>Relación Carbono/ Nitrógeno, C/N</i>	24
2.10.6	<i>Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles</i>	24
2.10.7	<i>Temperatura</i>	25
2.10.8	<i>Tiempo de retención hidráulico y velocidad de carga</i>	26
2.10.9	<i>Nutrientes (niveles de sales)</i>	27
2.10.10	<i>Tóxicos de inhibidores de la metanogénesis</i>	28
2.10.10.1	<i>Ácidos grasos volátiles, (AGV)</i>	28
2.10.10.2	<i>Hidrógeno</i>	28
2.10.10.3	<i>Nitrógeno amoniacal</i>	28
2.10.10.4	<i>Sulfatos y sulfuros</i>	29
2.10.11	<i>Promotores de la metanogénesis</i>	29
2.11	Dispositivos de control	30
2.11.1	<i>GPS-6 Multi-use Temperature & Humidity Data Logger</i>	30
2.11.2	<i>MI USB PDF Temperature Data Logger</i>	31
 CAPÍTULO III		
3.	MARCO METODOLÓGICO	32

3.1	Área de estudio.....	32
3.2	Ubicación del lugar.....	32
3.3	Topografía de la finca.....	33
3.4	Muestreo y cuantificación del estiércol diario.....	33
3.5	Caracterización fisicoquímica del estiércol pre (estiércol) y post degradación ...	34
3.6	Determinación de biodegradabilidad en la muestra.....	36
3.7	Selección del biodigestor	36
3.8	Prueba piloto del biodigestor en la Finca Castillo de Altura.....	37
3.8.1	<i>Materiales para construcción del biodigestor prototipo</i>	37
3.8.2	<i>Preparación del sustrato</i>	37
3.8.3	<i>Determinación de % C/N.....</i>	35
3.8.4	<i>Dispositivos para la medición y monitoreo de temperatura</i>	35
3.8.4.1	<i>M1 USB PDF Temperature Data Logger (Sensor Externo).....</i>	35
3.8.4.2	<i>GSP-6 Multi-use Temperature & Humidity Data Logger (Sensor Interno)</i>	36
3.8.5	<i>Filtro para biogás</i>	37
3.8.6	<i>Comparación de la temperatura interna y externa del biodigestor.....</i>	38
3.8.7	<i>Medición de la cantidad de biogás almacenado en la planta piloto.....</i>	38
3.8.7.1	<i>Medición de biogás a partir de la generación la flama</i>	39
3.8.7.2	<i>Determinación del caudal del biogás</i>	39
3.8.8	<i>Control de pH.....</i>	40
3.9	Diseño del biodigestor taiwanés a partir de la materia prima disponible	40
3.9.1	<i>Cálculo de la carga diaria, CD</i>	41
3.9.2	<i>Determinación de la carga a depositar en el biodigestor, CD.....</i>	41
3.9.3	<i>Determinación del tiempo de retención, TRH</i>	42
3.9.4	<i>Determinación del volumen líquido en el biodigestor, VL.....</i>	42
3.9.5	<i>Determinación del volumen de gas a producir, VG.....</i>	42
3.9.6	<i>Volumen total del biodigestor, VT.....</i>	43
3.9.7	<i>Cálculo de sólidos totales, ST</i>	43
3.9.8	<i>Determinación de sólidos volátiles, SV</i>	43
3.9.9	<i>Determinación de la producción de biogás, PB.....</i>	44
3.9.10	<i>Determinación del radio del biodigestor.....</i>	44
3.9.11	<i>Diámetro de la circunferencia.....</i>	44
3.9.12	<i>Determinación del área de la zanja, m2.....</i>	45
3.9.13	<i>Determinación de la longitud del biodigestor, L.....</i>	45
3.9.14	<i>Diseño de planos en software AutoCAD y SketchUP Pro</i>	46

CAPÍTULO IV

4.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	48
4.1	Área de estudio.....	48
4.2	Ubicación del lugar	48
4.3	Topografía de la finca.....	49
4.4	Caracterización fisicoquímica del estiércol pre (estiércol) y post degradación ...	50
4.5	Determinación de la biodegradabilidad en la muestra.....	52
4.6	Selección del biodigestor	52
4.7	Prueba piloto del biodigestor en la Finca Castillo de Altura.....	53
4.7.1	<i>Determinación de la relación C/N.....</i>	<i>53</i>
4.7.2	<i>Dispositivos de control y monitoreo de temperatura</i>	<i>54</i>
4.7.2.1	<i>M1 USB PDF Temperature Data Logger.....</i>	<i>54</i>
4.7.2.2	<i>GSP-6 Multi-use Temperature & Humidity Data Logger</i>	<i>56</i>
4.7.3	Comparación de la temperatura interna y externa del biodigestor	57
4.7.4	Medición de la cantidad de biogás almacenado en la planta piloto.....	58
4.7.4.1	Medición de biogás a partir de la generación la flama	59
4.7.4.2	Determinación del caudal del biogás	60
4.7.5	Control de pH.....	61
4.8	Diseño del biodigestor a partir de la materia prima disponible	61
4.8.1	Cálculo de la carga diaria, CD	62
4.8.2	Determinación del tiempo de retención, TRH	63
4.8.3	Determinación del volumen líquido en el biodigestor, VL.....	63
4.8.4	Determinación del volumen de gas a producir, VG.....	64
4.8.5	Volumen total del biodigestor, VT.....	64
4.8.6	Cálculo de sólidos totales, ST	64
4.8.7	Determinación de sólidos volátiles, SV	64
4.8.8	Producción de biogás, PB.....	65
4.8.9	Determinación del radio del biodigestor	65
4.8.10	Diámetro de la circunferencia.....	66
4.8.11	Determinación del área de la zanja, m ²	66
4.8.12	Determinación de la longitud del biodigestor, L.....	67
4.9	Discusión.....	68
4.10	Tabla resumen para el dimensionamiento del biodigestor tubular.....	70

CAPÍTULO V

5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	71
5.1	Conclusiones.....	71
5.2	Recomendaciones.....	72

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Principales cultivos registrados en el 2018 del sector agroindustrial	12
Tabla 2-2: Sector manufacturero dedicado a la industria según los datos del INEC, 2017	12
Tabla 2-3: Características generales del biogás.	18
Tabla 2-4: Residuos orgánicos de diversos orígenes.	22
Tabla 2-5: Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica.....	23
Tabla 2-6: Valores promedio de contenidos de sólidos totales de diferentes residuos	25
Tabla 2-7: Rangos de temperatura de operación en la digestión anaerobia.	26
Tabla 2-8: Tiempo de retención hidráulico en distintas regiones	27
Tabla 3-1: Parámetros y métodos de referencia usados para determinar la composición de la materia orgánica.	35
Tabla 3-2: Resultados de análisis post degradación de la muestra de biol.	35
Tabla 3-3: Matriz de criterio para la selección de un biodigestor a partir de los modelos: chino, indio y taiwanés.	36
Tabla 3-4: Modelo de comparación de los valores registrados por los sensores en el biodigestor de acuerdo con las semanas correspondientes.....	38
Tabla 3-5: Modelo de registro de la medición de biogás generado en la planta piloto.....	38
Tabla 3-6: Modelo de formato de registro por día del pH en el biodigestor.....	40
Tabla 3-7: Modelo de registro de la Carga Diaria (Kg) generada por día en la finca.....	41
Tabla 3-8: Modelo del análisis descriptivo a usar del pesaje por día obtenido en la finca Castillo.	41
Tabla 4-1: Datos relevantes de la Zona de San Juan.....	48
Tabla 4-2: Resultados del análisis de la muestra de estiércol de la caracterización fisicoquímica (pre degradado).	50
Tabla 4-3: Resultados del análisis de la muestra de biol de la caracterización fisicoquímica (post degradado).....	51
Tabla 4-4: Resultados de la matriz de criterio para la selección del biodigestor definiendo la mejor opción.....	53
Tabla 4-5: Concentración de la relación C/N óptima en base a cada sustrato a usar para su composición.....	54
Tabla 4-6: Análisis descriptivo de la temperatura externa del biodigestor en base al TRH.	55
Tabla 4-7: Análisis descriptivo de la temperatura interna del biodigestor en base al TRH.....	57
Tabla 4-8: Comparación de la temperatura interna y externa en el biodigestor.....	57

Tabla 4-9: Determinación de la cantidad de biogás almacenado en el tubo interno a partir de las fechas.	58
Tabla 4-10: Análisis descriptivo de la producción de biogás.....	59
Tabla 4-11: Control de generación de flama a partir del biogás almacenado en el tubo de llanta	59
Tabla 4-12: Análisis descriptivo del pesaje de la cantidad de estiércol	62
Tabla 4-13: Diseño del biodigestor a partir de la materia prima disponible	70

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Descripción del proceso de Digestión Anaerobia.....	10
Ilustración 2-2: Biodigestor modelo Chino.....	15
Ilustración 2-3: Biodigestor modelo Indiano.....	16
Ilustración 2-4: Biodigestor modelo tubular.	16
Ilustración 2-5: Dependencia del pH de la actividad metanogénica.	21
Ilustración 2-6: Tiempo de retención en función de la temperatura.....	27
Ilustración 2-7: Crecimiento microbiano dentro de un digester anaeróbico.	29
Ilustración 2-8: Sensor GPS-6 Multi use Temperature and Humidity Data Logger	30
Ilustración 2-9: M1 USB PDF Temperature Data Logger.	31
Ilustración 2-10: División de los cuadrantes para la toma de la muestra de estiércol.	34
Ilustración 3-1: Instalación y configuración del sensor MI USB PDF Temperature Data Logger	36
Ilustración 3-2: Instalación y configuración del sensor GSP-6 Multi-use Temperature & Humidity Data Logger (Sensor interno).....	37
Ilustración 3-3: Esquema de una zanja trapezoidal de acuerdo con cada una de las paredes de la zanja.....	45
Ilustración 3-4: Esquema del cilindro mostrando el diámetro y la longitud del biodigestor.....	46
Ilustración 4-1: Mapa de ubicación de la Finca Castillo de Altura en la parroquia San Juan ...	49
Ilustración 4-2: Mapa topográfico de la Finca Castillo de Altura.	49
Ilustración 4-3: Perfil de elevación para la conducción del biogás desde el biodigestor a la cocina	50
Ilustración 4-4: Variación de la Temperatura externa del biodigestor de acuerdo con el TRH. 55	
Ilustración 4-5: Variación de la Temperatura interna del biodigestor de acuerdo con el TRH. 56	
Ilustración 4-6: Cantidad de biogás almacenado en el tubo interno a partir de las fechas posteriores del proceso de generación de biogás	58
Ilustración 4-7: Fecha de inicio de la generación de biogás hasta la presente fecha.....	60
Ilustración 4-8: Control del pH en base al TRH.....	61
Ilustración 4-9: Determinación de la carga diaria de estiércol generado en la finca durante 30 días.....	62
Ilustración 4-10: Esquema de una zanja trapezoidal de acuerdo con cada una de las paredes de la zanja	66

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** PESAJE DEL ESTIÉRCOL EN CADA UNA DE LAS ZONAS DETERMINADAS PARA EL ESTUDIO
- ANEXO B:** TOMA DE LA MUESTRA DE ESTIÉRCOL EN BASE A LOS CUADRANTES DEL ÁREA DE ESTUDIO
- ANEXO C:** CONSTRUCCIÓN DEL INVERNADERO PARA LA CUBIERTA DEL BIODIGESTOR
- ANEXO D:** PREPARACIÓN DE LOS SUSTRATOS PARA LA COLOCACIÓN EN EL BIODIGESTOR
- ANEXO E:** COLOCACIÓN DE LOS SUSTRATOS COMBINADOS DE ACUERDO CON LA RELACIÓN C/N ÓPTIMA
- ANEXO F:** COLOCACIÓN DEL SENSOR MI USB PDF TEMPERATURE DATA LOGGER EN EL BIODIGESTOR
- ANEXO G:** COLOCACIÓN E INSTALACIÓN DEL SENSOR GSP-6 MULTI-USE TEMPERATURE & HUMIDITY DATA LOGGER EN EL INTERIOR DEL BIODIGESTOR
- ANEXO H:** MEDICION DEL BIOGÁS, POR EL METODO DEL DESPLAZAMIENTO
- ANEXO I:** REGISTRO DEL PH DE ACUERDO AL TRH
- ANEXO J:** MEDICIÓN DEL PH TOMADA UNA MUESTRA DEL BIODIGESTOR POR DÍA
- ANEXO K:** FILTRO DE BIOGÁS A PARTIR DEL TRATAMIENTO DE LAS LIMADURAS DE HIERRO
- ANEXO L:** EVOLUCION DE LA COLORACION DE LA FLAMA DE ACUERDO AL TRH
- ANEXO M:** REGISTRO DEL PESAJE DEL ESTIÉRCOL DURANTE LOS 30 DIAS
- ANEXO N:** REGISTRO DE LA TEMPERATURA INTERNA DE ACUERDO AL TRH
- ANEXO O:** REGISTRO DE LA TEMPERATURA EXTERNA DEL BIODIGESTOR DE ACUERDO AL TRH
- ANEXO P:** LONGITUDES MMINIMO, MAXIMO Y OPTIMA PARA BIODIGESTORES TUBULARES A PARTIR DE LA CIRCUNFERENCIA
- ANEXO Q:** PARAMETROS PARA EL DIMENSIONAMEINTO DE ZANJAS TUBULARES A PARTIR DEL ANGULO Y RADIO DE LA CIRCUNFERENCIA

- ANEXO R:** RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESTIÉRCOL DEL LABORATORIO AGRARPROJEKT
- ANEXO S:** RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESTIÉRCOL Y BIOL DEL LABORATORIO SAQMIC
- ANEXO T:** PLANOS DEL DISEÑO DEL BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LA FINCA CASTILLO DE ALTURA
- ANEXO U:** PLANOS DEL DISEÑO DEL BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LA FINCA CASTILLO DE ALTURA

RESUMEN

La finca Castillo de Altura usa el estiércol de sus bovinos únicamente para abonar los suelos de la propiedad, y no tiene otra utilización por lo cual se puede mejorar la gestión de sus residuos y tener un aprovechamiento en otros campos. El presente proyecto tuvo como objetivo generar biogás usando el estiércol de la finca Castillo en la parroquia San Juan, provincia de Chimborazo. La metodología empleada fue descriptiva, esta inició con la caracterización físico-química del estiércol en los laboratorios agrar PROJECTK y SAQMIC, bajo Standard Methods. Se usó la técnica de desplazamiento de líquido para la medición de biogás, la generación de metano se comprobó con la prueba de flama. Se usó dispositivos para monitorear la temperatura interna y externa del biodigestor. Con esta metodología se logró obtener una adecuada relación C//N de 20.1. La DBO y DQO fue de: 57 000 mg/L y 95 000 mg/L, y pH de 8.93 antes del proceso de fermentación. El monitoreo y registro de la temperatura fue de acuerdo con el tiempo de retención de 58 días calculados. Los rangos de temperatura estuvieron: 25 a 57°C de 8:00 am a 16:00 pm, y temperaturas bajas menores a 10°C de 11:00 pm a 4:00 am. El pH osciló entre 6 a 6,8. Transcurridos los 58 días se evaluó nuevamente la DBO y DQO obteniendo 26 000 mg/L y 55 200 mg/L, existiendo una reducción y evidenciando la degradación de la materia orgánica, el pH se estabilizó a 7,02. Se concluye, la posibilidad de generación de biogas y metano a partir del día 58 en la prueba piloto. El cálculo del dimensionamiento del biodigestor fue de: un volumen total de 14,15 m³, una longitud 9,79 m, ancho rollo de 2,5 m y un diámetro de 1,6 m.

Palabras clave: <DIGESTIÓN ANAEROBIA>, <PSICRÓFILO>, <BIOGÁS>, <pH>, <DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO>, <DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO>.

1601-DBRA-UPT-2023



ABSTRACT

The Castillo de Altura farm uses the manure of its bovines only to fertilize the property's soils, and it has no other use, so its waste management can be improved and used in other fields. This study aimed to generate biogas using manure from the Castillo farm in the San Juan parish, Chimborazo province. The methodology used was descriptive; it began with the physical-chemical characterization of the manure in the agrar PROJECTK and SAQMIC laboratories under Standard Methods. The liquid displacement technique was used for the biogas measurement, and the methane generation was verified with the flame test. Devices were used to monitor the internal and external temperature of the biodigester. With this methodology, it was possible to obtain an adequate C/N ratio of 20.1. The BOD and COD were 57,000 mg/L and 95,000 mg/L and had a pH of 8.93 before fermentation. The monitoring and recording of the temperature followed the retention time of 58 days calculated. The temperatures ranged from 25 to 57°C from 8:00 am to 4:00 pm and below 10 °C from 11:00 pm to 4:00 am. The pH ranged from 6 to 6.8. After 58 days, the BOD and COD were re-evaluated, obtaining 26,000 mg/L and 55,200 mg/L, there being a reduction and evidencing the degradation of organic matter, the pH stabilized at 7.02. The possibility of generating biogas and methane from day 58 in the pilot test is concluded. The calculation of the dimensioning of the biodigester was a total volume of 14.15 m³, a length of 9.79 m, a roll width of 2.5 m and a diameter of 1.6 m.

Keywords: <ANAEROBIC DIGESTION>, <PSYCHROPHILE>, <BIOGAS>, <pH>, <CHEMICAL OXYGEN DEMAND>, <BIOCHEMICAL OXYGEN DEMAND>.



Ing. Paul Obregón M. Mgs

0601927122

INTRODUCCIÓN

Las industrias ganaderas dedicadas a la producción de leche y carne son necesarias en todo el mundo para proporcionar nutrientes en la dieta de las personas y mantener un estilo de vida saludable. Sin embargo, es necesario realizar un seguimiento técnico de la dieta anual o periódico a cada vacuno, bovino de la granja, finca, ya que incide en la producción y calidad de los productos mencionados (Hernández et al. 2019, pp. 1-2).

En muchas ocasiones los residuos generados a lo largo del proceso de crianza y producción no son gestionados adecuadamente. El estiércol es usado como abono natural para fortalecer la deficiencia de nutrientes en suelos carentes de minerales debido a la sobreproducción y desgaste del suelo, la erosión, monocultivos entre otros factores. Este residuo contribuye a mejorar la estructura del suelo, además ayuda en la retención del agua (Parra, Botero y Botero 2019, p. 2).

Según las cifras del ESPAC (Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua) (2020) de la población ganadera en Ecuador se dedica a la crianza de bovinos con un total de 4.34 millones de cabezas en todo el país, principalmente en las regiones de la Costa y la Sierra. Sin embargo, muchos dueños de fincas desconocen el valor energético que ofrece el estiércol para la generación de metano, un combustible que puede sustituir al gas propano o butano derivado del gas licuado de petróleo (GLP). Si se aprovechan adecuadamente los residuos, se pueden generar ahorros monetarios significativos en la adquisición de estos combustibles para cocinar alimentos y calefaccionar. Además, se puede obtener un biofertilizante útil para mejorar el rendimiento de los cultivos (ESPAC 2021, p. 39).

Es importante, gestionar adecuadamente las excretas del ganado bobino, vacuno, su uso en la recuperación de suelos con déficit de materia orgánica es beneficioso, pero el exceso trae consigo varias problemáticas derivadas como un aumento en el pH del suelo haciéndolo más ácido y con ello afecta a la producción agraria (Barrena et al. 2019, p. 2).

Las excretas que se encuentran al “aire libre” es decir sin alguna cubierta o en un lugar no adecuado para su almacenamiento, pueden generar contaminación al recurso hídrico al generarse precipitaciones en el lugar. Al filtrarse los nutrientes van perdiendo: 20% de N; 5% de P y +35% de K, en el peor de los casos pueden llegar a cuerpos de agua como ríos, lagunas y demás, contaminando así a la calidad del agua (Gutiérrez, Peña y Hernani 2018, p. 2).

El uso de biodigestores en el Ecuador está en proceso de desarrollo como es el caso de las provincias de Imbabura, Pichincha, El Oro, Azuay y Napo. En comparación con países

sudamericanos como Perú, Colombia, Bolivia entre otros que ya vienen usando este tipo de sistemas ya hace varios años.

El objetivo de este proyecto técnico es diseñar un biodigestor tipo taiwanés para el aprovechamiento de las excretas del ganado bovino para la Finca Castillo de Altura, situada en la de San Juan, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo. Se adecuo el diseño de acuerdo con la disponibilidad de la cantidad de estiércol que se genera al día, además de adaptarlo a las condiciones climáticas del lugar.

Además, se instaló un biodigestor prototipo en el cual se realizó un seguimiento de la temperatura interna y externa del biodigestor, análisis de pH, TRH, DBO, DQO, entre otros parámetros, para demostrar la generación de biogás a partir de la fermentación del estiércol hasta obtener el metano.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

El calentamiento global en el mundo avanza un ritmo acelerado debido a las Emisiones de Efecto Invernadero (GEI), por mencionar sus principales gases: Dióxido de Carbono, Metano, Óxido Nitroso, gases fluorados entre otros. Estos gases se quedan retenidos en la atmósfera y su aumento representa un 7,1 GT CO₂ lo que es igual a un 14.5%. La ganadería bovina ya sea para la producción de leche o carne, contribuye con dos tercios en la generación de metano provocado por la fermentación ruminal, genera un 30 % de emisiones que es directamente proporcional a la población humana y la economía, al demandar la mayor cantidad de suministros de leche y carne, contribuyendo antropogénicamente al aumento del efecto invernadero (FAO 2018, p. 3).

La acción catabólica de los microorganismos sobre el estiércol produce componentes volátiles y gases que contienen compuestos con características irritantes: (NH₃ y H₂S) así como asfixiantes (CH₄ y CO₂) (Espinosa 2021, p. 3). menciona; los cuerpos de agua como: acuíferos y aguas subterráneas pueden llegar a ser contaminadas con nitratos generados a partir de bacterias nitrificadoras presentes en el estiércol provocando una eutrofización en los cuerpos hídricos producto de la infiltración de la orina de los bovinos.

En Latinoamérica el aprovechamiento del biogás a partir de biodigestores tiene gran influencia en países como: Bolivia, Perú, México, Costa Rica, Nicaragua y Colombia estos se han sumado a estas propuestas que tanto económica y energéticamente son accesibles para la mayoría de los productores ganaderos.

Los productores ganaderos en el Ecuador de acuerdo con el ESPAC mencionan que a nivel nacional hay 4.34 millones de cabezas de ganado vacuno, lo cual comprende un 69.73% son hembras y el 30.27% son machos. Las cabezas de ganado vacuno están distribuidas de acuerdo con las regiones Costa (41.24%), Sierra (49.11%) y Amazonía (9.65%). La raza predominante al número de cabezas es la mestiza con 1.42 millones de cabezas que representa el 32.73%, seguida de la raza criolla con 21.73% (ESPAC 2021, pp. 39-41).

La Finca Castillo localizada en la parroquia San Juan, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo, cuenta con 50 ejemplares (27 vacas, 12 vaconas, 2 toros, 4 terneros y 5 terneras). En la finca el

estiércol generado es usado únicamente para abonar las plantaciones de la propiedad, razón por lo cual se puede aprovechar el estiércol generado para la producción de biogás además de un subproducto líquido como biol para usar en las plantaciones de la finca.

1.2 Justificación

Técnica

El uso y aprovechamiento del estiércol para abonar los terrenos es una práctica no tecnificada desde nuestros ancestros, esto ha generado la contaminación del agua, suelo y la atmósfera.

En el presente proyecto de titulación postula un diseño de biodigestor anaerobio para el aprovechamiento del estiércol generado para la producción de biogás, gestionando de mejor manera estos residuos.

Económica

Ecuador al implementar este tipo de sistemas trae consigo limitantes al momento de llevar a cabo dicho proyecto, ya sea por factores: económico, social o político. La utilización del biogás dependiendo del uso puede ser empleado: para generación de electricidad, así como un reemplazante del gas de cocina que en el caso de familias rurales cocinan a leña, dañando su salud, permite una disminución de la tala de árboles que indirectamente generan una deforestación al ambiente.

Metodológica

En nuestro país ya se está trabajando en proyectos para la obtención del biogás para producir energía eléctrica, algunos de ellos son: el relleno sanitario Minas de Huascachaca en el cantón Santa Elena, Azuay que para el año 2023 plantean tener una generación de 642 KW abasteciendo a la red eléctrica local. Otro ejemplo es el relleno sanitario Pichacay en la ciudad de Cuenca con el mismo propósito aprovechar el biogás para la generación de electricidad (Durazno, 2018).

Para que la producción de biogás sea óptima es necesario tomar en cuenta varios parámetros como: la temperatura, pH, tiempo de retención en el digestor anaerobio, DQO, DBO, entre otros ya que los microorganismos anaerobios son eficientes a condiciones específicas, de no cumplirlas podrían provocar una desestabilización en las bacterias generadoras de metano.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Diseñar un biodigestor anaerobio para producir biogás a partir del estiércol de ganado bovino para la Finca Castillo-Parroquia San Juan.

1.3.2 Objetivos específicos

- Experimentar en un biodigestor prototipo para la demostración de la producción de la generación de biogás a partir del estiércol bovino.
- Generar propuestas de biodigestores anaerobios que se acople a las condiciones climáticas del sector para su óptimo funcionamiento.
- Diseñar un biodigestor anaerobio que abastezca las necesidades de la Finca Castillo de Altura de acuerdo con las condiciones climáticas que presenta el lugar.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Impacto ambiental de actividades agropecuarias

El impacto ambiental de las actividades agropecuarias sigue en aumento. Según la FAO, equivalen al 40% de la producción agrícola mundial, contribuyendo al aumento de gases de efecto invernadero. Este sector aporta un 18 % más que el sector de transporte en emisión de gases. Además, se espera que la producción cárnica a nivel mundial aumente de 229 millones de toneladas (1999/2001) a 456 millones de toneladas para 2050, de la misma manera la producción lechera tendrá un incremento en el mismo periodo incrementando de 580 a 1043 millones de toneladas (Corral et al. 2021, pp. 2-3).

En Ecuador, la producción agropecuaria experimentó un auge a partir de 1980, gracias a la introducción de razas asiáticas y europeas. Los pastores y campesinos dedicados a la producción de leche y carne obtienen ingresos extras, sin embargo, surgen algunos problemas como: la deforestación y pérdida de praderas, páramos donde pastorean al ganado. El Estado debe realizar acciones respecto a la protección de la biodiversidad, abastecimiento de agua y retención de carbono mediante incentivos que generen beneficios ambientales y sociales (FAO 2018, p. 7).

La ganadería en Ecuador es un generador económico importante. Según el MAGAP, se estima que 3.1 millones de hectáreas son aptas para pastoreo, y actualmente 4.5 millones de hectáreas ya son utilizadas con ese fin. Un ejemplo es la provincia de Santo Domingo, ya que su demanda de leche y carne representa el 20% del mercado, siendo una de las ferias más grandes del país (Corral et al. 2021, p. 3).

Además, se estima que los ganaderos pequeños y medianos representan el 95.5% de las unidades productivas agropecuarias que suministran al menos 20 hectáreas lo que equivale 41% de la producción lechera. Las superficies de pastizales para esta actividad corresponden a un 44,63% de tipo cultivable y 12,46 % de tipo natural, según (FAO 2020).

2.1.1 *Afectaciones al suelo*

En el mundo los cultivos de pasto tienen un 20 % de hectáreas en los últimos años, el avance de la frontera agrícola ha sido de manera desmesurada, ya que gran parte de los pastizales han sido

destruidos para estar destinados al pastoreo provocando la pérdida de la compactación de los suelos y posibilidad de erosión (Osejos et al. 2018, pp. 4-5).

Las actividades ganaderas han generado un impacto en el balance de carbono de la Tierra, ya que, al despejar áreas con pastizales, liberan carbono a la atmósfera. Según (Haro y Gómez 2018, p. 21), alrededor del 70% de las áreas de pastoreo en América Latina están experimentando procesos de degradación debido a la deforestación y pastoreo. Por esta razón se deben generar prácticas de conservación por parte de las poblaciones ganaderas que se dedican a este tipo de actividades.

2.1.2 Afecciones sobre el agua

La actividad ganadera demanda gran cantidad de agua en el mundo, se estima que el 10% se ocupa para esta actividad. De igual forma al existir precipitación y el estiércol no está debidamente almacenado puede llegar a contaminar los arrecifes de coral, acuíferos, cuencas hídricas debido a las infiltraciones (Medina et al. 2022, p. 2).

Las prácticas ganaderas al no tener una gestión adecuada en el almacenamiento y disposición final del estiércol generan una sobrefertilización en los suelos y con la posibilidad de contaminar a fuentes de agua dulce (Ayala, Jijón y Chacha 2022, p. 2).

2.1.3 Afecciones sobre el aire

La ganadería ha generado emisiones de dióxido de carbono en mayor proporción en relación con las industrias del transporte de acuerdo con la FAO “Livestock Long Shadow” (2006), a estos le siguen gases como: metano, óxido nitroso, entre otros que afectan a la capa de ozono y contribuyen al efecto invernadero. Los monogástricos y rumiantes también emiten metano del proceso de fermentación por parte microorganismos que degradan de los alimentos fibrosos en sus estómagos (Silvan, Galindo y Pampillón 2018, p. 2).

2.2 Proceso de digestión anaerobia en el biorreactor

El proceso de digestión anaerobia en el reactor es la transformación de la materia orgánica a subproductos con valores energéticos, mediante una serie de controles a parámetros como: pH, temperatura, tipo de sustratos, DQO, DBO, ST, SV, entre otros que son necesarios para que genere este proceso. Los agentes microbianos juegan un papel importante en la biotransformación de los residuos orgánicos, estos se pueden desarrollar en ambientes con o sin ausencia de oxígeno.

2.2.1 Digestión aerobia

En este proceso los microorganismos interactúan con la materia orgánica en presencia de oxígeno, de esta manera transforma a productos finales simples como dióxido de carbono y agua. La población de microorganismos está limitada de acuerdo con su reproducción por el consumo de oxígeno requerido para la síntesis de la materia orgánica (Cirujeda 2019, p. 106).

Al oxidar la materia orgánica genera una disminución del crecimiento bacteriano, el carbono orgánico se hace limitante, sin embargo, la digestión aeróbica tiene varias ventajas:

- No genera olores molestos.
- Reduce la cantidad de coliformes fecales.
- Producen sobrenadante clarificado con baja de DBO.
- Son usadas para tratar las plantas de aguas residuales.

Desventajas:

- Los gastos operativos derivados del consumo de energía.
- Necesita de áreas grandes para su construcción.

2.2.2 Digestión anaeróbica

En este proceso, la degradación del material orgánico proveniente de animales y vegetales se produce en carencia de oxígeno mediante la interacción de microorganismos anaerobios necesarios para la producción de biogás y residuos sólidos aprovechables (Cabos et al. 2019).

Más del 90% de la energía es producida por la oxidación directa transformada en metano que puede ser usado como biogás. Esta tecnología permite gestionar los residuos orgánicos adecuadamente y sacar un aprovechamiento de estos, mediante la producción de biol que puede ser usado como un biofertilizante para uso en la agricultura, ayudando en la generación de energías renovables y minimizando los residuos y principalmente las emisiones de efecto invernadero (Gutiérrez, Peña y Hernani 2018, p. 2).

2.2.3 Etapas de la fermentación metanogénica

La fermentación metanogénica es originada por microorganismos seleccionados durante el proceso de degradación de la materia orgánica en un medio anaerobio de acuerdo con las siguientes etapas:

1. Hidrólisis.
2. Fermentativa o Acidogénica.
3. Acetogénica.
4. Metanogénica.

2.2.3.1 Hidrólisis.

En esta etapa las moléculas complejas (macromoléculas) como: proteínas, carbohidratos y lípidos son hidrolizados por enzimas producidas por microorganismos ácido-génicos o fermentativos, dando lugar a compuestos solubles simples. Estos son degradados a su forma monomérica: aminoácidos, azúcares y ácidos grasos. Dichos compuestos son metabolizados por bacterias acidogénicas produciendo cadenas cortas de ácidos grasos, dióxido de carbono y alcoholes (Benitez et al. 2020, p. 8).

En el caso de las proteínas estas son hidrolizadas mediante la enzima proteasa obteniendo su unidad base de aminoácidos y péptidos contribuyendo en fuentes de carbono y energía. La degradación de los lípidos está dado por enzimas hidrolíticas llamadas lipasas, estas sintetizan a ácidos grasos de cadena larga y glicerol. Este tipo de procesos son lentos, un ejemplo la lignina es muy resistente a la degradación por microorganismos anaerobios lo que afecta la biodegradabilidad de hemicelulosa celulosa y otros hidratos de carbono. Entre los factores que afectan a la hidrólisis: tamaño de partícula, la temperatura y tipo de sustrato (Parra et al 2019, p. 2).

2.2.3.2 Etapa fermentativa o acidogénica

En esta etapa los productos hidrolíticos son catabolizados por bacterias acidogénicas las cuales fermentan a ácidos orgánicos más simples como: ácido acético, ácido láctico, ácido propiónico, ácido valérico, ácido butírico, dióxido de carbono y alcoholes como etanol y metanol entre otros, amoniaco e hidrogeno. En dicho proceso también se encuentran las bacterias anaerobias facultativas que hacen uso de oxígeno y carbono (Gutiérrez et al. 2018, p. 3).

2.2.3.3 Etapa acetogénica

Los productos de la etapa permiten la metabolización por bacterias metanogénicas, de no ser posible interactúan las bacterias acetogénicas que degradan a productos más sencillos como acetato e hidrogeno; entre los microorganismos que realizan esta función se tiene: *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*.

Existen microorganismos especiales que forma parte de los acetogénicos llamados homoacetogénicos, pueden crecer heterogéneamente en presencia de azúcares produciendo únicamente acetato, estos trabajan en forma sintrófica con metanógenos hidrogenotróficos eliminando el hidrogeno usado en la producción de metano. Este proceso representa la eficiencia del 70% del metano generado del acetato, que a su vez también forma un 11% de hidrogeno (Gutiérrez et al. 2018, p. 3).

2.2.3.4 Etapa metanogénica

El metano puede ser obtenido por dos vías de metanógenos: a) mediante metanógenos acetoclásticos que producen metano a partir de ácido acético y la b) por metanógenos hidrogenotróficos que usan hidrogeno para reducir el dióxido de carbono (Gutiérrez et al. 2018, p. 3).

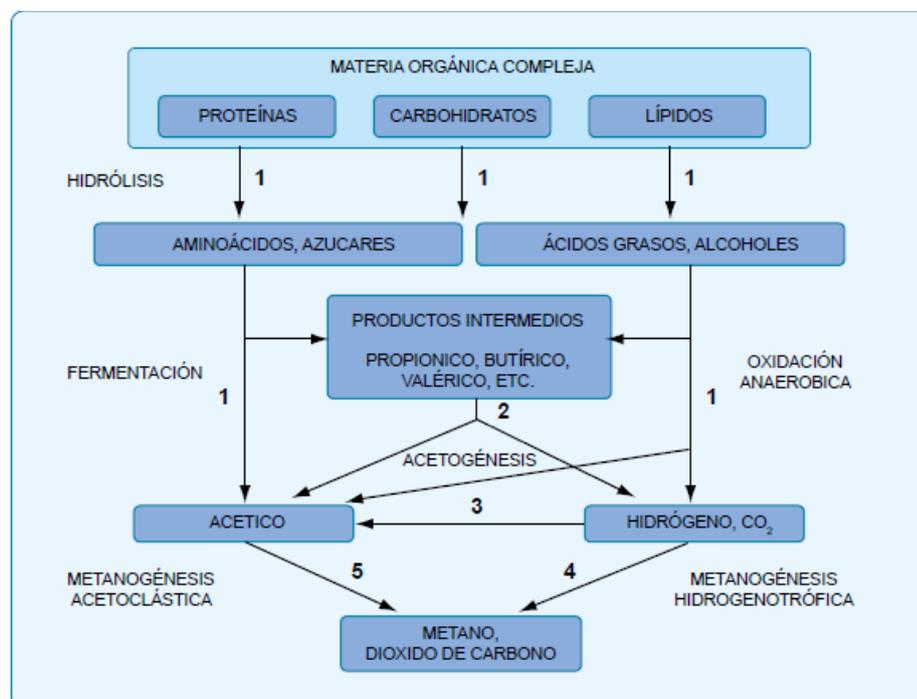


Ilustración 2-1: Descripción del proceso de digestión anaerobia

Fuente: Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991

2.3 Residuos ganaderos y agroindustriales

2.3.1 Actividades ganaderas

El sector agropecuario en el Ecuador genera gran parte de los ingresos económicos y alimenticios, sin embargo, una mala gestión de estos provoca problemas a la biodiversidad, un claro ejemplo son las provincias como: Manabí, Guayas, Imbabura, Loja y Napo, son afectadas por esta problemática ya que han presentado grandes niveles de deforestación y desertificación en sus áreas (Chamba et al. 2020, p. 2).

Los problemas ambientales según González están relacionados con la actividad humana según datos estadísticos se estima que desde 1990 alrededor de 19.000 Km² los bosques del país han disminuido su cobertura en un 69.6% de la superficie y para el año 2000 se obtuvo un 63.5%. Esta problemática se debe a que millones de hectáreas han sido explotadas por la quema y tala de los bosques, cambio de uso de suelo, pérdida de hábitat y de la biodiversidad atenuante a la contaminación ambiental (Chamba et al. 2020, p. 3).

De acuerdo con los datos del ESPAC (2020), la mayoría de la población ganadera en Ecuador se dedica a criar bovinos, con un total de 4.34 millones de cabezas en todo el país, principalmente en las regiones de la Costa y la Sierra. Los residuos producidos de esta actividad podrían generar importantes ahorros económicos en la compra de combustibles para cocinar y calentar. Además, también se puede obtener un biofertilizante que sería beneficioso para mejorar el rendimiento de los cultivos (ESPAC 2021, p. 39).

2.3.2 Actividades agroindustriales

Los desechos agroindustriales son materiales que se obtienen del consumo directo de la materia primaria o de la industrialización, pueden estar en estado sólido o líquido. Las características que presentan estos residuos dependerán del proceso de manufactura y la materia prima (Vargas y Pérez 2018).

La gestión inadecuada de este tipo de residuos ha sido ya varios años e inclusive décadas en lo que respecta a su disposición final. Mayormente son destinadas a botaderos a cielo abierto, superficies de terrenos vacíos secos, o arrastrados por el viento. Provocando contaminación a cauces de los ríos y a su vez generando un mal aspecto lo que es la calidad paisajística (Riera, Maldonado y Palma 2019, pp. 5-6).

La estructura agrícola en el país registra 28 cultivos principales para el año 2018 en la que tuvo una producción de 2300 millones de kilogramos según el MAG (2018) en la siguiente tabla se detalla tanto la producción importación y exportación de cada uno de los cultivos (Riera, Maldonado y Palma 2019, p. 6).

Tabla 2-1: Principales cultivos registrados en el 2018 del sector agroindustrial

Cultivo	Producción (Kg)	Importación (Kg)	Exportación (Kg)
Caña de azúcar para azúcar (tallo fresco)	9030074000	129429000	84075000
Banano (fruta fresca)	6282105000	0	6091645000
Palma aceitera (fruta fresca)	3275993000	863000	332724000
Maíz duro seco (grano fresco)	1474048000	93794000	34000
Arroz (en cáscara)	1440865000	149000	447000
Plátano (fruta fresca)	763820000	508000	161018000
Papa (tubérculo fresco)	377243000	10795000	459000
Cacao (almendra seca)	205955000	7087000	306814000
Naranja (fruta fresca)	142546000	14671000	0
Brócoli	114272000	ND	67234000

Fuente: Riera, Maldonado y Palma 2019, p. 6

Tabla 2-2: Sector manufacturero dedicado a la industria según los datos del INEC, 2017

Rubro	Nº de empresas
Productos de molinería	1110
Conservación de frutas y hortalizas	666
Cacao, chocolate y confitería	482
Aceites y grasas	332
Azúcar	150
Almidones y derivados	27

Fuente: Riera, Maldonado y Palma 2019, p. 7

Ecuador en el manejo de los residuos orgánicos tiene cierto déficit, por lo general la población los quema o su disposición final no está de acuerdo con los contenedores específicos. Investigaciones recientes orientadas a la obtención de subproductos a partir de los residuos agroindustriales. Estos subproductos incluyen la producción de biodiesel (Monteros-Rodríguez, et al.,

2016), bioetanol (Sosa-Romero, et al., 2016), biogás (López & Borzacconi, 2017), pellets sólidos como fuente de energía (Valdés et al., 2018). Además, se ha tenido éxito en la obtención de alimentos para animales (Godoy et al., 2018), abono orgánico (Gavilanes-Terán et al., 2017, Giménez et al., 2019, Morales et al., 2016), enzimas (Bharathiraja, et al., 2017, Pinotti et al., 2017), bioadsorbentes (Furlan et al., 2018, Almendros et al., 2015), bioaceites (Bispo et al., 2016), biosurfactantes (Magallanes et al., 2018), materiales de construcción (Cravo et al., 2017, Olajide, 2019), matrices poliméricas (Navas et al., 2015), entre otros, citado de (Riera, Maldonado y Palma 2019, p. 3).

2.4 Digestores o biorreactores

De acuerdo con la literatura de García Cepeda & Rodríguez, reportan que la construcción del primer biodigestor fue en el año 1980 en la India y para el año de 1996 se realizó la construcción de un biodigestor a escala real. Varios países europeos se sumaron a esta iniciativa como en: Exeter, Inglaterra que usaban los lodos cloacales de la ciudad y eran montados en los digestores para la fermentación y producción biogás, citado de (Hidalgo et al. 2019, p. 4).

En los últimos 20 años la crisis energética y el difícil acceso a combustibles fósiles ha provocado buscar nuevas alternativas para la obtención de energía. Gracias a los avances en la experimentación se ha descubierto el funcionamiento del proceso microbiológico que generan los microorganismos en ausencia de oxígeno obteniendo subproductos como el biogás y generar una alternativa para tratar los residuos (Hidalgo et al. 2019, p. 4).

Tal fue el impacto del uso de biodigestores que más países se sumaron, entre ellos: China, India, Francia, Holanda, Suiza, Estados Unidos, Gran Bretaña, Filipinas y Alemania. Buscaron nuevos usos para el tratamiento de residuos industriales diseñando reactores con dimensiones de más de 1000 m³ de capacidad y trabajando a temperaturas termófilas de 20 °C a 40 °C, bajo controles de operación como: sistemas de control, dosificación y conectados a equipos de cogeneración (Hidalgo et al. 2019, p. 4).

Dado que Ecuador cuenta con una diversidad climática que incluye zonas: subtropicales, templadas y frías, es necesario realizar un estudio de varios factores que inciden en el proceso para implementar este tipo de sistemas. Un proyecto piloto inició en el año 2005 en el uso de esta tecnología según la CEDECAP (2017), y Martí Herrero (2014) mencionan que son accesibles los materiales en el mercado ecuatoriano para la construcción de un biodigestor tubular ya que su costo de inversión es bajo y es fácil de manejar.

Se experimentó con 320 digestores instalados en varias regiones usando como sustrato varios tipos de residuos generados tanto por animales y desechos domésticos orgánicos para producir biogás principalmente y como su producto el uso del biol como fertilizante para sus terrenos (Hidalgo et al. 2019, p. 3).

2.5 Tipos de biodigestores

Continuos

Este tipo de biodigestor opera continuamente, pues es necesario alimentar y descargar al mismo de acuerdo con el tiempo de retención establecido.

Ventajas:

- Tratamiento para aguas residuales.
- Se usan para plantas de gran capacidad industrial, usando equipos comerciales para alimentarlos, necesariamente necesita de calefacción y agitación para la producción de biogás ya que genera gran cantidad.

Semi continuos

En este tipo de biodigestor se introduce la materia prima necesaria una vez hasta que se establezca, para las posteriores cargas se realizarán en base al cálculo del tiempo de retención hidráulico. Su descarga es regular en misma cantidad de afluente que se incorporó.

Aplicaciones:

- Tipo de construcción especialmente para medio rural.
- Aprovechamiento en sistemas pequeños para uso doméstico como cocina y calefacción.

Discontinuos o del régimen estacionario

Este tipo de biodigestores operan cada cierto tiempo, es decir con las materias primas que se incorporen después de una sola carga, de tal forma que puede decaer el rendimiento del biogás terminada la materia orgánica. Es necesario vaciar el biorreactor y cargar nuevamente para que se dé el proceso de fermentación y la obtención del biogás.

2.6 Modelos de biodigestores

2.6.1 Modelo chino

Son un tipo de tanques cilíndricos con techo y piso en forma de domo construido bajo el suelo. Los residuos agrícolas compostados al ser mezclados con lodos y residuos de animales pueden ser usados como alimentación diaria del biodigestor. Una característica este tipo de biodigestor es que no necesita de un gasómetro por lo que el biogás se almacena dentro del sistema (Parra et al. 2019, p. 4).

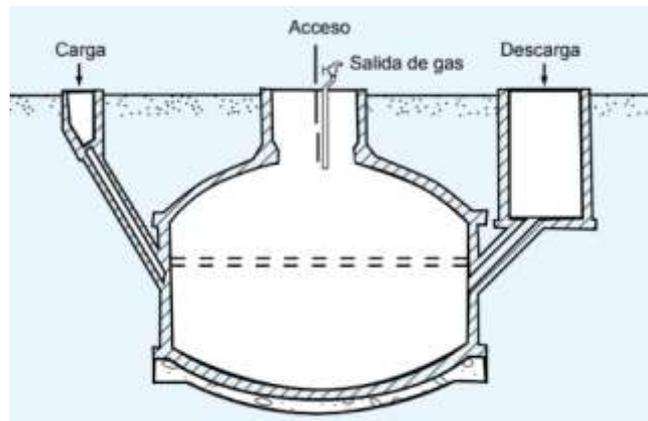


Ilustración 2-2: Biodigestor modelo Chino

Fuente: Parra et al. 2019, p. 4

Después del proceso de fermentación se obtiene el líquido a través del tubo de salida, contiene gran carga de nutrientes y minerales que puede ser almacenado dentro de un año y usarse en los campos de cultivo.

Ventajas:

- Excelente para la producción de biol ya que tiene tiempos de retención largos de 30 a 60 días.
- Alcanzan una eficiencia del 50% de reducción de la materia orgánica.
- Su estructura es sólida y duradera, lo que facilita la integración de sistemas de agitación.

2.6.2 Modelo indiano

Este tipo de sistema cuenta con un gasómetro incorporado en su sistema ubicado en la parte superior del pozo. Tiene una campana donde se almacena el gas, en lo que respecta a la carga se

lo hace una vez al día por gravedad de acuerdo con el tiempo de retención. Genera una carga constante más o menos de biogás manteniéndose las condiciones de operación según Hilbert y Eppel (2007); citados en (Nsair et al. 2020, pp. 1-2).

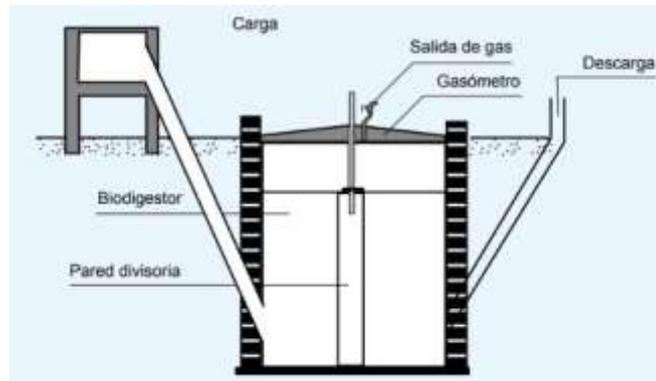


Ilustración 2-3: Biodigestor modelo Indiano

Fuente: MINENERGIA et al. 2011, p. 99

2.6.3 Biodigestor tubular o taiwanés

Estos biodigestores tubulares son fabricados con diferentes tipos de geomembranas sujetas al tipo de material, grosor, durabilidad, características y costos, entre los más usados se tiene: policloruro de vinilo (PCV), etileno propileno dieno tipo M (EPDM) o polietileno de alta densidad (DPA).

Este tipo de biodigestores son tubos enterrados largos que de acuerdo con la carga que se le asigne el líquido ingresa conforme avanza la carga diaria y saldrá por el tubo de salida de acuerdo con cómo avanza el tiempo de retención (Pimentel López et al. 2019, p. 2).



Ilustración 2-4: Biodigestor modelo tubular.

Fuente: Pimentel López et al. 2019, p. 3

Ventajas:

- Son de fácil instalación y movilidad.

- Puede contener varios metros cúbicos de biogás.
- Son económicos y accesibles a la población.
- Costos de operación relativamente bajos.
- Puede ser usado a cualquier condición climática con una adecuada selección de sus materiales para la construcción.

2.7 Productos para obtener del proceso de digestión anaerobia

2.7.1 Biol

En la actualidad el sector agrícola hace uso de fertilizantes químicos para el desarrollo y cuidado de las plantaciones, sin embargo, la aplicación no medida o técnica pueden causar toxicidad al suelo principalmente, además su costo es elevado y en muchos de los casos la falta de asesoría hacia los agricultores sobre la aplicación de estos y los daños que generan a la salud de los consumidores al usar este tipo de productos sintéticos se hace alarmante (Karki et al. 2021, p. 2).

Las excretas de los animales son una alternativa que puede sustituir al uso de los fertilizantes sintéticos, se conoce como biol y cuentan con una gran carga orgánica, libre de agentes químicos que pueden llegar a ser tóxicos a la salud y al suelo.

Usar estiércol de animales como fuente de materia prima para la formación del biol evita que genere contaminación a cuerpos de agua, aire y suelo por sobrecarga de nutrientes. El fertilizante producido contiene: fósforo (1 a 2%), potasio (1%), nitrógeno (2 a 3%) y materia orgánica (85% con pH=7.5 (Pimentel López et al. 2019, p. 4).

Aplicaciones del Biol:

- Puede ser usado para la preparación de suelos, para arar,
- Si se desea sembrar se puede crear una solución entre el fertilizante y agua con una relación 1:1 por un tiempo de cuatro o 5 horas en el cual se colocarán las semillas o granos que se van a sembrar para un mejor desarrollo durante su germinación.
- Sirve para fumigar un sembrío después de una helada, también se lo puede aplicar después que se desarrolle el fruto, pero se debe tener cuidado en la etapa de floración ya que su aplicación podría quemar a la planta (Pimentel López et al. 2019, pp. 4-5).

2.7.2 Biogás

El subproducto generado del proceso de fermentación de la materia orgánica es metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) seguido de otros gases en menor proporción. Es importante resaltar que la presencia de sulfuro de hidrógeno (H₂S) disminuye la cantidad de biogás, ya que afecta directamente a las bacterias metanogénicas encargadas de la producción de metano, además que desprende un olor a “huevo podrido” y puede llegar a ser corrosivo y dañar las instalaciones (Gutiérrez, Peña y Hernani 2018, p. 2).

Tabla 2-3: Características generales del biogás.

Composición	55-70% metano (CH₄) 30-45 % dióxido de carbono (CO₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de exposición	6 – 12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kgm ⁻³
Olor	Huevo podrido (olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Fuente: Deublein y Steinhäuser, 2008 citado; Gutiérrez, Peña y Hernani 2018, p. 2

Según Lozano et al. (2020) varios factores son determinantes para la obtención de biogás: entre ellos: el pH juega un papel muy importante, ya que permite identificar la limitación, toxicidad y crecimiento bacteriano durante el proceso. Es necesario que durante el proceso de la fermentación anaerobia se encuentre en los rangos establecidos o cerca la neutralidad comprendida entre 6 y 7,4 (Mamani et al. 2021, p. 2).

2.8 Purificación del biogás

El sulfuro de hidrógeno es un compuesto que afecta en el rendimiento del biogás y los equipos de conducción. Es necesario dar un tratamiento al biogás antes de ser usado, para ello se mencionan los siguientes tratamientos los cuales son económicos y ayuda generar una mejor calidad de biogás.

La purificación del biogás mejor el rendimiento en los siguientes casos: a) para mejorar el poder calorífico del biogás y b) para abastecer los requerimientos energéticos como: motores, calderas, etcétera.

Agregando cloruro ferroso o férrico en la alimentación del biodigestor dichas áreas metálicas permiten evitar que el sulfuro se libere con el biogás por formación de sales insolubles. El uso combinado de sales férricas y ferrosas genera una mayor eficiencia para controlar el sulfuro (Jaimes-Estévez et al. 2020, p. 13).

Filtros de absorción: aquí el biogás se circula a contracorriente al mismo que se da un tratamiento en solución de hidróxido de sodio disuelta en agua filtros de adsorción: aquí se realiza un proceso de filtrado usando carbón activado y limaduras de hierro. La desventaja de estos filtros es que depende de la humedad y temperatura.

2.9 Aplicaciones y usos del biogás

- Usados a pequeña y mediana escala principalmente para la obtención de energía térmica, dicha energía calórica, permite realizar actividades diarias en el hogar, calentar el agua principalmente dependiendo de la cantidad de biogás que se pueda producir en el biorreactor permitirá hacer uso de lámparas.
- También puede ser usado como combustible para vehículos que sean acondicionados funcionando con gas natural, el motor de combustión interna, pero tiene una desventaja trabaja baja velocidad de encendido (Mamani et al. 2021, p. 8).

Ventajas:

- Combustible limpio que no afecta la salud en especial a vías respiratorias al momento de realizar la cocción de los alimentos.
- Puede ser usado para la calefacción o generar iluminación.
- Al producir biogás mediante los residuos orgánicos se contribuye a combatir la contaminación ambiental.
- La construcción de los biodigestores no es compleja y tanto su costo de operación y mantenimiento es económico.

Desventajas:

- En nuestro país la construcción de plantas de biogás no se encuentra dentro de los programas de tratamiento de desechos sólidos orgánicos.
- Dependiendo del tiempo de retención puede necesitar de un área grande para su instalación.
- Es necesario contar con grandes cantidades de desechos sólidos orgánicos, así como cierta cantidad de agua para el proceso de mezclado (Mamani et al. 2021, p. 7).

2.10 Parámetros fisicoquímicos de control durante el proceso de la biodigestión anaerobia

Para el correcto funcionamiento de un biodigestor anaerobio se debe tener en cuenta los siguientes parámetros de los cuales determinan el rendimiento potencial que se obtendrá al momento de procesar el biogás y biol.

2.10.1 pH

El control del pH juega un papel importante en la medida de alcalinidad o acidez de la solución, la efectividad de los microorganismos metanogénicos para el proceso de la digestión anaerobia se verá afectado en las etapas de fermentación de no tener un control y monitoreo regular, disminuyendo la población microbiana y afectando la producción de biogás.

Para que se genere una fermentación adecuada es necesario controlar el pH en un rango comprendido de 6.0 a 8.0, un descenso o aumento alteran a los microorganismos que actúan dependiendo la etapa que esté realizando. El rango adecuado para las bacterias acidogénicas es de 5.5 a 6.5; mientras que las bacterias metanogénicas están de 7.8 a 8.2. Al controlarse a condiciones ideales el rango óptimo para este proceso es 7 como pH neutro (Parra et al 2019, p. 3).

Existe un descenso del pH en la solución cuando aumenta la presión parcial del H_2 alterando a las bacterias que degradan al ácido propiónico y butírico, esto provoca inactividad de los microorganismos metanogénicos generando una acumulación de ácido acético e H_2 . Por otra parte, al aumentar el pH favorece la formación de amoníaco esto es contraproducente porque impide el crecimiento microbiano a elevadas concentraciones lo que dificulta la degradación de propionato.

Un medio para regular el pH presentando una acidez en el proceso anaerobio es disminuir la carga orgánica volumétrica con el fin que los ácidos grasos volátiles se consuman primero, esto permite

llegar a las condiciones normales ideales para la formación del proceso de metanogénesis (Jaimes-Estévez et al. 2020, p. 5).

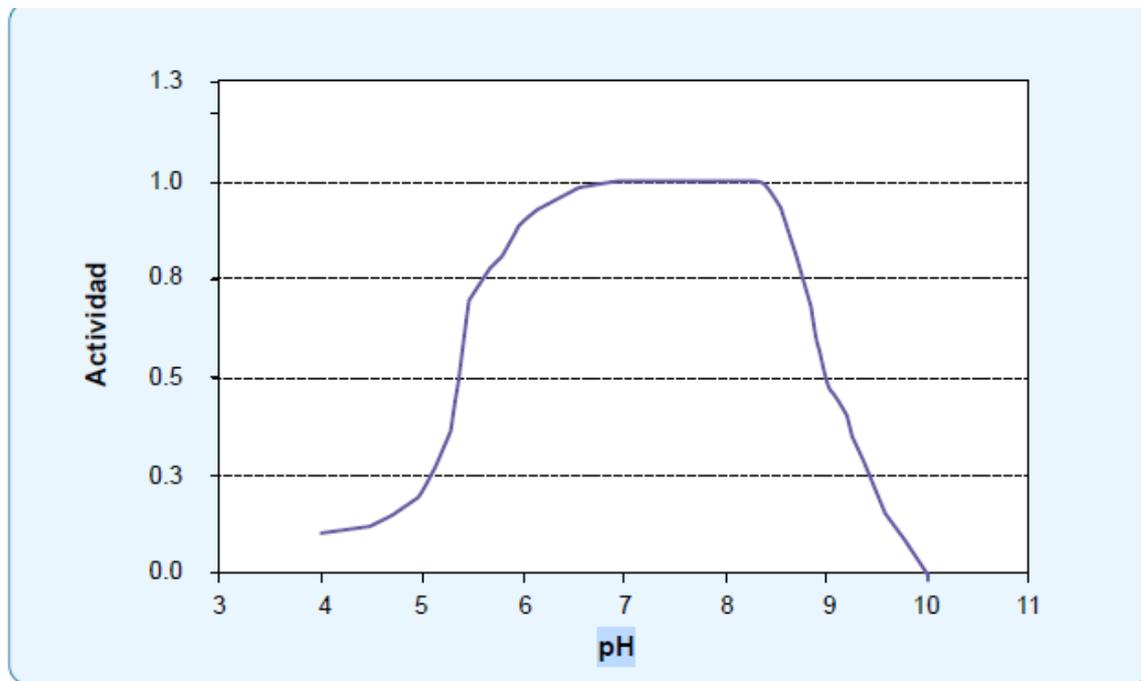


Ilustración 2-5: Dependencia del pH de la actividad metanogénica.

Fuente: Speece (1996)

Los residuos con alto contenido de nitrógeno orgánico como: proteínas que ayudan a la alcalinidad, residuos ricos en carbohidratos (papá, almidón, melaza) no contribuyen a la alcalinidad por la falta de nitrógeno orgánico, es necesario usar un suplemento químico para la alcalinidad. En el biorreactor si se acumulan los ácidos grasos volátiles pueden ser neutralizados por alcalinidad (Parra et al 2019, p. 3).

Entre las varias opciones de suplementos para obtención de alcalinidad para el biodigestor están: bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, hidróxido de amonio, gas de amoníaco, cal, hidróxido de sodio y potasio, 100 del bicarbonato de sodio el ideal por su alta solubilidad y baja toxicidad.

2.10.2 Naturaleza y composición bioquímica de materias primas

Para el aprovechamiento y producción de biogás y biol se puede usar diferentes tipos de residuos orgánicos de origen vegetal, forestal, doméstico, animal, agroindustrial, los cuales se describen en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4: Residuos orgánicos de diversos orígenes.

Residuos de origen animal	"estiércol, orina, guano, camas, residuos de mataderos (sangre y otros), residuos de pescados." ("Manual de Biogás by Marcos Brito - Issuu")
Residuos de origen vegetal	Malezas, rastrojos de cosechas, pajas, forraje en mal estado.
Residuos de origen humano	Heces, basura, orina.
Residuos agroindustriales	Salvado de arroz, orujos, cosetas, melazas, residuos de semillas.
Residuos forestales	Hojas, vástagos, ramas y cortezas.
Residuos de cultivos acuáticos	Algas marinas, jacintos y malezas acuáticas.

Fuente: Varnero y Arellano, 1991

Dichos residuos contienen propiedades y características que permiten una actividad microbiana en un medio anaerobio, aportando con fuentes del carbono y nitrógeno, así como sales minerales (S, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Co, Se, Ni) para los microorganismos.

Para nuestro caso de estudio los estiércoles y lodos cloacales son sustancias ricas en contenido de lignina, por lo que necesitan tener un tratamiento previo (cortado, compostaje) para liberar sustancias con presencia de lignina. La calidad del estiércol dependerá de la alimentación y cuidados que reciban los ganados bovinos y a su vez indica la calidad y rendimiento del biogás (Barreda Del Carpio et al. 2022, p. 2).

La composición en peso seco de la materia orgánica está distribuida en Carbono (48%), Oxígeno (44%), Hidrógeno (7%), n (2%), pero al ser materia orgánica fresca presenta: carbohidratos (50%).

La mezcla de los sustratos será determinada por factores tales como la cantidad de residuos que se generen diariamente, la cantidad de agua que se utilice para diluirlos, la apariencia física, el grado de concentración y las características cuantitativas. El porcentaje de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno (DQO) son indicadores que se deben tener en cuenta para la preparación adecuada.

- **Sustratos de clase 1:** son capaces de degradar en sistema tipo batch o lotes.
- **Sustratos de clase 2:** son fáciles de degradar y se pueden tratar en digestores de mezcla completa operando continuamente.

- **Sustratos de clase 3:** requieren una mayor dilución, son tratados en digestores de alta eficiencia con filtro anaerobio.
- **Estratos de clase 4:** al tener una concentración de DQO alto se debe hacer uso de biodigestores anaerobios de gran eficiencia.

Tabla 2-5: Clasificación de sustratos para la Digestión Anaeróbica

Características	Clase	Tipo de sustrato	Características Cuantitativas
Sólido	1	Basura domestica estiércol solido Restos de cosecha	>20 % ST 40-70 % Fracción orgánica
Lodo altamente contaminado, alta viscosidad	2	Heces de animales	100-150 g/L DQO 5%-10 ST 4% -8% SV
Fluidos con alto contenido de solidos suspendidos (SS)	3	Heces de animales de cría y levante diluido con agua de lavado Aguas residuales	3-17 g/L DQO 1-2 g/L SS
Fluidos muy contaminados sólidos en suspensión	4	Aguas residuales de agroindustrias Aguas negras	5-18 g/L DQO 4-500 g/L DQO

Fuente: Esguerra, 1989

2.10.3 Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO

Se define como la cantidad de oxígeno requerido por microorganismos para metabolizar los compuestos orgánicos oxidándolos para ser usados como energía en procesos de síntesis. En el caso del estiércol es la cantidad de materia orgánica que es biodegradable en condiciones anaerobias (Espinosa 2021, p. 5).

2.10.4 Demanda Química de Oxígeno, DQO

Se refiere a la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos facultativos para oxidar completamente la materia orgánica. En el caso de la producción de biogás es un indicador para la producción de este, es decir al existir un valor alto de DQO existirá una mayor cantidad de biogás. (Benítez et al. 2020, p. 5).

2.10.5 Relación Carbono/ Nitrógeno, C/N

En la producción de biogás los nutrientes no deben estar por encima de los niveles de concentración requeridos, para que los microorganismos realicen la descomposición de los residuos orgánicos. La relación C/N aporta energía por medio carbono, mientras que el nitrógeno cumple con el papel de formación de células nuevas. Estas bacterias utilizan carbono 30 veces más que nitrógeno, por lo tanto, la relación ideal varía de 30:1 a 20:1.

Si la relación C/N (35:1) es muy alta, es decir hay más carbono que nitrógeno los microorganismos no podrán sintetizar suficiente proteínas y aminoácidos debido a la falta de nitrógeno, provocando un tiempo de producción de biogás más largo. Mientras que, si la relación C/N (8; 1) es baja, es decir hay más nitrógeno que carbono la actividad bacteriana inhibe su formación por la presencia de amonio que es tóxico en su proceso (Barreda Del Carpio et al. 2022, p. 5).

$$K = \frac{C1 * Q1 + C2 * Q2 + \dots . Cn * Qn}{N1 * Q1 + N2 * Q2 + \dots . Nn * Qn}$$

K = relación C/N calculado a partir de los sustratos.

C = % de carbono orgánico contenido en cada materia prima.

N = % de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima.

Q = Peso del sustrato fresco a partir de cada kilogramo o tonelada.

2.10.6 Niveles de sólidos totales y sólidos volátiles

En el digestor el porcentaje de sólidos totales juega un papel importante en la movilidad de las bacterias metanogénicas, al existir un alto contenido de sólidos totales puede verse afectado en la producción de biogás. En biodigestores semicontinuos no deben tener más de 12% a 18% de sólidos totales, que ha diferencia en digestores discontinuos tiene un porcentaje de sólidos totales de 40 a 60% continuación se muestra el porcentaje de promedio que tiene los sólidos totales en algunos residuos (Ariza Calvo et al. 2019, p. 4).

Tabla 2-6: Valores promedio de contenidos de solidos totales de diferentes residuos

Materia prima	% solidos Totales
Residuos animales	
Bovinos	13.4 – 56.2
Porcinos	15.0 – 49.0
Aves	26.0 – 92.0
Caprino	83.0 – 92.0
Ovejas	32.0 – 45.0
Conejos	34.7 – 90.8
Equinos	19.0 – 42.9
Excretas humanas	17.0
Residuos vegetales	
Hojas secas	50.0
Rastrojo maíz	77.0
Paja trigo	88.0 – 90.0
Paja arroz	88.8 – 92.6
Leguminosas (paja)	60.0 – 80.0
Tubérculos (hojas)	10.0 – 20.0
Hortalizas (hojas)	10.0 – 15.0
aserrín	74.0 – 80.0

Fuente: Varnero y Arellano, 1991.

2.10.7 Temperatura

Un factor importante en el proceso de la digestión anaerobia de ella depende la velocidad de reacción, crecimiento de los microorganismos. Al aumentar la temperatura, aumenta el crecimiento de los microorganismos, así como mejora el proceso de digestión generando una mayor producción de biogás y biol en poco tiempo.

Existen tres categorías de microorganismos anaerobios que operan un distinto rango de temperatura ya que aquí es donde mejor se desarrollan independientemente en la siguiente tabla se detallan las categorías mencionadas.

Tabla 2-7: Rangos de temperatura de operación en la digestión anaerobia.

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

Fuente: Lagrange, 1979.

El rango psicrófilo ha sido poco estudiado porque requiere un gran tamaño del reactor, es un inestable a los cambios de operación, así como impide la toxicidad de determinados compuestos (Parra et al 2019, p. 4).

Como regla general para un óptimo funcionamiento del biodigestor en el tratamiento anaeróbico se plantea una duplicación de cada incremento en 10°C que esté dentro de la temperatura óptima para que la actividad biológica no se vea alterada.

La combinación de dos etapas en la digestión: la termofílica de elevada carga orgánica y la mesófila como en la recarga, al combinar ambas se aprovechan el sistema termofílico, reduciendo los problemas de inestabilidad. Por otra parte, al aumentar la temperatura favorece la transferencia líquido-gas en gases como NH₃, H₂ y H₂S por su toxicidad sobre el crecimiento de los microorganismos anaerobios.

La solubilidad de los gases desciende al aumentar la temperatura lo que provocaría un aumento en el pH llegando a desestabilizar el sistema. La viscosidad de sólido y semisólidos disminuye al aumentar la temperatura esto es positiva en sistemas que usen agitación ya que los costos de operación serán menores (Gutiérrez et al 2018, p. 4-5).

2.10.8 Tiempo de retención hidráulico y velocidad de carga

Al hablar de estos dos factores tanto tiempo de retención hidráulico y velocidad de carga también, es importante mencionar las características fisicoquímicas del sustrato ya que de ello dependerán los parámetros de diseño para el volumen del biodigestor. Al trabajar con residuos de animales el contenido de materia seca no debe ser mayor al 10% de la mezcla entre agua y estiércol por lo que es necesario diluir el estiércol seco antes de ingresar al biorreactor.

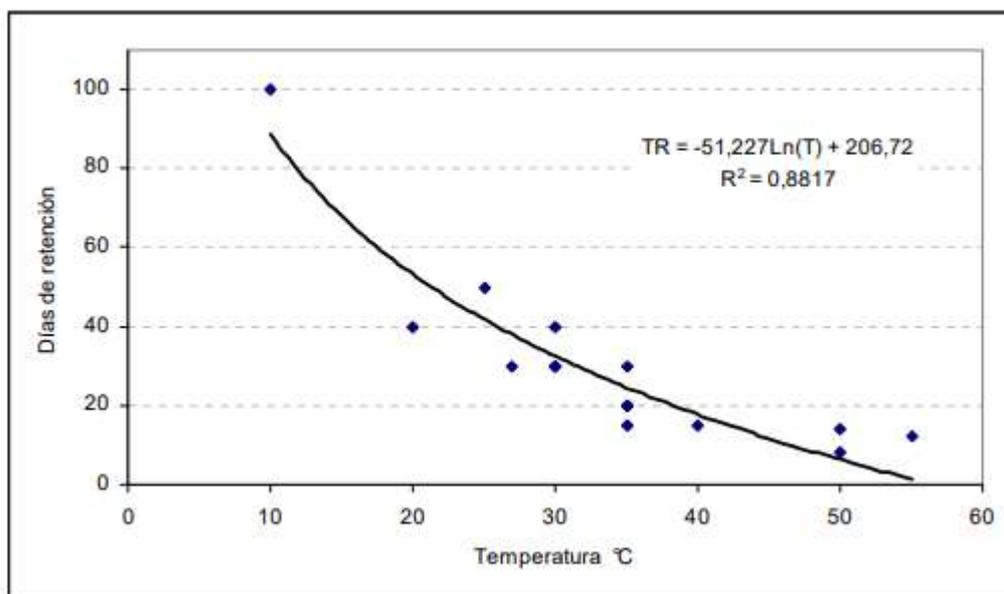


Ilustración 2-6: Tiempo de retención en función de la temperatura

Fuente: (UPME 2003, p. 19)

La producción de biogás se determina de acuerdo con el volumen producido por unidad de peso de materia seca o sólidos totales. La fermentación de biogás requiere una concentración de materia seca de 1% al 30%. Las bacterias requieren un cierto tiempo para degradar la materia orgánica que está su vez depende o está correlacionado con la temperatura, como se mencionó en el ítem 2.10.7. Al aumentar la temperatura menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener biogás, en la siguiente tabla se muestran el tiempo de retención hidráulico en distintas a regiones (Barrena et al. 2019, p. 5).

Tabla 2-8: Tiempo de retención hidráulico en distintas regiones

Tiempo de retención hidráulico	Características
30-40 días	Clima tropical con regiones planas. Ej. Indonesia, Venezuela, América Central
40-60 días	Regiones cálidas con inviernos fríos cortos. Ej. India, Filipinas, Etiopía
60 a 90 días	Clima temperado con inviernos fríos. Ej. China, Corea, Turquía.

Fuente: Varnero, 1991

2.10.9 Nutrientes (niveles de sales)

Se requiere de macronutrientes (N y P) y micronutrientes (minerales traza) para que se genere el proceso anaeróbico de la síntesis de biomasa nueva. La cantidad de N y P se calcula teóricamente

mediante la fórmula empírica de una célula bacteriana anaerobia como $C_5H_7O_2N$, la masa celular aproximadamente 12% N, significa 12 g de N que requiere por cada 100 g de biomas anaerobia producida.

La demanda de P corresponde a $1/7 - 1/5$ de la demanda de N. En términos generales se considera un margen del 10% de DQO removida en el proceso anaerobio, la cual se utiliza para la síntesis de biomasa. Metales traza como: Mo, Se, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn, Tg y B a niveles de mg/L y vitamina B12 en niveles $\mu\text{g/L}$ mejoran la producción de metano (Barreda Del Carpio et al. 2022, p. 5).

2.10.10 Tóxicos de inhibidores de la metanogénesis

2.10.10.1 Ácidos grasos volátiles, (AGV)

Son productos intermedios durante el proceso anaeróbico que sirven como sistema de control. Durante la degradación la materia orgánica compleja es hidrolizada y es transformada en compuestos de bajo peso molecular incluyendo ácidos grasos de cadena corta (incluyen ácido acético, propiónico y butírico).

Cuando se interrumpe la relación simbiótica entre microorganismos acidogénicos y metanogénicos, los ácidos grasos volátiles tienden a acumularse. Esto genera una inhibición de los microorganismos metanogénicos debido a la toxicidad de algunos compuestos como sulfuro, amoníaco, metales pesados, etc. Además, los cambios en las condiciones ambientales, pH, temperatura.

2.10.10.2 Hidrógeno

Durante el proceso de la digestión anaerobia se produce una acumulación de hidrogeno que puede provocar la inhibición de la acetogénesis, provocando un aumento de ácidos grasos volátiles con más de 2 átomos de carbono (Parra et al. 2019, p. 2).

2.10.10.3 Nitrógeno amoniacal.

Puede estar presente en los sustratos o producirse cuando se dé la degradación anaerobia de compuestos nitrogenados como proteínas o aminoácidos. Se sabe que un 16% de N se encuentran en las proteínas, el nitrógeno orgánico es hidrolizado formando amoniacales. Sí el nitrógeno

amoniaco aumenta puede llegar a afectar el crecimiento bacteriano, así como limitar su crecimiento (Ávila et al. 2022, p. 2).

2.10.10.4 Sulfatos y sulfuros

El contenido de sulfatos puede generar una competencia entre las bacterias metanogénicas y los sulfatos reductores por los sustratos (acetato e hidrógeno), lo que afectaría en la proporción de ácido sulfhídrico y metano en el biogás producido durante el proceso de fermentación. El sulfuro al ser un inhibidor tiene un olor característico a huevo podrido se define ya que contiene azufre (proteínas) (Castro et al. 2020, p. 2).

2.10.11 Promotores de la metanogénesis

Las reacciones generadas en el biodigestor dependen del crecimiento bacteriano estos se sujetan a tres etapas en las cuales los microorganismos sufren un proceso de adaptación en base a las siguientes etapas: (I) arranque, (II) la estabilización y (III) la declinación o muerte. La siguiente figura muestra la curva de crecimiento microbiano. (Castro et al. 2020, p. 2).

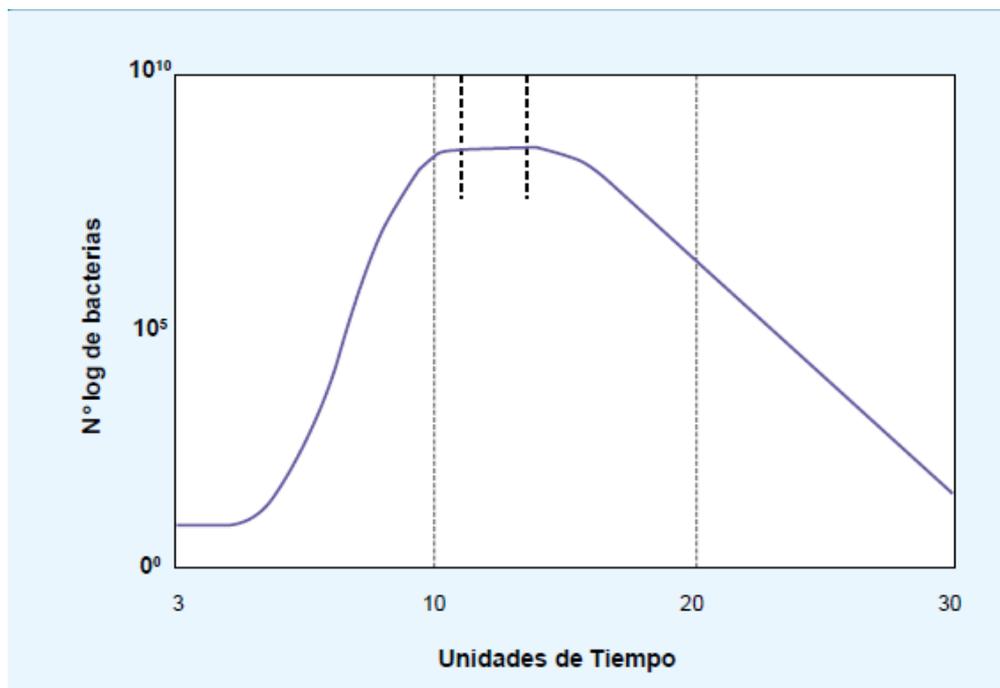


Ilustración 2-7: Crecimiento microbiano dentro de un digestor anaeróbico.

Fuente: MINENERGIA et al. 2011, p. 49

2.11 Dispositivos de control

2.11.1 GPS-6 Multi-use Temperature & Humidity Data Logger

Este dispositivo registra la temperatura y humedad es usado en la industria de los alimentos, farmacéutico, químicos entre otros. Contiene dos sensores: un sensor de temperatura y un sensor de humedad. El usuario puede optar por dos modos de registro de datos: el primero un registro completo y el segundo un registro cíclico, además de poder modificar el intervalo de registro para la temperatura y humedad. De ser necesario viene incorporado con una función de alarma de luz y sonido que se activa una vez que llegue al límite establecido por el usuario (Elitech 2021, p. 1).



Ilustración 2-8: Sensor GPS-6 Multi use Temperature and Humidity Data Logger

Fuente: Elitech 2021, p. 1

Características del equipo:

El dispositivo tiene un rango de medición de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una precisión de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para temperaturas entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, y de $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ para otras temperaturas. Además, su rango de humedad es de 10% a 99% con una precisión de $\pm 3\%$ RH para una humedad del $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y de 20% a 90% RH, y de $\pm 5\%$ RH para otras humedades. La resolución es de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ para temperatura y 0.1% RH para humedad. El dispositivo funciona con una batería de litio CR14505 de 3.6 V de un solo uso o puede ser alimentado a través de USB. Sus dimensiones son de 165 x 99 x 66 mm y puede operar en un rango de temperatura ambiente de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.11.2 M1 USB PDF Temperature Data Logger

Este dispositivo está diseñado para tomar datos a condiciones estrictas como: frigoríficos, el transporte y almacenamiento en cámaras de refrigeración usados como medida de control. Tiene un diseño sencillo, equipado con un puerto USB para una vez instalado y configurado mediante el software se registre los datos de temperatura, según las necesidades del usuario (Gesa Termómetros 2019, p. 1).



Ilustración 2-9: M1 USB PDF Temperature Data Logger.

Fuente: (Gesa Termómetros 2019, p. 1)

Características del equipo:

El dispositivo cuenta con opciones de grabación multiusuario y un sensor NTC interno. Su rango de medición de temperatura va desde $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-22\text{ }^{\circ}\text{F}$ a $158\text{ }^{\circ}\text{F}$) y su precisión de temperatura es de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/0,9\text{ }^{\circ}\text{F}$. La resolución de temperatura es de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$ y puede almacenar hasta 32.000 lecturas. La visualización se realiza a través de una pantalla LCD multifunción. La vida útil de la batería de litio reemplazable es de 1 año y el intervalo de registro es programable desde 10 segundos hasta 24 horas. También dispone de un tipo de alarma para evento único o acumulativo.

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Área de estudio

Se realizó una revisión bibliográfica para el área de estudio en este caso, se usó información descrita dentro del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la parroquia de San Juan, determinando las características geográficas, sociales y culturales que podrían incidir en el estudio.

3.2 Ubicación del lugar

Se determinó la georreferenciación mediante el uso de la aplicación MGRS UTM GPS en la cual se tomó la ubicación para la instalación del biodigestor anaerobio en la finca, así como las características topográficas, la planimetría con el fin que se aproveche la pendiente para la recolección del estiércol y optimizar la mano de obra.

Pasos para descargar la información de la parroquia San Juan.

1. Para la obtención de datos de la parroquia San Juan se tomaron los archivos Shapefile de la base de datos de libre acceso del IGM (Instituto Geográfico Militar) Del Ecuador.
2. Para su búsqueda y descarga se ingresó a la página de CAPAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA BÁSICA DEL IGM DE LIBRE ACCESO (Codificación UTF8):
<http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>
3. En la página que se nos aparece se buscó en la sección de Capas topográficas a escala 1:500000 Formato SHP.
4. Una vez encontrado el archivo de la zona buscada se procedió a descargar, este se descargará en formato Rar (Comprimido), para poder usar los datos descargados se extrajo los datos en la carpeta en la que se va a trabajar.
5. Una vez descargado y extraído los datos se pudo iniciar a trabajar en el programa de elección para el análisis correspondiente ya sea AutoCAD, QGIS, ArcGIS, entre otros.
6. Con la herramienta Go to XY se agrega las coordenadas obtenidas en el Google Earth de la ubicación tanto la altimetría (Y) y la longitud (X) respectivamente.
7. Se selecciona y se da formato al mapa agregando la leyenda, escala y demás componentes.

3.3 Topografía de la finca

En el ámbito topográfico presenta un relieve que se caracteriza por ser irregular. El área es lo suficiente plano con una pendiente aceptable para un mejor manejo para el transporte y almacenamiento de las excretas del ganado bovino.

Conociendo el contexto, para poder realizar el mapa topográfico se utilizó:

Google Earth: Se utiliza para poder escoger el área donde se instala al biodigestor y trazar la ruta para el sistema de conducción desde el biodigestor hasta la cocina. En Google Earth se debe obtener la información kmz o kml.

ArcMap: Con la herramienta ArcMap se realiza un análisis 3D de los archivos kmz transformados a GPS. El sistema de puntos se debe convertir en un ráster de vectores 3D cuyo contorno indicarán las curvas de nivel: principales como secundarias. Se etiquetan las curvas y se añaden los demás elementos del mapa. Los datos son exportados para AutoCAD como archivo dwg_2013.

3.4 Muestreo y cuantificación del estiércol diario

El muestreo se realizó en un periodo de 30 días laborables, al ser una finca productora de leche, la producción de esta es diario, razón por la cual se decidió tomar un pesaje referencial del mes. Se realizó un muestreo delimitando gran parte del área en donde los bovinos pasan el tiempo durante el día, tomando en consideración 2 áreas para el pesado del estiércol. La primera el área de preparación para la extracción de la leche y la segunda que corresponde a la zona para el ordeño mediante un equipo mecánico.

Se tomó en consideración las áreas porque el suelo está adoquinado y la recolección es más sencilla y está exento del contenido de tierra, obteniendo solo el estiércol. La medición del peso del estiércol inició el día 12 de Septiembre del 2022 y finalizó el 11 de Octubre del mismo año.

Materiales:

- Botas de caucho
- una pala
- 2 baldes de 10 L
- Mandil
- una pesa de 50 kg
- un esfero
- una libreta

3.5 Caracterización fisicoquímica del estiércol pre (estiércol) y post degradación

Toma de la muestra de estiércol en las zonas mencionadas

Para la toma de las muestras de estiércol se tomó en cuenta las áreas mencionadas y mediante un muestreo tipo estratificado se tomaron las muestras de estiércol.

Materiales:

- Guantes
- Mandil
- 3 fundas ziploc
- Piola de 50 m
- Balanza
- Marcadores
- papel para apuntes

Método

Una vez definidos los 9 cuadrantes con la ayuda de la piola, en el área de preparación para el ordeño, se tomaron de cada 3 cuadrantes pequeñas porciones de muestras de estiércol hasta completar 1 kg de muestra, este proceso se lo hizo para los 6 cuadrantes restantes obteniendo un total de 3 kg de muestra.



Ilustración 2-10: División de los cuadrantes para la toma de la muestra de estiércol.

Realizado por: Lema C., 2023

Dichas muestras fueron enviadas al laboratorio agrarPROJECTK S.A. para los análisis respectivos, los cuales se detallan en la siguiente tabla 1-3 con los parámetros correspondientes basadas en Standard Methods.

Caracterización de la muestra:

Conductividad Eléctrica (C.E) y pH: Preparación del Extracto Según Método Volumen 1:1½ (Reglamento de Holanda para Sustratos).

Contenido Total de Nutrientes: Secado de la muestra a ensayar hasta 0 % de humedad - Determinación del % Materia Seca - Trituración de la muestra a ensayar ("40 mesh") - Incineración - Dilución en " Agua Regia".

Tabla 3-1: Parámetros y métodos de referencia usados para determinar la composición de la materia orgánica.

MÉTODOS DE REFERENCIA UTILIZADOS		
PARÁMETROS	MÉTODO	Pre degradación
Materia Seca	AOAC 930.04	
DQO	5220-D	
DBO	5210-B	
Humedad	AOAC 930.04	
pH	EPA 9045 D	
Materia Orgánica (L.O.I., "Loss on Ignition")	AOAC 967.05 / DIN 19684-3	
Carbono (C)	AOAC 967.05	
Nitrógeno Total Kjeldahl (N-Total)	AOAC 978.04	
Fósforo (P)	SM 4500-P C	
Potasio (K)	SM 3500-K B / AOAC 975.03	
Magnesio (Mg)	AOAC 975.03	
Calcio (Ca)	AOAC 975.03	
Sodio (Na)	SM 3500-Na B	
Hierro (Fe)	AOAC 975.03	
Manganeso (Mn)	AOAC 975.03	
Cobre (Cu)	AOAC 975.03	
Zinc (Zn)	AOAC 975.03	
Boro (B)	AOAC 982.01	

Fuente: R. Gottschall. Kompostierung ("Compostaje"). Verlag C.F. Mueller, Karlsruhe, Alemania. 295

Análisis Post degradación.

Tabla 3-2: Resultados de análisis post degradación de la muestra de biol.

Parámetro	Valor	Unidad
DBO		mg/L
DQO		mg/L

Realizado por: Lema C., 2023

3.6 Determinación de biodegradabilidad en la muestra

La determinación de biodegradabilidad de la materia orgánica después del proceso de la fermentación, se aplicó la relación de DQO/DBO₅, aplicada en el proyecto de “DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS Y BIOL EN LA COMUNIDAD DE ILLAGUA DEL CANTÓN GUARANDA.” realizado por (Rochina 2018, p. 65), dicho cálculo permitió comprobar la eficiencia en base a los siguientes criterios:

DQO/DBO₅ = 1.5 MUY DEGRADABLE.

DQO/DBO₅ = 2.0 MODERADAMENTE DEGRADABLE.

DQO/DBO₅ = 10 POCO DEGRADABLE.

3.7 Selección del biodigestor

Para la selección del biodigestor se realizó una revisión bibliográfica de los modelos: Chino, Indio y Taiwanés, documentando la información sobre las características, ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Se elaboró una matriz de criterio descrita en la tabla 3-3 la misma que contiene los siguientes aspectos a considerar: eficiencia, durabilidad, costos, operación y mantenimiento y disponibilidad del material.

Tabla 3-3: Matriz de criterio para la selección de un biodigestor a partir de los modelos: chino, indio y taiwanés.

Categoría	Valor (1-5)	Modelo chino	Modelo Indio	Modelo Taiwanés
Eficiencia	5	Producción de biogás entre 55% (Hanum et al. 2023, pp. 3-4).	Para este modelo la producción genera un 53% de biogás (Nsair et al. 2020, pp. 1-2).	Tiene un sistema de eficiencia en generar biogás de 58% (Barrena et al. 2019).
Durabilidad	4	La producción de biogás permite operar de 8 a 12 años (Wang, Tu y Liu 2019, p. 3).	Este sistema dura entre 15 a 25 años. (Ellacuriaga et al. 2022, pp. 2-3)	Su producción está destinada más de 10 años en operación (Shih, Lin y Lay 2021, p. 1)
Costos (\$)	4	Un aproximado de 1500 a 10 000\$ (Bautista Angeli et al. 2018, p. 5).	El costo de construcción varía entre 500 a 5000 \$ (Mazurkiewicz 2022, p. 5).	El costo de construcción puede variar entre 500 a 2000\$ para su puesta en generación de biogás (Shih, Lin y Lay 2021, p. 6).

Operación y mantenimiento	3	El costo de operación/mantenimiento para este sistema va entre los \$ 400 y \$ 800 USD anuales (Qian et al. 2018, p. 5)	Estudios realizados en india estima un costo de operación/mantenimiento por unidad de 2m ³ de \$ 16 USD/mes (Abanades et al. 2022, p. 13)	Un biodigestor taiwanés puede operar y mantener por unidad de 10 m ³ por un costo de \$ 400 USD por año (Villarroel-Schneider et al. 2020, p. 6)
Disponibilidad de material	3	Si es de fácil accesibilidad para el desarrollo del proyecto	Si es de fácil accesibilidad para el desarrollo del proyecto	Si es de fácil accesibilidad para el desarrollo del proyecto
Análisis de opciones	-			

Realizado por: Lema C., 2023

3.8 Prueba piloto del biodigestor en la Finca Castillo de Altura

3.8.1 *Materiales para construcción del biodigestor prototipo*

- un tanque plástico con capacidad de 200 L (60 de diámetro x 90 cm de alto)
- 5 m de manguera de cocina
- Teflón
- una válvula de paso
- Taladro
- Alicata
- Marcador
- Sierra de cortar hierro
- Moladora
- Silicona
- 2 codos
- Estilete
- Abrazadoras

Para la construcción del biodigestor e invernadero, ver (ANEXO C).

3.8.2 *Preparación del sustrato*

La preparación del sustrato se basó principalmente en la relación C/N en base a los sustratos obteniendo una mezcla adecuada a la relación cercana de 20 a 30, en base a la información bibliográfica presentada en el capítulo II (Ver ANEXO D).

Materiales:

- 36 kg de estiércol fresco.
- 108 L de agua.

- 10 L de melaza.
- 5 L de suero de leche.

3.8.3 *Determinación de % C/N*

Se realizó el cálculo de la relación C/N para la mezcla verificando que la composición elegida para la biodigestión sea adecuada y se encuentre dentro del rango de acuerdo con bibliografía mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$K = \frac{\sum C_i X_i}{\sum N_i X_i} \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

- K : es la relación C/N de la mezcla escogida para la carga
- N : es el porcentaje de nitrógeno del componente i
- C : es el porcentaje de carbono del componente i
- X : es el peso del componente i .

3.8.4 *Dispositivos para la medición y monitoreo de temperatura*

La obtención de los datos se obtuvo a partir de dos dispositivos que midieron la temperatura interna del biodigestor y una externa. Los sensores monitorearon las 24 horas al día por los 7 días de la semana de acuerdo con el tiempo de retención calculado.

3.8.4.1 *M1 USB PDF Temperature Data Logger (Sensor Externo)*

Instalación/configuración del software:

1. Se instaló el software del dispositivo en la siguiente página www.elitechus.com/download/software
2. Previamente instalado se debe conectar M1 USB PDF Temperature Data Logger a la computadora.
3. En el menú de configurar opciones: se puede establecer la hora en el cual el registrador comenzará a tomar los datos, el intervalo de tiempo del registro lo que es la demora de inicio, el formato de fecha hora, correo electrónico, y demás parámetros que de acuerdo

con el usuario y sus preferencias puede configurarlo tal como se muestra en la siguiente interfaz:

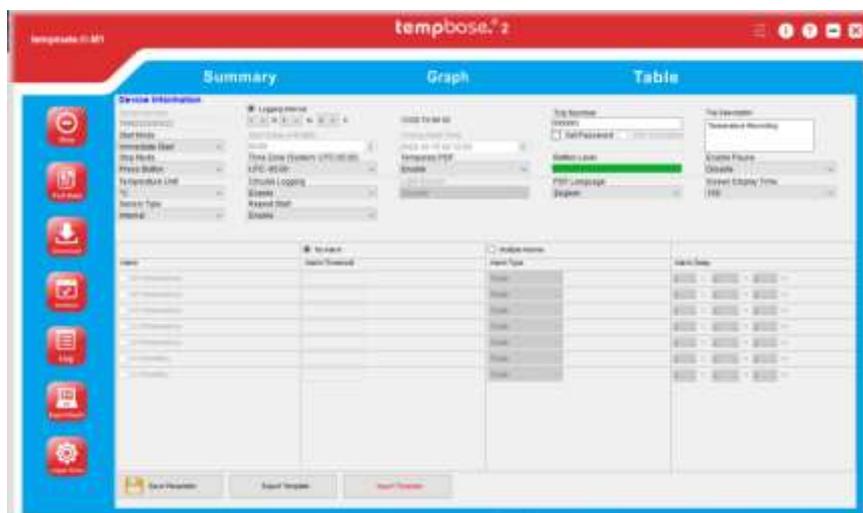


Ilustración 3-1: Instalación y configuración del sensor MI USB PDF Temperature Data Logger

Realizado por: Lema C., 2023

4. Las demás opciones permiten descargar datos, filtrar datos y exportar datos el usuario hará uso de estos de acuerdo con lo que necesite.

3.8.4.2 GSP-6 Multi-use Temperature & Humidity Data Logger (Sensor Interno)

Instalación/configuración del software:

1. Se instaló el software del registrador de datos en la siguiente página: <https://elitech.uk.com/pages/elitech-software>
2. Previamente instalado se debe conectar GSP-6 Multi-use Temperature & Humidity Data Logger a la computadora.
3. En el menú de configurar opciones: se puede establecer la hora en el cual el registrador comenzará a tomar los datos, el intervalo de tiempo del registro lo que es la demora de inicio, el formato de fecha hora, correo electrónico, y demás parámetros que de acuerdo con el usuario y sus preferencias puede configurarlo.
4. De acuerdo con las necesidades del investigador se define cada uno de los parámetros establecidos: inicio de la toma de datos, intervalo de recepción de datos, entre otros aspectos.

3.8.6 Comparación de la temperatura interna y externa del biodigestor

Tabla 3-4: Modelo de comparación de los valores registrados por los sensores en el biodigestor de acuerdo con las semanas correspondientes.

	(°C) T. interna del biodigestor (GPS-Multi-use)	(°C) T. externa del biodigestor (M1 USB PDF)
Fecha de inicio		
Fecha de finalización		
Duración del registro		
Promedio		
T° Max		
T° Min		

Realizado por: Lema C., 2023

3.8.7 Medición de la cantidad de biogás almacenado en la planta piloto

Para medir la cantidad de biogás que se almacena, se usó el método del desplazamiento de líquido, al cual el gas desplazó el agua contenida en una probeta de 250 mL, este proceso se lo efectuó repetidas veces hasta que el “tubo interno” quede vacío, de esta manera se midió el volumen del biogás almacenado en el tubo de la llanta. A continuación, se muestra la siguiente tabla del proceso:

Tabla 3-5: Modelo de registro de la medición de biogás generado en la planta piloto

Sistema armado	Medición del biogás	Medición final
Fecha	Cantidad biogás en L	

Realizado por: Lema C., 2023

(Ver ANEXO H)

3.8.7.1 *Medición de biogás a partir de la generación la flama*

La prueba de flama se realizó cada vez que el tubo de llanta estaba inflado completamente, se comprobó con la ayuda de un encendedor la formación de la flama.

Materiales:

- Encendedor/fosforera
- Esfero
- Libreta

Método:

La prueba de flama a la válvula de bola y acercando la llave al encendedor, con el objetivo que se siga la flama o se torne de una coloración entre: amarillento, anaranjado (indica que está en proceso de maduración la flama) o azul (flama es madura y existe la presencia de metano).

3.8.7.2 *Determinación del caudal del biogás*

Se determinó el caudal mediante la medición de flujo volumétrico, haciendo uso del volumen del tubo y el tiempo que tardo en vaciarse el mismo.

$$Q = \frac{V}{t} \qquad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

Q= caudal.

V= Volumen del tubo.

T= tiempo en vaciarse el tubo.

3.8.8 Control de pH

El seguimiento del control de pH se lo hizo periódicamente, se realizó las pruebas mediante el uso de tiras de pH para monitorear el proceso de fermentación en el biorreactor.

Materiales:

- Tiras de pH
- Un recipiente de un litro
- Esfero
- Cuaderno para registro

Método:

Se procedió a tomar una muestra diaria la mañana por lo general (8 a 10 am) el biorreactor, haciendo uso de la llave la misma que se encuentra ubicada al inferior de esta, seguido con la ayuda del recipiente de un litro se llenó una pequeña porción del líquido extraído del biorreactor, con una tira de pH se sumerge una parte hasta que tiña de un color. Hecho esto se registró el valor obtenido al comparar con la tabla de valores estándar del producto.

Tabla 3-6: Modelo de formato de registro por día del pH en el biodigestor.

Días	Fecha	pH	Media d

Realizado por: Lema C., 2023

3.9 Diseño del biodigestor taiwanés a partir de la materia prima disponible

Para el cálculo del volumen total para su uso de acuerdo con la cantidad de materia prima que se dispone, se debe tener en cuenta las dos fases que involucra el proceso de producción del biogás, fase líquida comprendida de un 75% del volumen y el 25% faltante corresponde a la fase gaseosa. Para ello se usa las siguientes ecuaciones:

3.9.1 Cálculo de la carga diaria, CD

Tabla 3-7: Modelo de registro de la Carga Diaria (Kg) generada por día en la finca

Días	Fechas	Peso estiércol (Kg)

Realizado por: Lema C., 2023

Tabla 3-8: Modelo del análisis descriptivo a usar del pesaje por día obtenido en la finca Castillo.

Media	
Error típico	
Mediana	
Moda	
Desviación estándar	
Varianza de la muestra	
Rango	
Mínimo	
Máximo	
Suma	
Cuenta	

Realizado por: Lema C., 2023

3.9.2 Determinación de la carga a depositar en el biodigestor, CD

La determinación de la carga se la realizo en base a los parámetros de diseño propuesto por (Herrero 2019, p. 34).

$$CD = MPC + MH_2O \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

CD = carga diaria para alimentar el digestor en kilogramos por día o litros por día (sea asume que un litro pesa un kilogramo).

MPC = Materia prima para carga en kilogramos por día.

MH₂O = Masa de agua para mezcla (1:3), este parámetro se lo multiplica por 3 debido al factor de dilución del estiércol tomado de (Herrero 2019, p. 34). Menciona que por cada Kg de estiércol corresponde 3 L de agua, una buena dilución del estiércol mejora el proceso de degradación de la materia orgánica.

3.9.3 *Determinación del tiempo de retención, TRH*

Para el posterior cálculo se aplica la ecuación descrita en el capítulo II, referente al TRH propuesta por UPME 2003, p. 19 ya que permite simular la reacción biológica de los microorganismos en base a la temperatura, de acuerdo con un coeficiente de correlación (R^2) de 0.88.

$$TRH = (-51.227 * \ln(T^\circ C) + 206.72) \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

TR= Tiempo de retención en días.

Ln= Logaritmo natural.

T°C= Temperatura promedio en grados centígrados del sitio donde se instalará el biodigestor

3.9.4 *Determinación del volumen líquido en el biodigestor, VL*

La determinación del volumen líquido del biodigestor se aplicó de acuerdo con lo propuesto por (Herrero 2019, p. 115).

$$V_L = CD * TRH \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

CD= es la carga diaria del biodigestor.

TRH= el tiempo de retención hidráulica.

3.9.5 *Determinación del volumen de gas a producir, VG*

El volumen líquido se define las tres cuartas partes del volumen total; por lo cual la cuarta parte pertenece al volumen de gas a ser almacenado. La ecuación propuesta por (Herrero 2019, p. 115), permite calcular el volumen de gas a generarse.

$$V_G = \frac{0.25}{0.75} * V_T \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde:

V_G= es el volumen del biogás.

V_T= el volumen total del biodigestor.

3.9.6 Volumen total del biodigestor, V_T

De acuerdo con lo propuesto por (Herrero 2019, p. 115) se realizó el cálculo del volumen total del biodigestor tubular a partir del volumen líquido más el gaseoso.

$$V_T = V_L + V_G \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde:

V_T = es el volumen total del biodigestor.

V_L = se refiere al volumen de la parte líquida.

V_G = es referente a la parte gaseosa, el gas del biodigestor.

3.9.7 Cálculo de sólidos totales, ST

El cálculo teórico de la cantidad de sólidos totales a generarse se lo realizó en base a bibliografía, (Herrero 2008, p. 45) menciona que el resultado obtenido fue determinado en estiércol fresco, que es el mismo aplicado en el proyecto.

$$ST = CD * \frac{0.17}{V_L} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde:

CD = carga diaria de estiércol.

0.17 = valor elegido de acuerdo con tablas en bibliografía (Herrero 2008, p. 45) debido a que el estiércol es fresco.

V_L =Volumen líquido del biodigestor.

3.9.8 Determinación de sólidos volátiles, SV

Hace referencia a la fase gaseosa parte de los sólidos totales, se determina mediante la siguiente ecuación obtenida de (Herrero 2008, p. 45), debido a que el estiércol usado es fresco y este fue usado en el proyecto.

$$SV = ST * 0.77 \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

ST = Valor de los Sólidos Totales.

0.77= Valor de acuerdo con tablas en bibliografía (Herrero 2008, p. 45) debido a que el estiércol es fresco.

3.9.9 Determinación de la producción de biogás, PB

Para la determinación de biogás es necesario tener en cuenta los criterios de SV y ST que contiene el estiércol, estos inciden en la producción de biogás de acuerdo con la Carga Diaria, CD, y el volumen del biodigestor

De acuerdo con la siguiente ecuación planteada por (Herrero 2008, p. 45) se determina la cantidad de biogás estimada de acuerdo con los valores planteados.

$$PB = 0.27 * SV \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

SV= valor de Sólidos Volátiles.

0.27=factor general asumido para estiércol bovino de acuerdo con bibliografía (Herrero 2008, p. 45)

3.9.10 Determinación del radio del biodigestor.

La determinación de la radio del biodigestor se aplicó de acuerdo con las tablas propuestas por (Herrero 2019, p. 115).

$$C = 2 * \pi * r \quad \text{Ec. (11)}$$
$$r = \frac{C}{\pi * 2}$$

Donde:

C= circunferencia del plástico, m (dicho valor se asume de acuerdo con la tabla 11).

R= radio de la circunferencia del plástico, m valor tomado en base a la tabla, (ver ANEXO P).

3.9.11 Diámetro de la circunferencia

La determinación del diámetro del biodigestor se hizo acorde a lo propuesto por (Herrero 2019, p. 116).

$$D = 2 * r \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde:

Pi= 3.1415

R= radio de la circunferencia del plástico

3.9.12 Determinación del área de la zanja, m²

El tipo de suelo influye en la elección del talud de la zanja es necesario elegir el que corresponda según sea el caso; entre ellos están: $\alpha=30^\circ$ a 45° para suelos sueltos y arenosos; mientras que para taludes de $\alpha=7,5^\circ$ a 30° (Herrero 2019, p. 49).

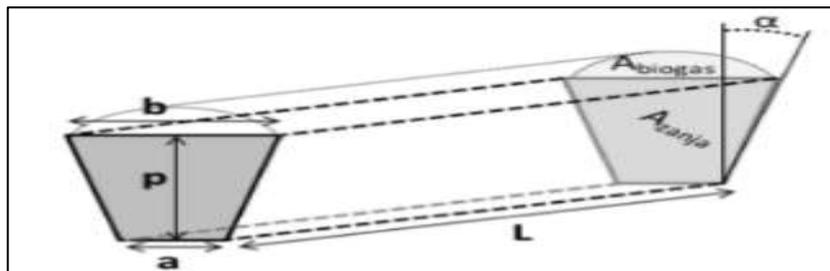


Ilustración 3-3: Esquema de una zanja trapezoidal de acuerdo con cada una de las paredes de la zanja.

Fuente: Herrero 2008, p. 48

$$A_{zanja} = p * \frac{(a + b)}{2} \quad \text{Ec. (13)}$$

Donde:

P=profundidad.

A= ancho inferior de la zanja, m.

B= ancho superior de la zanja, m.

3.9.13 Determinación de la longitud del biodigestor, L

La determinación la longitud del biodigestor se obtuvo de acuerdo con las tablas propuestas por (Herrero 2019, p. 116).

$$L = \frac{V_L}{A_{zanja}} \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde:

L= longitud necesaria en base a los plásticos disponibles en el mercado.

A zanja= área de la zanja del biodigestor

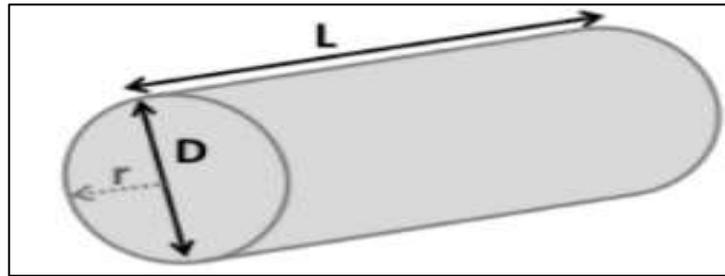


Ilustración 3-4: Esquema del cilindro mostrando el diámetro y la longitud del biodigestor.

Fuente: Herrero 2008, p. 46

Es importante que cumpla con la siguiente relación L/D de (5 a 10) ya que si es <5 ya que tendrá una forma demasiado corta además el tiempo de retención no cumplirá con la CD; por otro lado, si es >10 se tendrá una forma demasiado larga y en el peor de los casos se generaran acumulaciones en la mitad del biodigestor.

$$\frac{L}{D} = 5 \text{ a } 10 \text{ (óptimo de } 7.5)$$

Donde:

L= Longitud del biodigestor.

D= Diámetro.

De acuerdo con los valores de tablas obtenidos en referencia bibliográfica se obtiene los siguientes valores ya que se encuentran disponibles en el mercado.

3.9.14 Diseño de planos en software AutoCAD y SketchUP Pro

Para la presentación de los planos del biodigestor en base a los cálculos de realizados en base a la materia disponible con la cual cuenta la finca Castillo de Altura, Los mismos que son plasmados mediante el uso de AutoCAD (ver ANEXO T).

Los diferentes tipos de vistas a tratar son:

- Vista planta
- Vista longitudinal

- Sección transversal

Por otro lado, se usó SketchUP Pro, para modelar en 3D el diseño del biodigestor y se mostró la ubicación, perfil de hidráulico y cómo está diseñado de acuerdo con los cálculos realizados por el autor. (ver ANEXO U).

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Área de estudio

La finca Castillo de Altura, se encuentra ubicada en la provincia de Chimborazo, en el cantón Riobamba, parroquia de San Juan, en la Av. Riobamba, en la siguiente tabla se describe los siguientes datos de la parroquia.

Tabla 4-1: Datos relevantes de la Zona de San Juan

SUPERFICIE	22120 ha, 221.20 Km ²
ALTITUD	3160 msnm – 6210 msnm
POBLACIÓN	7370
PRECIPITACIÓN	500 – 1000 mm
TEMPERATURA	12 – 16 °C
HUMEDAD RELATIVA	07 – 1.88
TASA DE CRECIMIENTO POBLACIONAL (2001-2010)	Hombres: 0.53% Mujeres: 1.03 %

Fuente: Fernández Vinuesa 2019

4.2 Ubicación del lugar

Se determinó el área de georreferenciación con la ayuda de la aplicación GPS. De acuerdo con las coordenadas DATUM WGS 84: Latitud 1° 38' 13.3'' S y Longitud 78° 46' 33'' W. En coordenadas UTM se expresa: Este 747456.20; Norte 9818921.5. En la siguientes grafica se muestra la ubicación de la finca Castillo de Altura.



Ilustración 4-1: Mapa de ubicación de la Finca Castillo de Altura en la parroquia San Juan
Realizado por: Lema C., 2023

4.3 Topografía de la finca

En cuanto a su topografía presenta un relieve irregular. Sin embargo, el área cuenta con una pendiente que permite el transporte y almacenamiento de las excretas de ganado bovino.

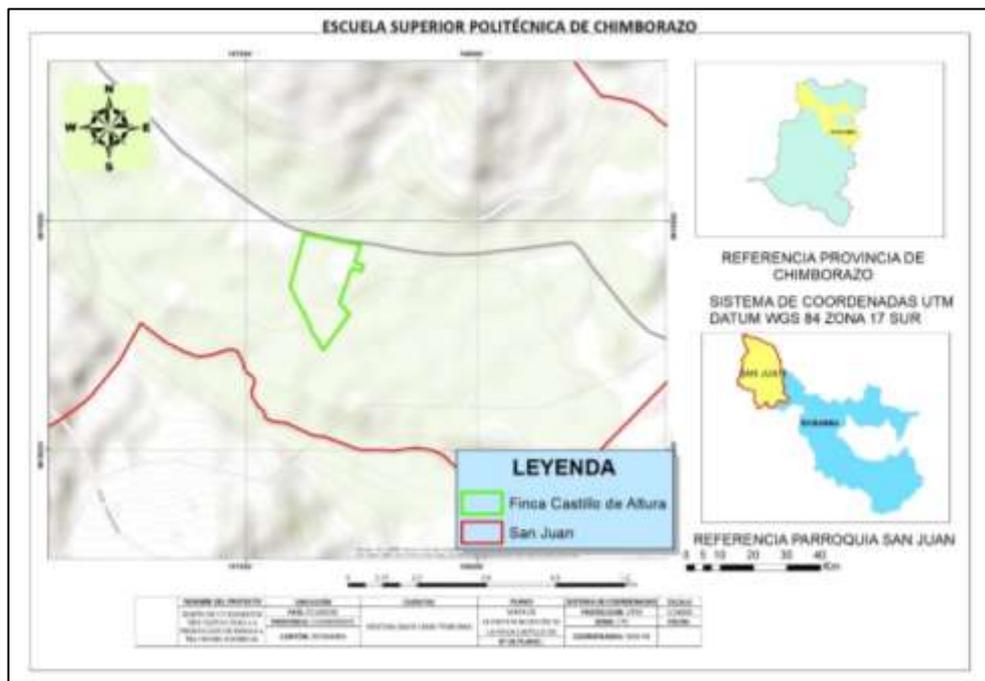


Ilustración 4-2: Mapa topográfico de la Finca Castillo de Altura.

Realizado por: Lema C., 2023

Además, gracias a la pendiente del terreno permite conducir las excretas. De acuerdo con el perfil de elevación, se puede apreciar un desnivel de 1 m que inicia 3204 hasta 3203 m.s.n.m. El recorrido del biogás tiene una línea de conducción 35.6 m, que comprende desde la captura del biogás hasta la cocina.



Ilustración 4-3: Perfil de elevación para la conducción del biogás desde el biodigestor a la cocina

Realizado por: Lema C., 2023

4.4 Caracterización fisicoquímica del estiércol pre (estiércol) y post degradación

Se realizó una comparación entre la muestra estiércol antes y después del proceso de digestión anaerobia transcurridos los 58 días de acuerdo con el tiempo de retención calculado.

Tabla 4-2: Resultados del análisis de la muestra de estiércol de la caracterización fisicoquímica (pre degradado).

Análisis	Unidad	<i>*Valores de Orientación: Niveles Adecuadas para un Compost de Buena Calidad</i>	Resultado Pre degradado
Materia Seca	%	50 - 70	83,93
Humedad	%	30 - 50	16,07
DQO	mg/L		95 000
DBO	mg/L		57 000
pH (Volumen 1:1 1/2)	-	7,0 - 8,5	8,93
Materia Orgánica	%	> 65	36,97
Carbono (C)	%	> 38	21,5
Relación Carbono-Nitrógeno (C: N)	:	10:1 hasta 20:1	14:1
Nitrógeno Total (N)	%	> 2,0	1,51
Fósforo (P)	%	> 0,2	0,3
Potasio (K)	%	> 1,5	1,05
Magnesio (Mg)	%	> 0,2	0,38
Calcio (Ca)	%	> 1,5	1,06
Sodio (Na)	%	< 0,2	0,26
Hierro (Fe)	ppm	-	3926,67
Manganeso (Mn)	ppm	-	118

Cobre (Cu)	ppm	-	16,23
Zinc (Zn)	ppm	-	26,33
Boro (B)	ppm	-	66,67

Realizado por: Lema C., 2023

De acuerdo con los resultados obtenidos de la Tabla 4-2, se puede observar que el parámetro del pH tiene un valor de 8.93 lo cual indica que el estiércol es básico y supera al valor establecido en bibliografía comprendido entre 6 a 8 como máximo 8.5. Es importante estabilizar la muestra para evitar la acumulación excesiva de amoníaco y otros compuestos tóxicos los cuales están descritos en el Capítulo II. Por lo tanto, se debe llegar a un pH óptimo para el desarrollo de la actividad microbiana, entre las opciones se puede aplicar:

- Utilizar estiércol fresco, cuyo pH tiende a ser ácido
- Adición de subproductos de procesos ácidos: el suero de leche, vinagre, pulpa de frutas o melaza.
- Ajustar la humedad del estiércol, es decir al tener una humedad alta se puede tener un pH bajo. En contraste si es seca la muestra el pH tiende a ser alto.

En lo que respecta a los valores de micronutrientes, el análisis de los minerales muestra similitud comparado con el proyecto de: GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE GANADO A NIVEL DE FINCA EN EL ORIENTE ECUATORIANO, realizado por (Brito et al. 2016, p. 5), en dicho estudio se registran valores de minerales relativamente altos que contrasta con los resultados obtenidos.

Es importante mencionar que el estiércol bovino para cada estudio va a hacer diferente debido a varios factores como: la raza, el tipo de dieta que consume, edad del animal, entre otros factores, por tal motivo no se tiene un valor estándar para este tipo de estudios, sin embargo, los rangos en sus valores son cercanos.

En cuanto a los demás parámetros los valores obtenidos fueron muy cercanos o se encuentran en un rango aceptable para una producción de biogás de acuerdo con bibliografía.

Tabla 4-3: Resultados del análisis de la muestra de biol de la caracterización fisicoquímica (post degradado).

Parámetro	Valor	Unidad
DBO	26 000	mg/L
DQO	55 200	mg/L

Realizado por: Lema C., 2023

DQO

De acuerdo con los resultados obtenidos de las Tablas 4-2 y 4-3 para el parámetro de DQO el valor obtenido en el pretratamiento fue de 95 000 g/L, lo cual indica que, al ser un valor alto es directamente proporcional a la cantidad de biogás que se produce. Por otro lado, el valor obtenido del análisis del biogestato indica que su DQO 55 200 mg/L disminuyó significativamente lo cual demuestra la eficiencia del proceso anaerobio generado por los microorganismos.

DBO

En cuanto al parámetro de la DBO para el pretratamiento 57 000 mg/L, esto denota que el estiércol generado en la finca tiene un buen contenido de materia orgánica adecuado para la producción de biogás. Sin embargo, se observa que valor obtenido del post tratamiento fue de 26 000 mg/L mostrando una disminución en la materia orgánica. Esto es un indicador específico de la cantidad de materia orgánica que fue biodegradada por los microorganismos y a su vez permite monitorear la eficiencia del proceso generado de la digestión anaerobia.

4.5 Determinación de la biodegradabilidad en la muestra

En base a los resultados obtenidos de la DQO y DBO₅ de la Tabla 4-3 se obtuvo:

$$\frac{DQO}{DBO_5} = \frac{55\,200\text{ mg/L}}{26\,000\text{ mg/L}} = 2.12$$

De acuerdo con el capítulo III el valor de 2.12 corresponde al criterio de moderadamente degradable, corroborando que se generó el proceso de digestión anaerobia, dicho valor es cercano al obtenido por (Rochina 2018, p. 65).

4.6 Selección del biodigestor

De acuerdo con los cálculos de la matriz de criterio, se seleccionó el biodigestor que mejor cumple con las necesidades económicas y accesibles para la finca. En la Tabla 4-4 se muestra los resultados.

Tabla 4-4: Resultados de la matriz de criterio para la selección del biodigestor definiendo la mejor opción.

Categoría	Peso (1-5)	Modelo chino	Modelo Indio	Modelo Taiwanés
Eficiencia	5	4	4	4
Durabilidad	4	4	5	4
Costos (\$)	4	3	3	4
Operación y mantenimiento	3	3	3	4
Disponibilidad de material	3	5	5	5
Análisis de opciones		72	76	79

Criterio de evaluación:

**Ponderación
1-5**

**Significancia
5 valor más importante
1 valor menos importante**

Realizado por: Lema C., 2023

En resumen, el costo de construcción de un biodigestor modelo chino, indio o taiwanés para la producción de biogás a partir del estiércol de bovino puede variar según diferentes factores y necesidades que tenga el usuario. Pero en general se considera una opción rentable y sostenible para la generación de energía a partir de residuos orgánicos. De acuerdo con el resultado obtenido de la matriz de criterio, se opta por diseñar un biodigestor de modelo taiwanés para la producción de biogás en la finca Castillo de Altura.

4.7 Prueba piloto del biodigestor en la Finca Castillo de Altura

4.7.1 Determinación de la relación C/N

Se realizó el cálculo de la relación C/N de la mezcla para verificar que la composición elegida para la biodigestión sea la adecuada y se encuentre dentro del rango de 20-30:1.

Tabla 4-5: Concentración de la relación C/N óptima en base a cada sustrato a usar para su composición.

	ESTIÉRCOL	SUERO DE LECHE	MELAZA
CANTIDAD Kg	36	5	10
%C	21,5	0,35	40,767
%N	1,51	0,409	0,245

Realizado por: Lema C., 2023

$$\begin{aligned}
 C/N &= \frac{\sum C_i X_i}{\sum N_i X_i} \\
 &= \frac{(21.5 * 36) + (0.35 * 5) + (40.767 * 10)}{(1.51 * 36) + (0.409 * 5) + (0.245 * 10)} \\
 &= \frac{1183.42}{58.85} \\
 C/N &= 20.10
 \end{aligned}$$

De acuerdo con el valor obtenido de 20,10 representa una relación adecuada que dentro de los parámetros del Capítulo II, referente a la relación C/N.

4.7.2 *Dispositivos de control y monitoreo de temperatura*

4.7.2.1 *MI USB PDF Temperature Data Logger*

El dispositivo registró la temperatura externa del biodigestor, para nuestro caso se lo configuró para que tome datos cada hora durante los 58 días de acuerdo con el tiempo de retención calculado.

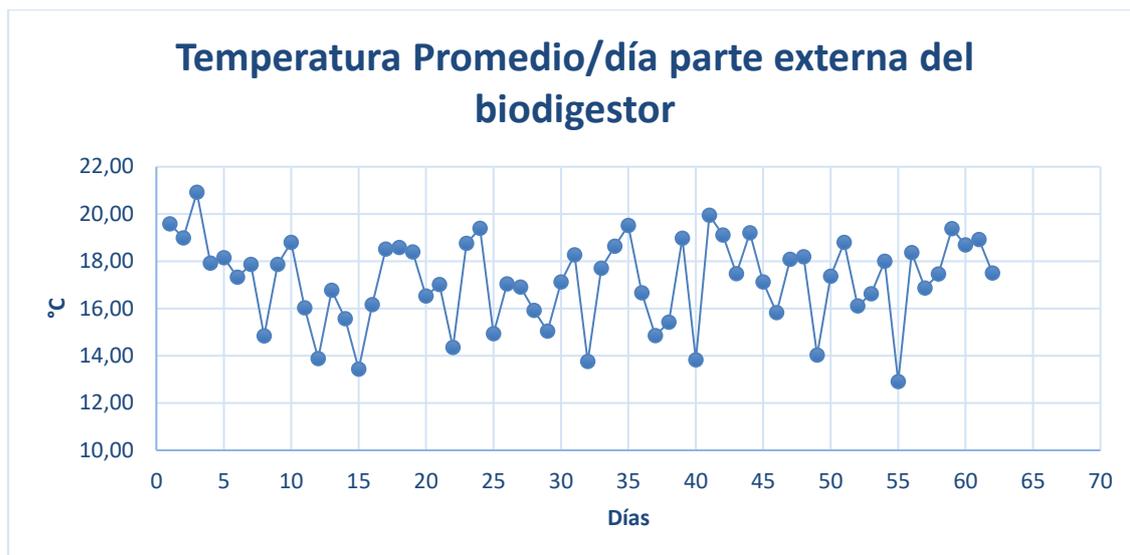


Ilustración 4-4: Variación de la Temperatura externa del biodigestor de acuerdo con el TRH.

Realizado por: Lema C., 2023

Tabla 4-6: Análisis descriptivo de la temperatura externa del biodigestor en base al TRH.

Media	17,10
Error típico	0,23
Mediana	17,47
Moda	#N/D
Desviación estándar	1,83
Varianza de la muestra	3,34
Rango	8,00
Mínimo	12,91
Máximo	20,91
Suma	1066,10
Cuenta	62,00

Realizado por: Lema C., 2023

La Ilustración 4-4 muestra las fechas en las cuales hubo variabilidad en la temperatura y de acuerdo con el análisis estadístico de la Tabla 4-7 se obtuvieron una media de 17,10 °C y una mediana de 17,47°C; en contraste no existe moda debido a que los datos de temperatura están relativamente dispersos. En lo que respecta a la desviación estándar y varianza la temperatura no resulta ser relevante de acuerdo con los valores obtenidos menores a 5°C. Se registró una menor temperatura fue para el día 55 con un mínimo de 12.91 °C; esto se debe a la presencia de lluvia o

el día estuvo nublado. En contraste se evidenció una temperatura mayor a 16° C, con un máximo de 20,91 °C lo que indica que el cielo estuvo despejado y hubo la presencia de radiación solar.

Los resultados obtenidos tienen concordancia al estudio Psychrophilic Full Scale Tubular Digester Operating over Eight Years: Complete Performance Evaluation and Microbiological Population realizado por (Jaimes-Estévez et al. 2020, p. 4), mencionan que los días donde hubo mayor radiación la generación de biogás, es consecuente de este proceso, es necesario tener un plástico adecuado para la retención del calor o proporcionar de inercia térmica para los climas fríos como el de la finca Castillo.

4.7.2.2 GSP-6 Multi-use Temperature & Humidity Data Logger

Por semana se llevó un registro entre los valores promedio obtenidos del dispositivo GSP-6 Multi Use Temperature & Humidity Data Logger, este fue configurado para que tome datos cada hora por los 58 días que respecta el tiempo de retención.

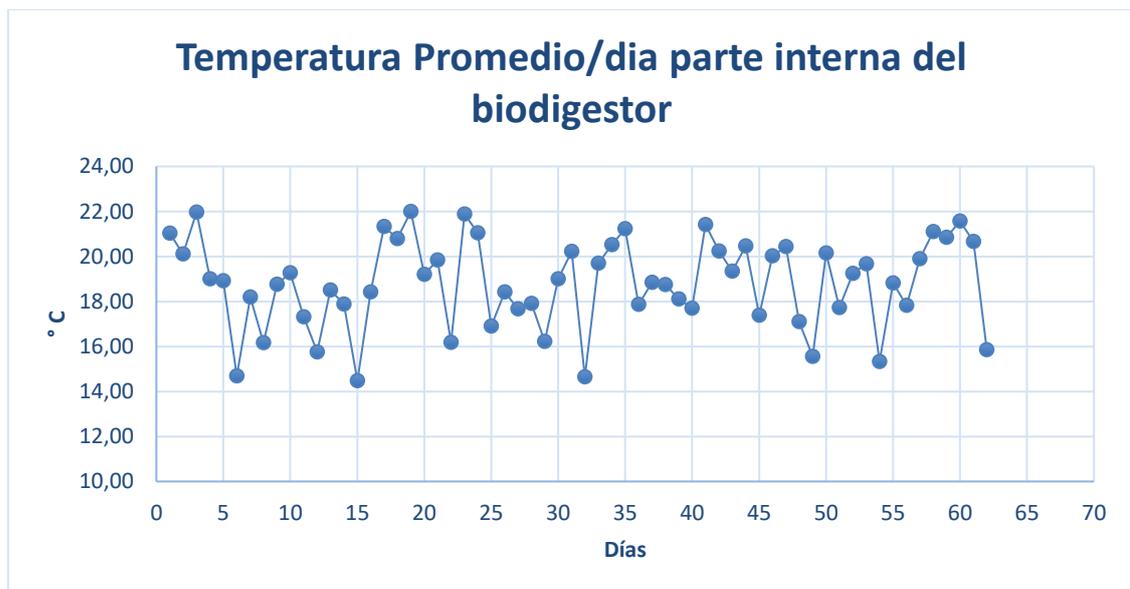


Ilustración 4-5: Variación de la Temperatura interna del biodigestor de acuerdo con el TRH.

Realizado por: Lema C., 2023

Tabla 4-7: Análisis descriptivo de la temperatura interna del biodigestor en base al TRH.

Media	18,82
Error típico	0,25
Mediana	18,96
Moda	#N/D
Desviación estándar	1,98
Varianza de la muestra	3,91
Rango	7,53
Mínimo	14,47
Máximo	22,00
Suma	1167,09
Cuenta	62,00

Realizado por: Lema C., 2023

De acuerdo con la Ilustración 4-5; se evidencia que no existió un descenso en la temperatura menor a 10°C en sus fechas, sin embargo, para el día 54 tuvo un valor mínimo de 14.47 °C. En general durante los demás días se mantuvo la temperatura por cercana a la media 18,82° C de acuerdo con el análisis descriptivo presentado en la Tabla 4-8. La utilización de un aislante (paja) y el hecho de estar el biodigestor encerrado en el invernadero contribuyeron a que la temperatura no descendiera significativamente.

4.7.3 Comparación de la temperatura interna y externa del biodigestor

Promedio de los valores obtenidos por los sensores en el biodigestor de acuerdo con el tiempo de retención y el monitoreo realizado.

Tabla 4-8: Comparación de la temperatura interna y externa en el biodigestor.

Días	T. interna del biodigestor (°C)	T. externa del biodigestor (°C)
Fecha de inicio	28/02/2023	28/02/2023
Fecha de finalización	30/04/2023	30/04/2023
Duración del registro	58 días	58 días
Temperatura cinética media	26,0	23,5°C
Promedio	18,8	17,1°C
T° Max	57,0	51,0°C
T° Min	5,4	3,5°C

Realizado por: Lema C., 2023

Los datos obtenidos en la Tabla 4-6 a partir de los dispositivos instalados interno y externo en el biodigestor, los cuales fueron monitoreados por 58 días, indican que hubo un incremento de temperatura cercano a 2 ° C en la parte interna del biodigestor de acuerdo al valor de su media 18,8 °C, en comparación al valor obtenido por el dispositivo externo el cual obtuvo una media de 17,1 °C, esto se debe a que se colocó un aislante alrededor del biodigestor para una mejor captura y retención de la temperatura y también se colocó cubierta de plástico tipo invernadero sobre el biodigestor.

4.7.4 Medición de la cantidad de biogás almacenado en la planta piloto

Se determinó la cantidad de biogás almacenado en el “tubo interno” de neumático, tal como se muestra el rendimiento de la producción de biogás.

Tabla 4-9: Determinación de la cantidad de biogás almacenado en el tubo interno a partir de las fechas.

Fecha	Cantidad biogás en L
16/3/2023	16,5
24/3/2023	18
31/3/2023	17,5
5/4/2023	16
14/4/2023	18
18/4/2023	17
25/4/2023	17
27/04/2023	17.5

Realizado por: Lema C., 2023

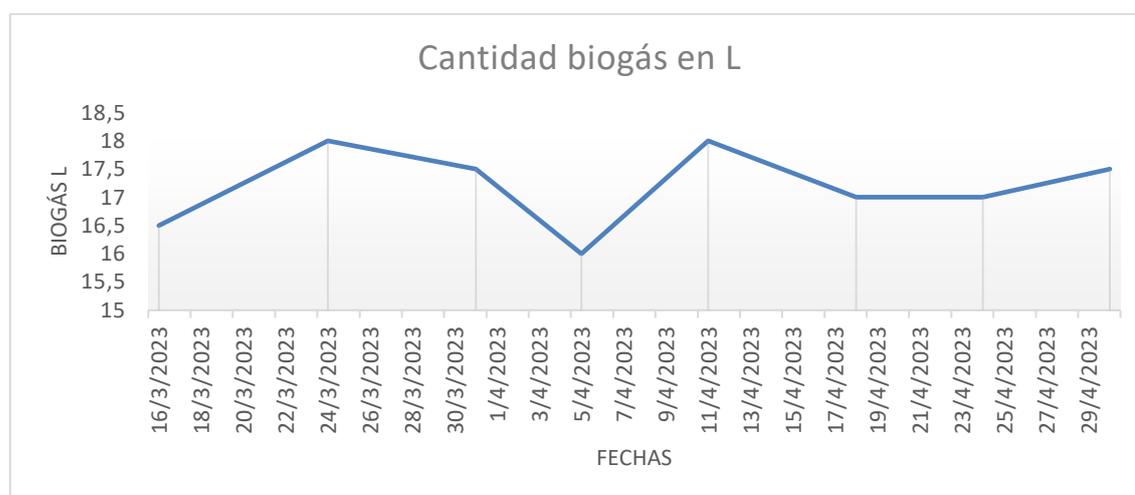


Ilustración 4-6: Cantidad de biogás almacenado en el tubo interno a partir de las fechas posteriores del proceso de generación de biogás

Realizado por: Lema C., 2023

Tabla 4-10: Análisis descriptivo de la producción de biogás.

Media	17,1428571
Error típico	0,28272243
Mediana	17
Moda	18
Desviación estándar	0,74801324
Varianza de la muestra	0,55952381
Rango	2
Mínimo	16
Máximo	18
Suma	120
Cuenta	7

Realizado por: Lema C., 2023

En base a la Ilustración 4-6 se identifican las fechas en el cual el tubo de llanta se llenó completamente. No se observó variabilidad en los valores de acuerdo con el análisis descriptivo de la Tabla 4-10, debido a que el gas se infló casi siguiendo una secuencia al número de días que tardo en inflarse completamente el tubo. Es importante recalcar que el desempeño de la producción de biogás está ligado a las condiciones climáticas que se presentaron en su momento.

4.7.4.1 Medición de biogás a partir de la generación la flama

Tabla 4-11: Control de generación de flama a partir del biogás almacenado en el tubo de llanta

Fechas con generación de flama	L de biogás
14/4/2023	16,00
18/4/2023	16,50
25/4/2023	16,00
27/4/2023	16,50
1/5/2023	16,50
5/5/2023	16,00
9/5/2023	16,50

Realizado por: Lema C., 2023

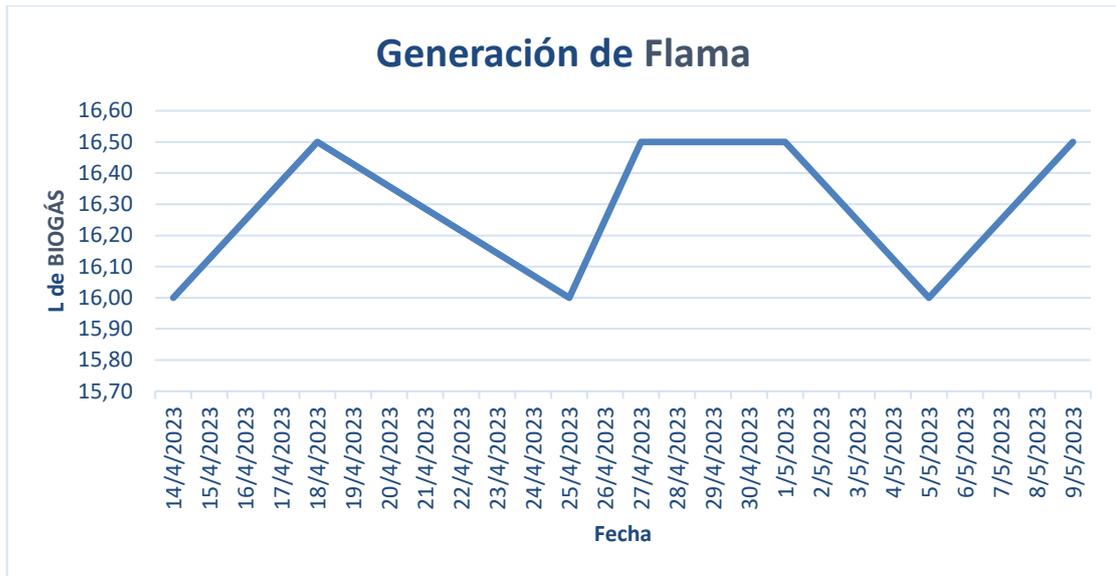


Ilustración 4-7: Fecha de inicio de la generación de biogás hasta la presente fecha.

Realizado por: Lema C., 2023

El desempeño del biogás con generación de flama de acuerdo con la Tabla 4-11 arrancó en la fecha 14/04/2023 (día 46) hasta la presente fecha se sigue generando biogás debido a que este tipo de sistemas es de alimentación continua y únicamente se detendrá el proceso cuando se deje de depositar la carga diaria y los microorganismos hayan degradado toda la materia orgánica, esto tiene relación en base al estudio de (Jaimes-Estévez et al. 2020, p. 3) el cual ya viene operando su biodigestor por 8 años.

4.7.4.2 Determinación del caudal del biogás

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

Q= caudal

V= 16,5 L

T= 22 s

$$Q = \frac{16.5 L}{22 s}$$

$$Q = 0.51 L/s$$

4.7.5 Control de pH

El registro de seguimiento del control de pH se lo hizo periódicamente, se realizó las pruebas mediante el uso de tiras de pH.

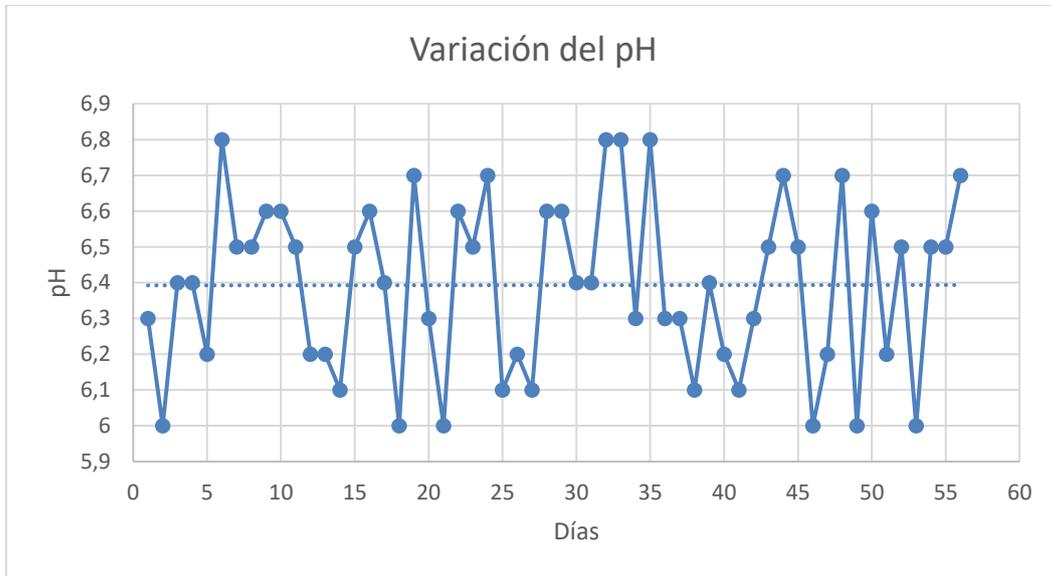


Ilustración 4-8: Control del pH en base al TRH

Realizado por: Lema C., 2023

En lo que respecta a la variación del pH no fue significativa, ya que se mantuvo en el rango aceptable de acuerdo con lo descrito en el Capítulo II, que menciona un rango comprendido de (6 a 8). Esto a su vez asegura una producción de biogás eficiente por parte de los microorganismos. De acuerdo con el estudio de PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE CODIGESTIÓN DE ESTIÉRCOL BOVINO Y RESIDUOS DE COSECHA DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) realizado por (Castro et al. 2020, p. 2) los valores obtenidos son similares a la experimentación realizada.

4.8 Diseño del biodigestor a partir de la materia prima disponible

Las ecuaciones aplicadas para el diseño del biodigestor a partir de la materia disponible que comprenden los apartados del ítem 4.8.1 al 4.8.13 fueron obtenidas del Capítulo III, debidamente referenciados y justificadas.

4.8.1 Cálculo de la carga diaria, CD

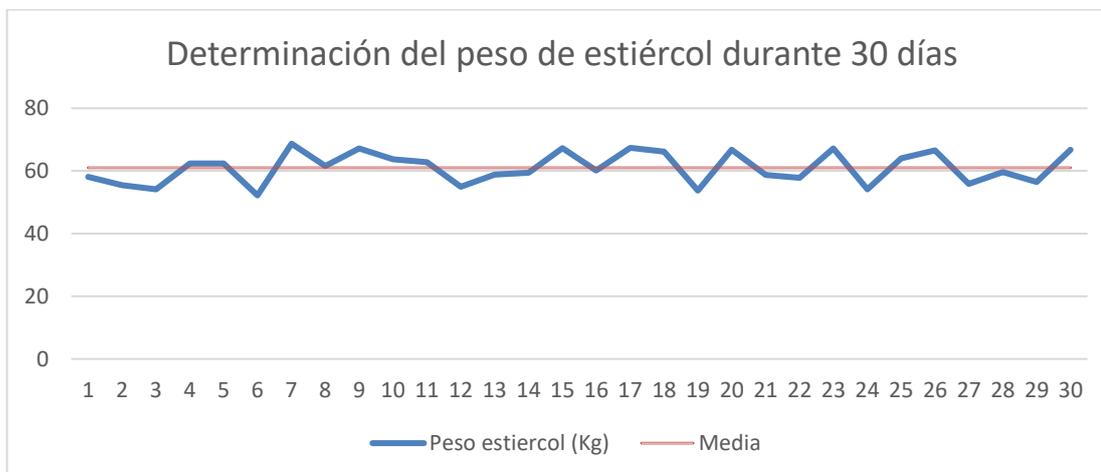


Ilustración 4-9: Determinación de la carga diaria de estiércol generado en la finca durante 30 días.

Realizado por: Lema C., 2023

Tabla 4-12: Análisis descriptivo del pesaje de la cantidad de estiércol

Media	61,02333333
Error típico	0,92145167
Mediana	60,9
Moda	54,1
Desviación estándar	5,046998653
Varianza de la muestra	25,4721954
Rango	16,5
Mínimo	52,2
Máximo	68,7
Suma	1830,7
Cuenta	30

Realizado por: Lema C., 2023

La producción diaria de estiércol no presentó una variación significativa de acuerdo con el análisis descriptivo planteado durante los 30 días, obteniendo una media de producción de 61.02 Kg/día. Por esta razón se optó por tomar el valor de su media para el dimensionamiento del biodigestor para la finca, debido a la dispersión de los pesos no fue significativa.

4.8.1. Determinación de la carga a depositar en el biodigestor, CD

$$CD = MPC + MH_2O$$

Donde:

$MPC = 61.02$ kg/día de acuerdo con la media de generación de estiércol al día.

$MH_2O = 61.02 * (\text{factor dilución } 3)$ L/día.

$$CD = 61.02 \frac{kg}{dia} * \frac{1L}{1Kg} + 183.6 \frac{L}{dia}$$

$$CD = 244.62 L \frac{mezcla}{dia} \text{ ó } 0.244 \frac{m^3}{dia}$$

4.8.2 Determinación del tiempo de retención, TRH

Para el posterior cálculo se aplica la ecuación que simula la reacción biológica de los microorganismos en base a la temperatura, de acuerdo con un coeficiente de correlación (R^2) de 0.88.

$$TRH = (-51.227 * Ln(T^\circ C) + 206.72)$$

Donde:

TR = Tiempo de retención en días.

Ln = Logaritmo natural.

$T^\circ C = 18^\circ C$ valor obtenido de la media de la temperatura externa (Tabla 4-8).

$$TRH = (-51.227 * Ln(17^\circ C) + 206.72)$$

$$TRH = 58.48 \text{ dias}$$

$$TRH = 58 \text{ dias}$$

4.8.3 Determinación del volumen líquido en el biodigestor, VL

$$V_L = CD * TRH$$

$$V_L = 0.244 \frac{m^3}{dia} * 58 \text{ dias}$$

$$V_L = 14.15 m^3 \text{ ó } 14152 L$$

4.8.4 Determinación del volumen de gas a producir, V_G

El volumen líquido se define las tres cuartas partes del total.

$$V_G = \frac{0.25}{0.75} * V_T$$
$$V_G = \frac{0.25}{0.75} * 14,15 m^3$$
$$V_G = 4.72 m^3$$

4.8.5 Volumen total del biodigestor, V_T

$$V_T = V_L + V_G$$
$$V_T = 14,15 m^3 + 4.72 m^3$$
$$V_T = 18.87 m^3$$
$$V_T = 18\ 870 L$$

4.8.6 Cálculo de sólidos totales, ST

$$ST = CD * \frac{0.17}{V_L}$$

Donde:

CD= 61,02 Kg.

0.17= valor elegido de acuerdo con tablas de (Herrero 2008, p. 45) debido a que el estiércol es fresco.

V_L =14.15 m^3 .

$$ST = 61.02 Kg * \frac{0.17}{14,15 m^3}$$
$$ST = 0.73 \frac{Kg}{m^3}$$

4.8.7 Determinación de sólidos volátiles, SV

Hace referencia a la fase gaseosa parte de los sólidos totales, se determina mediante la siguiente ecuación:

$$SV = ST * 0.77$$

Donde:

$$ST = 0,76 \text{ Kg/m}^3$$

0.77= Valor de acuerdo con tablas de (Herrero 2008, p. 45) respecto a los SV para estiércol bovino

$$SV = 0.73 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * 0.77$$

$$SV = 0.5 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3/\text{dia}}$$

4.8.8 Producción de biogás, PB

De acuerdo con la siguiente ecuación se determina la cantidad de biogás estimada de acuerdo con los valores planteados.

$$PB = 0.27 * SV$$

Donde:

0.27= valor tomado de acuerdo con tablas de (Herrero 2008, p. 45) se estima la producción teórica de la cantidad de biogás a generarse.

$$SV = 0.585 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3/\text{dia}}$$

$$\begin{aligned} PB &= 0.27 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg SV m}^3 \text{ dia}} * 0.56 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}} \\ &= PB * V_L \\ &= 0.15 * 13.66 \text{ m}^3 \\ &= 2.15 \text{ m}^3 \\ &= 2158.2 \text{ L de biogas} \end{aligned}$$

4.8.9 Determinación del radio del biodigestor

De acuerdo con la fórmula del cilindro.

$$C = 2 * \pi * r$$

$$r = \frac{C}{\pi * 2}$$

C= 5 m (dicho valor se asume de acuerdo con la tabla 11, ver ANEXO P).

$$r = \frac{5 \text{ m}}{\pi * 2}$$
$$r = 0,8 \text{ m}$$

4.8.10 Diámetro de la circunferencia

$$D = 2 * r$$

Donde:

Pi= 3.1415

R= 0,8 m

$$D = 2 * 0.8 \text{ m}$$

$$D = 1,6 \text{ m}$$

4.8.11 Determinación del área de la zanja, m²

El tipo de suelo de la finca es tipo arcilloso por lo cual se usó el talud de $\alpha=7.5^\circ$

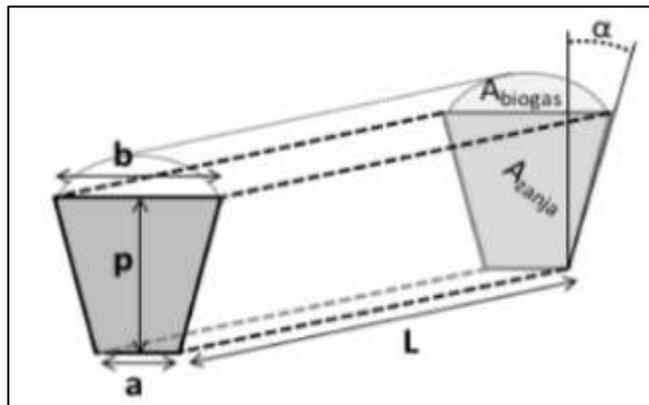


Ilustración 4-10: Esquema de una zanja trapezoidal de acuerdo con cada una de las paredes de la zanja

Fuente: Herrero 2008, p. 48

A su vez para el cálculo de los lados del trapecio, los valores se tomaron en base a la Tabla 12 de acuerdo con el talud elegido, (ver ANEXO Q).

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

Donde:

$$P=1,54 * r$$

$$A= 1,23 * r$$

$$B= 1,63 * r$$

$$A_{zanja} = 1.54m * r * \frac{(1.23m * r + 1.63m * r)}{2}$$

$$A_{zanja} = (1.54 * (0.8m)) * \frac{(1.23 * (0.8m) + 1.63 * (0.8m))}{2}$$

$$A_{zanja} = 1,39m^2$$

4.8.12 Determinación de la longitud del biodigestor, L

Datos:

L= longitud necesaria em base a los plásticos disponibles en el mercado.

$$V_L = 13,66 m^3$$

$$A_{zanja} = 1,39 m^2$$

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

$$L = \frac{13,66 m^3}{1,39 m^2}$$

$$L = 9,79 m$$

De acuerdo con la relación:

$$\frac{L}{D} = 5 a 10$$

Donde:

$$L= 9.79 m$$

$$D= 1.6 m$$

$$\frac{L}{D_{diametro}} = \frac{9.79m}{1,6 m} = 6,2$$

En contraste al cálculo de la relación de 5 a 10 el valor de 6,2 se encuentra en ese rango estipulado por los autores para el diseño del biodigestor.

4.9 Discusión

En Ecuador la aplicación de la tecnología de los biodigestores tubulares en los sectores agrícolas e industriales es escasa, aunque algunas provincias como: Azuay, El Oro, Imbabura, Napo y Pichincha tienen experiencia en su uso, según la Coordinadora Ecuatoriana de Agroecología (CEA), de acuerdo con (Herrero et al. 2015, p. 13)

En cuanto al estudio, la finca Castillo de Altura se encuentra a una latitud de 3206 m.s.n.m., situada en una zona andina, posee un clima frío entre los 14 y 16 °C, según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDyOT) de la parroquia San Juan. La finca se dedica al ordeño mecánico de vacas con un total de 50 ejemplares distribuidas en 27 vacas, 12 vacunas, 2 toros, 4 terneros y 5 terneras. Actualmente, el estiércol generado en las áreas de preparación de las vacas y la zona del ordeño mecánico es usado únicamente para abonar los suelos de la propiedad; por lo que no se aprovecha en la generación de biogás e inclusive energía eléctrica a partir de estos residuos.

El presente proyecto buscó la demostración de la efectividad en la producción de biogás según las condiciones climáticas del lugar. Para ello se realizó una caracterización físico-química de la muestra de estiércol de la finca analizando los principales componentes como: pH, DBO, DQO, relación C/N. De acuerdo con los cálculos se obtuvo un tiempo de retención de 58 días; este proyecto es similar a la “ELABORACIÓN DE UN BIODIGESTOR PILOTO TUBULAR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO, EN UNA VIVIENDA DE LA COMUNIDAD DE TEMBO” realizado por (Criollo y Guzmán 2014, pp. 26-27) en cuanto al tiempo de retención, la temperatura y el lugar de estudio.

Se determinó la relación C/N adecuada para asegurar el rendimiento del proceso de digestión anaerobia por parte de los microorganismos en base a los sustratos: llegando a un óptimo de 20:1 de acuerdo con lo que indica (Barreda Del Carpio et al. 2022, p. 5). Esto garantiza un buen balance de nutrientes para el proceso de la digestión anaerobia.

El pH se monitoreó durante los 58 días y se obtuvo una media de 6,4 a lo largo del proceso que acorde a bibliografía el rango es óptimo es de 6 a 8. En lo que respecta la temperatura a la cual operó internamente en el biodigestor tuvo una media de 18.8 °C y por la parte externa del

biodigestor opero a 17,1 °C, que de acuerdo con el estudio realizado de Psychrophilic Full Scale Tubular Digester Operating over Eight Years: Complete Performance Evaluation and Microbiological Population realizado por (Jaimés-Estévez et al. 2020, p. 2) en lo que respecta a biodigestores tubulares, éste operó a condiciones psicrófilas ya que la temperatura de operación fue menor a 20 °C, lo que demuestra la generación de biogás en estas condiciones.

Se observó la generación de flama para la fecha 30/03/2023 que acorde con el estudio realizado por (Criollo y Guzmán 2014, pp. 81-82) donde obtuvieron generación de gas del 39 al día 46; en relación con el trabajo obtenido en la Finca Castillo la cual es obtuvo a partir del día 46 y una flama azulada a partir del día 58, lo que indica una producción de metano acorde a la colaboración de la flama. En cuanto a los parámetros de DBO, DQO y pH transcurridos los 58 días presentaron una disminución en la concentración en la muestra de biol; lo que indica que se realizó el proceso de digestión aerobia tuvo una degradación moderada para la producción de biogás.

También se demuestra para un mejor rendimiento en climas menores a 20° C es necesario un tiempo de retención hidráulica de 30 a 50 días para mantener una producción y volumen de biogás estables. Sin embargo, implica un mayor tamaño del biodigestor (Jaimés-Estévez et al. 2020, p. 2). El diseño del biodigestor tubular para el aprovechamiento del estiércol disponible para la finca Castillo obtuvo los siguientes valores: tiempo de retención de 58 días, carga diaria 0.244 m³/día, por lo menos líquido del biodigestor 14,15 m³, volumen de gas de 4,55 m³. El dimensionamiento se obtuvo de longitud 9.79 m, ancho del rollo 2,5 m y un diámetro de 1,6 m. Este estará instalado en una zanja trapezoidal de acuerdo con los siguientes valores profundidad de 1,23 m, parte inferior de la zanja (a) hoy 0,98 m y parte superior de la zanja (b) 1,30 m.

Por último el biol fue usado en cultivos de uvilla y parte en la pradera de la finca, mostrando un mejoramiento en el desarrollo de las plantas en su crecimiento y coloración principalmente, que indica qué es un buen fertilizante orgánico de acuerdo al trabajo de PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y BIOABONOS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE BOVINO EN BIODIGESTOR TUBULAR EN NARANJOS, BAGUA, AMAZONAS realizado por (Montenegro 2020, p. 30) donde obtuvo respuestas similares haciendo aplicación del biol generado del proceso de fermentación anaerobia.

4.10 Tabla resumen para el dimensionamiento del biodigestor tubular

Tabla 4-13: Diseño del biodigestor a partir de la materia prima disponible

Parámetro	Unidad	Variable	Valor
Carga diaria	m ³ /día	CD	0,244
Tiempo de retención	días	TRH	58
Volumen líquido en el biodigestor	m ³	VL	14,15
Volumen gas	m ³	VG	4,55
Volumen total biodigestor	m ³	VT	18,72
Sólidos Totales	Kg/m ³	ST	0,76
Sólidos volátiles	Kg/m ³ día	SV	0,56
Producción de biogás	m ³	PB	2,158

Cálculo del biodigestor

Longitud del biodigestor	m	L	9,79
Ancho del rollo	m	A	2,5
Diámetro del biodigestor	m	D	1,6

Dimensionado de la zanja

Zanja A	m	a	0,98
Zanja b	m	b	1,30
Zanja p	m	p	1,23

Realizado por: Lema C., 2023

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se realizó la experimentación utilizando un biodigestor prototipo en un tanque de 200 litros (Plastigama). Se agregaron las cantidades adecuadas de estiércol (36 kg), agua (108 litros), suero de leche (5 litros) y melaza (10 litros), necesarias para llevar a cabo la digestión anaerobia, cumpliendo con una relación C/N de 20.23.
- La generación de la flama se pudo apreciar desde el 14 de abril con una coloración entre amarillo y anaranjado respectivamente. La prueba final se realizó el 26 de abril (día 58) al adaptar la válvula a una cocina industrial lo que permitió encender una hornilla, pero su duración fue poco debido a la falta de presión.
- De acuerdo con la matriz de decisión se evaluó los criterios: eficiencia, durabilidad, costo de construcción/funcionamiento y operación a partir de los modelos de biodigestores: chino, indio y taiwanés. Considerando las condiciones climáticas de la Finca la opción más rentable y viable es el modelo taiwanés debido a su fácil acceso y disponibilidad de materiales en calidad y precio lo que facilita su realización en relación con los dos modelos restantes.
- Se diseñó un biodigestor modelo taiwanés para una carga diaria de 61.03 kg/día, que generará 37.21 m³ de biogás en la finca a un tiempo de retención de 58 días. El dimensionamiento de longitud de 9,79 m, diámetro de 1,6 m y un ancho de rollo de 2,5 m este deberá ser instalado en una zanja con aisladores térmicos como paja para una mejor retención del calor además de tener una cubierta plástica (invernadero) para una mejor captación de calor. Además, el dimensionado de la zanja trapezoidal tiene las siguientes dimensiones parte superior 1,30 m, parte inferior 0,98m y una profundidad de la zanja de 1,23 m.

5.2 Recomendaciones

- Es importante instalar un filtro de biogás para la eliminación de H_2S antes del almacenamiento del biogás (gasómetro), evitando así el deterioro de las tuberías y de la cocina adaptada.
- Al usar el biol generado del proceso de fermentación anaerobia es importante aplicarlo durante la etapa de crecimiento principalmente ya que esto ayuda en el desarrollo de la planta; sin embargo, es de evitar su uso durante el periodo de florecimiento y generación de fruta; ya que puede llegar a quemar a la planta.
- De ser necesario se debe colocar aislantes térmicos como paja, madera y cubiertas de plástico PVC para la retención del calor y además para asegurar al biodigestor de las raíces que pueden llegar a dañar al mismo.
- Dependiendo de las condiciones climáticas del lugar donde se va a instalar el biodigestor, dependerá los accesorios y tipo de material para obtener un óptimo desempeño en la producción de biogás.
- Si la ubicación del biodigestor a instalar tiene temperaturas menores a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ es importante implementar una cubierta tipo invernadero para mejorar la captación solar y ayudar en el proceso de la digestión anaerobia.

BIBLIOGRAFÍA

ABANADES, S.; et al. “A critical review of BIOGÁS production and usage with legislations framework across the globe”. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, vol. 19, no. 4, ISSN 1735-1472. DOI 10.1007/s13762-021-03301-6.

ARIZA, D.; et al. “Evaluación de producción de biogás y reducción de carga orgánica de vinazas mediante digestión anaerobia”. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 2019, vol. 21, no. 2, ISSN 1909-8758. DOI 10.15446/rev.colomb.biote.v21n2.79555.

ÁVILA, C.; et al. “Producción de biogás a partir de procesos de digestión y codigestión anaerobia usando estiércol de cerdo y residuos vegetales”. *RedBioLAC*, 2022, vol. 6.

AYALA, S.; et al. "Estudio de un sistema de energía renovable para la producción de biogás a partir del estiércol de ganado en la hacienda Nueva Esperanza (Cotopaxi, Ecuador)". ("Revista ESPACIOS | Vol. 43 (Nº 05) Año 2022") *Pag* [en línea], vol. 43, ISSN 2739-0071. DOI 10.48082/espacios-a22v43n05p05. Disponible en: <https://www.revistaespacios.com>.

BARREDA DEL CARPIO, J.; et al. "Co-Digestión de Tres Tipos de Estiércol (Vaca, Cuy y Cerdo) para Obtener Biogás en el Sur del Perú". *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 2022, vol. 24, no. 3, ISSN 2306-8582. DOI 10.18271/ria.2022.457.

BARRENA, M.; et al. “Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas, Perú”. *Arnaldoa*, 2019, vol. 26, no. 2413-3299, DOI 10.22497/arnaldoa.262.26214.

BAUTISTA, J.R.; et al. “Anaerobic digestion and integration at urban scale: feedback and comparative case study”. *Energy, Sustainability and Society*, 2018, vol. 8, no. 1, ISSN 2192-0567. DOI 10.1186/s13705-018-0170-3.

BENITEZ, M.; et al. “Co- digestión anaerobia de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y su lixiviado”. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 2020, vol. 22, no. 2, ISSN 1909-8758. DOI 10.15446/rev.colomb.biote.v22n2.70345.

BRITO, H.; et al. “GENERACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE GANADO A NIVEL DE FINCA EN EL ORIENTE ECUATORIANO”.2016.

CABOS, J.; et al. “Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Potassium concentrations of biol and biosol obtained from cattle manure in a polyvinyl chloride geomembrane biodigester”. *Arnaldoa* [en línea], 2019, vol. 26, no. 3, ISSN 2413-3299. DOI 10.22497/arnaldoa.263.26321. Disponible en: <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26321>.
<https://orcid.org/0000-0001-6331-2130cbardalesv@upao.edu.pe>/<https://orcid.org/0000-0002-7811-3676>/<https://orcid.org/0000-0002-9808-186Xlarturo0208@gmail.com>/<https://orcid.org/0000-0002-7323-0566>.

CASTRO, R.; et al. “PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE CODIGESTIÓN DE ESTIÉRCOL BOVINO Y RESIDUOS DE COSECHA DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)”. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 2020, vol. 36, no. 3, ISSN 01884999. DOI 10.20937/RICA.53545.

CHAMBA, L.; et al. “PRODUCCIÓN GANADERA: LA DEFORESTACIÓN Y DEGRACIÓN DEL SUELO, UNA ESTRATEGIA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE”. 2020. S.I.:

CIRUJEDA, J. *Aguas residuales urbanas*. 1. España: ELEARNING S.L. 2019.

CORRAL, C.; et al. “IMPACTOS AMBIENTALES GENERADOS POR LA GANADERÍA EN LA PROVINCIA DE SANTO DOMINGO DE TSÁCHILAS”. *UNESUM-Ciencias: Revista Científica Multidisciplinaria* [en línea], 2021, vol. 5, no. 2, ISSN 2602-8166. Disponible en: <https://orcid.org/0000-0001-8339-2051>.

CRIOLLO, E. & GUZMÁN, A. ELABORACIÓN DE UN BIODIGESTOR PILOTO TUBULAR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO, EN UNA VIVIENDA DE LA COMUNIDAD DE TEMBO. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2014

ELITECH. Registrador de datos de temperatura y humedad Elitech GSP-6. 2021.

ELLACURIAGA, M.; et al. “Is Decentralized Anaerobic Digestion a Solution? Analyzing BIOGÁS Production and Residential Energy Demand”. *Eng*, 2022, vol. 3, no. 4, ISSN 2673-4117. DOI 10.3390/eng3040045.

ESPAC. Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua 2020. . S.I.:

ESPINOSA, E. “Livestock activity and environmental pollution”. *Anales de la Real Academia de Doctores*, 2021, vol. 6.

FAO. “Soluciones ganaderas para el cambio climático”. [en línea]. 2018: Disponible en: <http://www.fao.org/gleam/results/en/>.

FAO. Evaluación de “Ganadería climáticamente inteligente: Integrando la reversión de la degradación de tierras y reduciendo los riesgos de desertificación en provincias vulnerables”. [en línea]. Rome, Italy: 2020 [consulta: 8 mayo 2023]. Disponible en: <https://www.fao.org/documents/card/en/c/CB1573ES>.

FERNÁNDEZ, D.F. ACTUALIZACIÓN PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL PARROQUIA SAN JUAN. [en línea]. 2019: [consulta: 2 junio 2022]. Disponible en: http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/0660823500001_ACTUALIZACI%C3%92N%20PDYOT%20SAN%20JUAN%202015-2019_30-10-2015_22-28-53.pdf.

GESA TERMOMETROS. Data logger Tempmate M1 para transporte de mercancías. 2019.

GUTIÉRREZ, A.; et al. “Obtención de biogás mediante la fermentación anaerobia de estiércol”. *AGRO-VET*, 2018, vol. 2, no. 2523-2037,

HANUM, F.; et al. “Evaluation of a Small-Scale Anaerobic Digestion System for a Cattle Farm under an Integrated Agriculture System in Indonesia with Relation to the Status of Anaerobic Digestion System in Japan”. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 4, ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su15043833.

HARO, J. & GÓMEZ, C. Mitigación de emisiones provenientes de la ganadería en la región andina. . Lima: 2018.

HERNÁNDEZ, N.; et al. “EMISIÓN DE N₂O, CO₂ Y NH₃ A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE BOVINOS CON DIFERENTE PORCENTAJE DE PROTEÍNA CRUDA EN LA DIETA”. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2019, vol. 35, no. 3, ISSN 01884999. DOI 10.20937/RICA.2019.35.03.07.

HERRERO, J. *BIODIGESTORES FAMILIARES GUIA DE DISEÑO Y MANUAL DE DISEÑO DE INSTALACION Biodigestores de polietileno tubular de bajo costo para trópico, valle y altiplano*. Bolivia: 2008. ISBN 978-99954-0-339-3.

HERRERO, J. *BIODIGESTORES TUBULARES GUIA DE DISEÑO Y MANUAL DE INSTALACION*. Redbiolac. Ecuador: 2019.

HERRERO, J.; et al. “Hacia un sector de biodigestores sostenible en Ecuador: Insumos para un componente de biodigestores de PNABE”. . S.l.: 2015.

HIDALGO, W.; et al. “Desechos orgánicos que generan gas a través de un biodigestor diseño experimental en la parroquia Guasaganda de la ciudad de la Maná”. *Ciencia Digital*, 2019, vol. 3, no. 2.6, ISSN 2602-8085. DOI 10.33262/cienciadigital.v3i2.6.558.

JAIMES-ESTÉVEZ, J.; et al. “Psychrophilic Full Scale Tubular Digester Operating over Eight Years: Complete Performance Evaluation and Microbiological Population”. *Energies*, 2020, vol. 14, no. 1, ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en14010151.

KARKI, R.; et al. “Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives”. *Bioresource Technology*, 2021, vol. 330, ISSN 09608524. DOI 10.1016/j.biortech.2021.125001.

MAMANI, J.; et al. “BIOGÁS production systems: rationale, improvement techniques, advantages and disadvantages”. *Agroindustrial Science*, 2021, vol. 11, no. 2, DOI 10.17268/agroind.sci.2021.02.14.

MAZURKIEWICZ, J. “Energy and Economic Balance between Manure Stored and Used as a Substrate for BIOGÁS Production”. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 2, ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en15020413.

MEDINA, K.; et al. “Influencia de las concentraciones del bioabono “biol” en el cultivo hidropónico de Lactuca sativa var. longifolia (Asteraceae)”. *Scielo*, 2022, vol. 29, no. 2413-3299.

MINENERGIA; et al. *Manual de biogás*. 2011. Santiago de Chile:

MONTENEGRO, R. PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y BIOABONOS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE BOVINO EN BIODIGESTOR TUBULAR EN NARANJOS, BAGUA,

AMAZONAS. Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS. 2020.

MORALES, V. *Sistema Bio Nati Manual de Instalación en zona Andina*. Primera. Bolivia: INSPIRARTE. 2016.

NSAIR, A.; et al. “Operational Parameters of BIOGÁS Plants: A Review and Evaluation Study”. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 15, ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en13153761.

OSEJOS, M.A.; et al. “Granja EMAVIMA Jipijapa-Ecuador Production of BIOGÁS with pig manure from a biodigester at the EMAVIMA Jipijapa Farm-Ecuador”, 2018. [en línea], vol. 4, DOI 10.23857/dom.cien.pocaip.2018.vol.4.n.1.709-733. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.23857/dom.cien.pocaip> URL: <http://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/index>.

PARITOSH, K.; et al. “Food Waste to Energy: An Overview of Sustainable Approaches for Food Waste Management and Nutrient Recycling”. *BioMed Research International*, vol. 2017, ISSN 2314-6133. DOI 10.1155/2017/2370927.

PARRA, D.; et al. “Livestock residual biomass: review of anaerobic digestion as a method of energy production and other byproducts”. *UIS Ingenierías*, 2019, vol. 18.

PIMENTEL, J.; et al. “Digestión anaerobia de estiércol de ovino para producir biogás y bioabono”. *Agro Productividad*, 2019, vol. 12, no. 4, ISSN 2594-0252. DOI 10.32854/agrop.v0i0.1201.

QIAN, Y.; et al. “Environmental status of livestock and poultry sectors in China under current transformation stage”. *Science of The Total Environment*, 2018, vol. 622-623, ISSN 00489697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.12.045.

RIERA, M.A.; et al. “RESIDUOS AGROINDUSTRIALES GENERADOS EN ECUADOR PARA LA ELABORACIÓN DE BIOPLÁSTICOS”. *Revista Ingeniería Industrial* [en línea], 2019, vol. 17, no. 3, ISSN 07179103. DOI 10.22320/S07179103/2018.13. Disponible en: <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RI/article/view/3924>.

ROCHINA, H. DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA GENERACIÓN DE BIOGÁS Y BIOL EN LA COMUNIDAD DE ILLAGUA DEL CANTÓN GUARANDA. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. 2018.

SHIH, M.-F.; et al. “Comparison of Potential Environmental Impacts and Waste-to-Energy Efficiency for Kitchen Waste Treatment Scenarios in Central Taiwan”. *Processes*, 2021, vol. 9, no. 4, ISSN 2227-9717. DOI 10.3390/pr9040696.

SILVAN, O.; et al. “De estiércol de ganado a fuente de energía”. *Ecofronteras*, 2018, vol. 22, ISSN 2007-4549.

UPME. GUÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS. Bogotá: 2003.

VARGAS, Y. & PÉREZ, L. “APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AMBIENTE”. *Historia del artículo Resumen / Abstract / [en línea]*, 2018, vol. 14, no. 1, ISSN 1900-4699. DOI 10.18359/rfcb.xxxx. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18359/rfcb.xxxx>.

VILLARROEL, J.; et al. “Techno-Economic Study of a BIOGÁS-Based Polygeneration Plant for Small Dairy Farms in Central Bolivia”. . S.l.: 2020, pp. 675-687.

WANG, X.; et al. “Household BIOGÁS digesters or medium–large-scale BIOGÁS plants: a conflicting issue in rural China”. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, vol. 26, no. 32, ISSN 0944-1344. DOI 10.1007/s11356-019-06426-x.



ANEXOS

ANEXO A: PESAJE DEL ESTIÉRCOL EN CADA UNA DE LAS ZONAS DETERMINADAS PARA EL ESTUDIO



ANEXO B: TOMA DE LA MUESTRA DE ESTIÉRCOL EN BASE A LOS CUADRANTES DEL ÁREA DE ESTUDIO



ANEXO C: CONSTRUCCIÓN DEL INVERNADERO PARA LA CUBIERTA DEL BIODIGESTOR

Construcción del invernadero



Sistema del biodigestor completo



ANEXO D: PREPARACIÓN DE LOS SUSTRATOS PARA LA COLOCACIÓN EN EL BIODIGESTOR

Descripción	Gráfico
Colocación directa del suero de leche propio de la finca de cantidad de 5 L.	A photograph of a person wearing a white lab coat and yellow rubber boots. They are leaning over a large, shallow metal tub and pouring liquid from a white plastic jug into it. The tub contains some brownish material, possibly substrate. The background shows an outdoor setting with a fence and a building.
Colocación de melaza de un total de 10 L	A photograph of a person wearing a white lab coat and yellow rubber boots. They are leaning over a large, shallow metal tub and pouring a dark liquid from a white plastic jug into it. The tub contains some brownish material. The background shows an outdoor setting with a fence and a building.

ANEXO E: COLOCACIÓN DE LOS SUSTRATOS COMBINADOS DE ACUERDO CON LA RELACIÓN C/N ÓPTIMA



ANEXO F: COLOCACIÓN DEL SENSOR MI USB PDF TEMPERATURE DATA LOGGER EN EL BIODIGESTOR



ANEXO G: COLOCACIÓN E INSTALACIÓN DEL SENSOR GSP-6 MULTI-USE TEMPERATURE & HUMIDITY DATA LOGGER EN EL INTERIOR DEL BIODIGESTOR

Instalación del dispositivo en el biodigestor



Configuración del dispositivo



ANEXO H: MEDICION DEL BIOGÁS, POR EL METODO DEL DESPLAZAMIENTO

Sistema armado	Medición del biogás	Medición final

ANEXO I: REGISTRO DEL PH DE ACUERDO AL TRH

Días	Fecha	pH	Media d
1	28/2/2023	6,3	6,5
2	1/3/2023	6	
3	2/3/2023	6,4	
4	3/3/2023	6,4	
5	4/3/2023	6,2	
6	5/3/2023	6,8	
7	6/3/2023	6,5	
8	7/3/2023	6,5	
9	8/3/2023	6,6	
10	9/3/2023	6,6	
11	10/3/2023	6,5	
12	11/3/2023	6,2	
13	12/3/2023	6,2	
14	13/3/2023	6,1	
15	14/3/2023	6,5	6,4
16	15/3/2023	6,6	
17	16/3/2023	6,4	
18	17/3/2023	6	
19	18/3/2023	6,7	
20	19/3/2023	6,3	
21	20/3/2023	6	
22	21/3/2023	6,6	
23	22/3/2023	6,5	
24	23/3/2023	6,7	
25	24/3/2023	6,1	
26	25/3/2023	6,2	
27	26/3/2023	6,1	
28	27/3/2023	6,6	
29	28/3/2023	6,6	6,6
30	29/3/2023	6,4	
31	30/3/2023	6,4	
32	31/3/2023	6,8	
33	1/4/2023	6,8	
34	2/4/2023	6,3	

35	3/4/2023	6,8	
36	4/4/2023	6,3	6,2
37	5/4/2023	6,3	
38	6/4/2023	6,1	
39	7/4/2023	6,4	
40	8/4/2023	6,2	
41	9/4/2023	6,1	
42	10/4/2023	6,3	
43	11/4/2023	6,5	6,6
44	12/4/2023	6,7	
45	13/4/2023	6,5	
46	14/4/2023	6	
47	15/4/2023	6,2	
48	16/4/2023	6,7	
49	17/4/2023	6	
50	18/4/2023	6,6	6,4
51	19/4/2023	6,2	
52	20/4/2023	6,5	
53	21/4/2023	6	
54	22/4/2023	6,5	
55	23/4/2023	6,5	
56	24/4/2023	6,7	

ANEXO J: MEDICIÓN DEL PH TOMADA UNA MUESTRA DEL BIODIGESTOR POR DÍA



ANEXO K: FILTRO DE BIOGÁS A PARTIR DEL TRATAMIENTO DE LAS LIMADURAS DE HIERRO

Antes de tratar las virutas



Colocación de las virutas tratadas en el biodigestor



ANEXO L: EVOLUCION DE LA COLORACION DE LA FLAMA DE ACUERDO AL TRH

31/03/2023 (generación de flama)	14/04/2023 (maduración de la flama)	26/04/2023 Prueba final flama en cocina industrial
		

ANEXO M: REGISTRO DEL PESAJE DEL ESTIÉRCOL DURANTE LOS 30 DIAS

Días	Fechas	Peso estiércol (Kg)
1	12/9/2022	58,1
2	13/9/2022	55,5
3	14/9/2022	54,1
4	15/9/2022	62,4
5	16/9/2022	62,4
6	17/9/2022	52,2
7	18/9/2022	68,7
8	19/9/2022	61,6
9	20/9/2022	67,2
10	21/9/2022	63,7
11	22/9/2022	62,8
12	23/9/2022	55
13	24/9/2022	58,8
14	25/9/2022	59,4
15	26/9/2022	67,3
16	27/9/2022	60,2
17	28/9/2022	67,4
18	29/9/2022	66,2
19	30/9/2022	53,7
20	1/10/2022	66,8
21	2/10/2022	58,7
22	3/10/2022	57,8
23	4/10/2022	67,2
24	5/10/2022	54,1
25	6/10/2022	64
26	7/10/2022	66,6
27	8/10/2022	55,9
28	9/10/2022	59,6
29	10/10/2022	56,5
30	11/10/2022	66,8

ANEXO N: REGISTRO DE LA TEMPERATURA INTERNA DE ACUERDO AL TRH

Día	Fecha	°C Prom.
1	28/2/2023	21,03
2	1/3/2023	20,11
3	2/3/2023	21,96
4	3/3/2023	19,01
5	4/3/2023	18,92
6	5/3/2023	14,69
7	6/3/2023	18,19
8	7/3/2023	16,16
9	8/3/2023	18,77
10	9/3/2023	19,28
11	10/3/2023	17,31
12	11/3/2023	15,75
13	12/3/2023	18,51
14	13/3/2023	17,88
15	14/3/2023	14,47
16	15/3/2023	18,42
17	16/3/2023	21,33
18	17/3/2023	20,79
19	18/3/2023	22,00
20	19/3/2023	19,20
21	20/3/2023	19,84
22	21/3/2023	16,18
23	22/3/2023	21,89
24	23/3/2023	21,04
25	24/3/2023	16,90
26	25/3/2023	18,42
27	26/3/2023	17,66
28	27/3/2023	17,91
29	28/3/2023	16,23
30	29/3/2023	19,00
31	30/3/2023	20,23
32	31/3/2023	14,65

33	1/4/2023	19,70
34	2/4/2023	20,52
35	3/4/2023	21,23
36	4/4/2023	17,87
37	5/4/2023	18,85
38	6/4/2023	18,75
39	7/4/2023	18,10
40	8/4/2023	17,70
41	9/4/2023	21,42
42	10/4/2023	20,23
43	11/4/2023	19,35
44	12/4/2023	20,46
45	13/4/2023	17,38
46	14/4/2023	20,03
47	15/4/2023	20,44
48	16/4/2023	17,11
49	17/4/2023	15,56
50	18/4/2023	20,15
51	19/4/2023	17,72
52	20/4/2023	19,25
53	21/4/2023	19,67
54	22/4/2023	15,33
55	23/4/2023	18,81
56	24/4/2023	17,82
57	25/4/2023	19,90
58	26/4/2023	21,10

Realizado por: Lema, 2023

ANEXO O: REGISTRO DE LA TEMPERATURA EXTERNA DEL BIODIGESTOR DE ACUERDO AL TRH

Día	Fecha	°T Prom.
1	28/2/2023	19,58
2	1/3/2023	18,99
3	2/3/2023	20,91
4	3/3/2023	17,92
5	4/3/2023	18,15
6	5/3/2023	17,32
7	6/3/2023	17,87
8	7/3/2023	14,83
9	8/3/2023	17,86
10	9/3/2023	18,80
11	10/3/2023	16,03
12	11/3/2023	13,88
13	12/3/2023	16,78
14	13/3/2023	15,57
15	14/3/2023	13,43
16	15/3/2023	16,16
17	16/3/2023	18,52
18	17/3/2023	18,58
19	18/3/2023	18,39
20	19/3/2023	16,53
21	20/3/2023	17,01
22	21/3/2023	14,35
23	22/3/2023	18,76
24	23/3/2023	19,39
25	24/3/2023	14,94
26	25/3/2023	17,04
27	26/3/2023	16,91
28	27/3/2023	15,91
29	28/3/2023	15,04
30	29/3/2023	17,12
31	30/3/2023	18,27

32	31/3/2023	13,75
33	1/4/2023	17,71
34	2/4/2023	18,64
35	3/4/2023	19,51
36	4/4/2023	16,66
37	5/4/2023	14,85
38	6/4/2023	15,42
39	7/4/2023	18,97
40	8/4/2023	13,82
41	9/4/2023	19,95
42	10/4/2023	19,10
43	11/4/2023	17,48
44	12/4/2023	19,20
45	13/4/2023	17,13
46	14/4/2023	15,83
47	15/4/2023	18,08
48	16/4/2023	18,19
49	17/4/2023	14,02
50	18/4/2023	17,36
51	19/4/2023	18,80
52	20/4/2023	16,11
53	21/4/2023	16,63
54	22/4/2023	18,00
55	23/4/2023	12,91
56	24/4/2023	18,36
57	25/4/2023	16,87
58	26/4/2023	17,46

ANEXO P: LONGITUDES MMINIMO, MAXIMO Y OPTIMA PARA BIODIGESTORES TUBULARES A PARTIR DE LA CIRCUNFERENCIA

Circunferencia (m)	Ancho de rollo (m)	Radio (m)	Diámetro (m)	Longitud biodigestor tubular		
				mínima (m)	máxima (m)	óptima (m)
2	1	0.32	0.64	3.2	6.4	4.8
3	1.5	0.48	0.95	4.8	9.5	7.2
4	2	0.64	1.27	6.4	12.7	9.5
5	2.5	0.80	1.59	8.0	15.9	11.9
6	3	0.95	1.91	9.5	19.1	14.3
7	3.5	1.11	2.23	11.1	22.3	16.7
8	4	1.27	2.55	12.7	25.5	19.1
9	4.5	1.43	2.86	14.3	28.6	21.5
10	5	1.59	3.18	15.9	31.8	23.9
14	7	2.23	4.46	22.3	44.6	33.4

Fuente: (Herrero 2019, p. 115)

ANEXO Q: PARAMETROS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE ZANJAS TUBULARES A PARTIR DEL ANGULO Y RADIO DE LA CIRCUNFERENCIA

α (°) desde vertical	% VL	%VB	a (m)	b (m)	p (m)	A_{zanja} (m ²)	A_{biogas} (m ²)	A_{total} (m ²)
0	88	12	1.49 x r	1.49 x r	1.57 x r	2.34 x r ²	0.32 x r ²	2.65 x r ²
0	83	17	1.41 x r	1.41 x r	1.57 x r	2.22 x r ²	0.45 x r ²	2.67 x r ²
0	80	20	1.34 x r	1.34 x r	1.57 x r	2.10 x r ²	0.53 x r ²	2.63 x r ²
7.5	80	20	1.23 x r	1.63 x r	1.54 x r	2.20 x r ²	0.55 x r ²	2.75 x r ²
15	76	24	1.02 x r	1.82 x r	1.49 x r	2.12 x r ²	0.69 x r ²	2.80 x r ²
30	75	25	0.72 x r	2.26 x r	1.33 x r	1.98 x r ²	0.66 x r ²	2.64 x r ²
45	65	35	0.43 x r	2.57 x r	1.07 x r	1.61 x r ²	0.86 x r ²	2.47 x r ²

Fuente: (Herrero 2019, p. 115)

ANEXO R: RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESTIÉRCOL DEL LABORATORIO AGRARPROJEKT



Trabajamos bajo la Norma ISO 17025

Agrarprojekt S.A.
 Urb. El Condado, Calle V #941 y Av. A, Quito
 Tel: 02-2490575/02-2492148/0984-034348
 info@agrarprojekt.com
 www.agrarprojekt.com

RESULTADOS

Código Agrarprojekt: EPC-261122

Pág 2/2

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
Tipo de Muestra:	Abono Orgánico Sólido		
Número de Muestra:	# 1	# 2	# 3
Información Proporcionada por el Cliente:	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3

Contenido Total de macro- y microelementos en Materia Seca (macroelementos en %, microelementos en ppm equivalente a mg/kg)

Análisis	Unidad	*Valores de Orientación: Niveles Adecuados para un Compost de Buena Calidad	Resultado	Resultado	Resultado
Materia Seca	%	50 - 70	84,8	87,0	80,0
Humedad	%	30 - 50	15,2	13,0	20,0
Densidad (materia fresca, presión 0.1 kg/cm ²)	g/litro	-	405	436	459
Densidad Aparente (0 % Humedad)	g/litro	> 200	343	379	367
pH (Volumen 1:1 1/2)	-	7,0 - 8,5	8,9	9,0	8,9
Conductividad - CE (volumen 1:1 1/2)	mS/cm	> 4	5,82	8,66	9,60
Materia Orgánica	%	> 65	36,6	36,3	38,0
Carbono (C)	%	> 38	21,3	21,1	22,1
Relación Carbono- Nitrógeno (C/N)	-	10:1 hasta 20:1	14 : 1	15 : 1	14 : 1
Nitrógeno Total (N)	%	> 2,0	1,50	1,42	1,62
Fósforo (P)	%	> 0,2	0,29	0,28	0,32
Potasio (K)	%	> 1,5	0,66	1,11	1,39
Magnesio (Mg)	%	> 0,2	0,39	0,36	0,40
Calcio (Ca)	%	> 1,5	1,02	0,99	1,18
Sodio (Na)	%	< 0,2	0,26	0,25	0,27
Hierro (Fe)	ppm	-	3660	3840	4280
Manganeso (Mn)	ppm	-	110	118	126
Cobre (Cu)	ppm	-	16,8	14,5	17,4
Zinc (Zn)	ppm	-	24,8	25,6	28,6
Boro (B)	ppm	-	59,2	67,4	73,4

* Fuente: R. Gottschall. Kompostierung ("Compostaje"). Verlag C.F. Mueller, Karlsruhe, Alemania. 295 pp.

-- No Aplica

Nota: Los datos y resultados están basados en la información y muestras entregadas por el cliente para quien se ha realizado

- esta informe de manera exclusiva y confidencial.
- La fecha de ensayo y los métodos utilizados están a disposición del cliente cuando lo requiera.
- El Laboratorio no realizó el muestreo por lo tanto no certifica el origen de las muestras.
- Prohibida la reproducción total o parcial de Los resultados. No procede copia.

Agrarprojekt S.A.
 Dr. Karl Sponagel
 Director del Laboratorio

ANEXO S: RESULTADOS DEL ANALISIS DE ESTIÉRCOL Y BIOL DEL LABORATORIO SAQMIC



INFORME DE ANÁLISIS DE AGUAS

Fecha: 03 de mayo del 2023
Análisis solicitado por: Sr. Cristian Lema
Tipo de muestras: Estiercol y Biol
Localidad: Finca Castillo de Altura San Juan Cantón Riobamba

Muestra 1: Estiercol
Muestra 2: Biol

Análisis Químico

Determinaciones	Unidades	*Métodos de análisis	Muestra 1	Muestra 2
pH	-	4500-H-B	7.70	7.02
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	5220-D	95 000.0	55 200.0
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	5210-B	57 000.0	26 000.0

*Métodos de análisis del Standard Methods APHA AWWA.

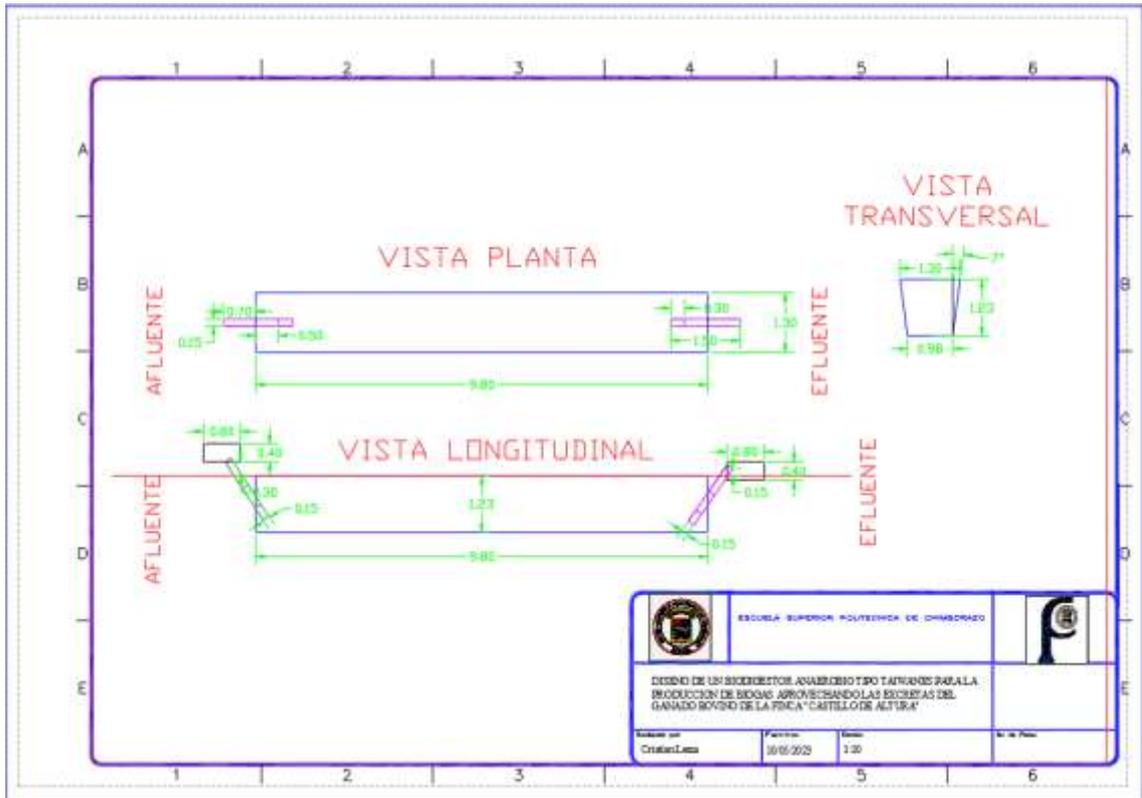
Observaciones:

Atentamente.



Dra. Gina Álvarez R.
RESPONSABLE TECNICO LABORATORIO
Nota: El presente informe afecta solo a la muestra analizada

ANEXO T: PLANOS DEL DISEÑO DEL BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LA FINCA CASTILLO DE ALTURA.



ANEXO U: PLANOS DEL DISEÑO DEL BIODIGESTOR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN LA FINCA CASTILLO DE ALTURA





epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 16 / 08 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Cristian David Lema Tenelema
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Ambiental
Título a optar: Ingeniero Ambiental
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

1601-DBRA-UPT-2023

