

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA AMBIENTAL

Trabajo de titulación previo a la obtención de título de:
INGENIERA E INGENIERO AMBIENTALES

TEMA:
OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE MEZCLAS DE AGUA RESIDUAL DE LA
"GANADERÍA SAN LUIS" EN EL SECTOR DEL CHAUPI Y RESIDUOS ORGÁNICOS
BIODEGRADABLES DEL MERCADO MAYORISTA DEL DMQ EN UN REACTOR
ANAEROBIO CON SISTEMA DE CALENTAMIENTO

AUTORES:
EVELYN LIZETH MANOBANDA TOAPANTA
JUAN ANDRÉS VALDEZ BEDOYA

DOCENTE TUTOR:
XIMENA DEL ROCÍO BORJA VELA

Quito, octubre del 2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

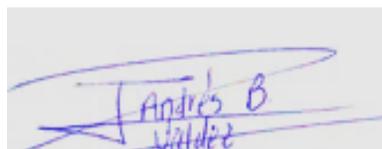
Nosotros, Evelyn Lizeth Manobanda Toapanta con documento de identificación N° 1726439555 y Juan Andrés Valdez Bedoya con documento de identificación N° 1750388520, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos los autores del trabajo de titulación intitulado: “OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE MEZCLAS DE AGUA RESIDUAL DE LA "GANADERÍA SAN LUIS" EN EL SECTOR DEL CHAUPI Y RESIDUOS ORGÁNICOS BIODEGRADABLES DEL MERCADO MAYORISTA DEL DMQ EN UN REACTOR ANAEROBIO CON SISTEMA DE CALENTAMIENTO.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de INGENIERA E INGENIERO AMBIENTALES, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Evelyn Lizeth Manobanda Toapanta

1726439555



Juan Andrés Valdez Bedoya

1750388520

Quito, octubre 2020

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo Experimental, “OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE MEZCLAS DE AGUA RESIDUAL DE LA "GANADERÍA SAN LUIS" EN EL SECTOR DEL CHAUPI Y RESIDUOS ORGÁNICOS BIODEGRADABLES DEL MERCADO MAYORISTA DEL DMQ EN UN REACTOR ANAEROBIO CON SISTEMA DE CALENTAMIENTO”, realizado por Evelyn Lizeth Manobanda Toapanta y Juan Andrés Valdez Bedoya, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, octubre 2020



.....
Ximena del Rocío Borja Vela
171122358-4

DEDICATORIA

A mis amados padres. **Ángel** y **Elsa** por su amor, cariño y apoyo incondicional en el transcurso de mi carrera, gracias por enseñarme el ejemplo de responsabilidad y de perseverancia para conseguir lo propuesto. Por estar siempre pendiente de mí, por su confianza y por enseñarme el valor económico pues ahora más que nunca entiendo todo el sacrificio que ustedes realizaron para que yo pueda alcanzar esta meta tan anhelada, admiro su fortaleza para siempre seguir adelante y no dejarse vencer ante las dificultades que se nos ha presentado, esa ha sido mi mayor inspiración para con este trabajo experimental.

A mi querida abuelita **María Magdalena** por brindarme su ejemplo de lucha y humildad, porque con sus sabias palabras me incentivó a culminar la carrera.

A mis queridos hermanos. **Gabriela** por estar siempre conmigo dándome su apoyo incondicional, sus palabras de aliento y aladas de oreja cuando ha sido necesario, gracias por cuidarme y estar siempre pendiente de mí, **Mateito** por su amor y cariño, y sobre todo por ser el que más pendiente estaba con éste mi trabajo experimental, sé que desean lo mejor para mí como yo quiero lo mejor para ustedes siempre, y **Angelito** sé que desde el cielo siempre me iluminas para tomar buenas decisiones y me cuidas. **Vlady** cuñis gracias por tus palabras de aliento. Y a mis pequeñitos **Maye, Jadiel** y **Adrián** gracias por su amor.

A mis padrinos. **Marlene** y **Wilmer** por su inmenso cariño, nunca faltó de su parte un sabio consejo o una palabra de aliento para no decaer y alentarme a llegar a ser una buena persona y profesional. **Jony** gracias por ser como un hermano para mí siempre has estado también pendiente de mis logros.

A toda mi familia, tía/os y prima/os por enseñarme que alcanzar una meta junto a las personas que amas es más satisfactorio pues sé que mi logro también es suyo, gracias por su apoyo familia.

A mi mejor amigo. **Andy** por su maravillosa amistad porque ambos sabemos el esfuerzo que hemos puesto para alcanzar esta meta, 5 años de amistad y tantas aventuras juntas, gracias por enseñarme a ser arriesgada pues los límites para alcanzar los sueños solo se los pone uno, sé que llegaremos lejos.

Edi, Chris, Vivi, Jessy T, Madi y demás **amigos** que han sido personas maravillosas que Dios ha puesto en mi camino, nunca faltó de su parte un no te rindas ya falta poco.

GRACIAS, una palabra que no abarca todo lo que desearía expresar a todas aquellas personitas que estuvieron conmigo al darme ánimos y apoyo para alcanzar esta meta tan anhelada.

Evelyn Lizeth Manobanda Toapanta

El presente trabajo de titulación va dedicado a las personas más importantes en mi vida, quienes me enseñaron a luchar arduamente para conseguir mis metas, quienes con su ejemplo de solidaridad, honradez y respeto me enseñan a ser mejor persona cada día, con quienes hemos superado varias etapas duras de la vida, quienes se han vuelto mi mejor compañía, a quienes amo con todo mi ser, mis padres **José Valdez** y **Yaneth Bedoya**.

A todos mis hermanos **Stalin, Iveth, Carlos, Eduardo** por el respaldo que me brindan cada momento y porque sé que siempre podré contar con su apoyo.

A mi mejor amiga **Evelyn Manobanda**, con la que he compartido momentos muy emotivos a lo largo de la carrera, juntos fuimos ganando experiencias inolvidables y ahora nos preparamos para presentar la tesis como fin a nuestra vida universitaria, pero sabiendo que su amistad durará toda la vida. Y a todos mis amigos (**Jesy G, Jessy T, Madi, Vivi, William, Mikele, Kary, Eri, Ronald, Stalin, Richard** y **Danilo**) personas geniales con tal que se compartió gratos recuerdos y se construyó una bonita amistad.

Juan Andrés Valdez Bedoya

AGRADECIMIENTO

A **Dios**, por brindarnos salud y vida para permitirnos alcanzar esta meta.

A **nuestros familiares**, que con su esfuerzo diario nos apoyaron en este arduo caminar.

A la **Universidad Politécnica Salesiana**, que a lo largo de nuestro camino nos formó como profesionales enfocándonos al servicio de la comunidad.

A la Ingeniera **Ximena Borja**, por creer en nosotros, por su paciencia, por su tiempo y por ser la guía principal a lo largo de nuestro trabajo experimental.

A la Doctora **Karina Pazmiño**, por la confianza entregada a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Ambiental y el apoyo en todos los proyectos que se realizaron a lo largo de nuestra vida estudiantil.

A **Don Melvin**, quien con su predisposición siempre nos brindó soporte para llevar a cabo los diferentes experimentos.

Y a todos los **docentes de la carrera de Ingeniería Ambiental**, porque nos impartieron sus conocimientos y experiencias a lo largo de la etapa universitaria.

Evelyn y Andrés

ÍNDICE

1. INTRODUCCION.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo General	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3. MARCO TEÓRICO	4
3.1 Residuos orgánicos biodegradables	4
3.1.1 Residuos generados por el sector primario	4
3.1.2 Residuos generados por el sector secundario.....	5
3.1.3 Residuos generados por el sector terciario.....	5
3.2 Digestión anaerobia.....	6
3.3 Etapas de la digestión anaerobia para la producción de biogás	6
3.3.1 Hidrólisis.....	7
3.3.2 Acidogénesis	7
3.3.3 Acetogénesis	8
3.3.4 Metanogénesis.....	8
3.4 Biodigestor anaerobio	9
3.4.1 Continuos	9
3.4.2 Semi continuos.....	9

3.4.3	Discontinuos	10
3.5	Parámetros condicionantes para la producción de biogás	10
3.5.1	Parámetros operacionales.....	10
3.5.2	Agitación y mezcla	12
3.5.3	TRH.....	12
3.5.4	Parámetros de control	12
3.5.5	Inhibidores en la reacción de la producción de biogás	13
3.6	Productos de la digestión anaerobia	14
3.6.1	Biogás	14
3.6.2	Análisis del biogás	16
3.6.3	Biol.....	18
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
4.1	Etapa 1: Caracterización de los residuos orgánicos biodegradables	19
4.1.1	Recolección de los residuos orgánicos biodegradables	19
4.1.2	Obtención de mezclas mediante un sistema de ecuaciones algebraicas	20
4.1.3	Humedad de las mezclas	21
4.2	Etapa 2: Diseño experimental en el laboratorio	22
4.2.1	Medición de pH y temperatura en reactores tipo batch	23
4.2.2	Medición de biogás producido en reactores tipo batch.....	23
4.3	Etapa 3: Carga en el biodigestor con sistema de calentamiento solar.....	27

4.3.1	Partes del biorreactor	27
4.3.2	Funcionamiento del biorreactor	28
4.4	Etapa 4: Análisis realizados	28
4.4.1	Análisis al producto	29
4.4.2	Análisis al subproducto.....	30
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
5.1	Etapa de laboratorio	32
5.1.1	Resolución de sistema de ecuaciones algebraicas para las mezclas	32
5.1.2	Cálculos de la humedad en las mezclas	35
5.1.3	Composición de los residuos orgánicos utilizados	37
5.1.4	Medición de pH y temperatura en mezclas.....	39
5.1.5	Cuantificación del biogás producido en las mezclas	42
5.2	Etapa de carga del biorreactor con camisa de calentamiento.....	46
5.2.1	Cálculo de la mezcla idónea colocada en el biorreactor	46
5.2.2	Composición de los residuos orgánicos colocados en biorreactor.....	47
5.2.3	Medición de pH y temperatura en el biorreactor	48
5.2.4	Análisis de normalidad para los datos de pH.....	50
5.2.5	Cuantificación del biogás producido en el biorreactor	52
5.3	Análisis realizados.....	53
5.3.1	Análisis al producto	53

5.3.2	Análisis del subproducto.....	56
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
6.1	Conclusiones	58
6.2	Recomendaciones.....	59
7.	BIBLIOGRAFÍA	60
8.	ANEXOS.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros condicionantes para la digestión anaerobia.....	10
Tabla 2 Contenido en la mezcla 1	34
Tabla 3 Contenido en la mezcla 2.....	34
Tabla 4 Contenido en la mezcla 3.....	35
Tabla 5 Composición de residuos orgánicos.....	38
Tabla 6 Parámetros de control monitoreados en mezclas	39
Tabla 7 Contenido de la mezcla idónea a ser colocada en el biorreactor con sistema de calentamiento.....	47
Tabla 8 Residuos orgánicos que conforman la mezcla idónea a ser colocada en el biorreactor con sistema de calentamiento	48
Tabla 9 Parámetros de control monitoreados en el biorreactor	49
Tabla 10 Nivel de significancia del ANOVA en datos de temperatura	51
Tabla 11 Prueba de Tukey	52
Tabla 12 Propiedades de la muestra del biogás	55
Tabla 13 Cantidad de Carbono Orgánico Total en la muestra de biol.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema general de un cromatógrafo de gases.....	17
Figura 2 Gasómetro 1	24
Figura 3 Gasómetro 2	26
Figura 4 Biorreactor con sistema de calentamiento solar	28
Figura 5 pH en mezclas	41
Figura 6 Temperatura en mezclas	42
Figura 7. Gasómetro 1 de la mezcla 1	43
Figura 8. Gasómetro 2 de la mezcla 2	44
Figura 9. Gasómetro 2 de la mezcla 3	45
Figura 10. Prueba de Shapiro Wilks en datos de pH	50
Figura 11 Diagrama de cajas del pH en las distintas mezclas y en la mezcla colocada en el biorreactor.....	51
Figura 12. Biogás producido en la bolsa Tedlar	53
Figura 13 Composición del biogás	54

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 Obtención de residuos orgánicos biodegradables.....	77
ANEXO 2 Puesta en marcha del diseño experimental.....	78
ANEXO 3 Carga arranque y operación en el biodigestor con sistema de calentamiento	80
ANEXO 4 Análisis realizados al subproducto biol.....	82
ANEXO 5 Informe de resultados del análisis del producto biogás realizado en el Laboratorio Instrumental de la EPN.....	83

RESUMEN

El presente proyecto analiza tres diferentes mezclas de biomasa que contienen residuos orgánicos, agua residual láctea y estiércol vacuno, estos se colocaron en reactores tipo *batch* construidos a escala de laboratorio. Para la preparación de las mezclas se partió del análisis en laboratorio descrito por Tipán (2020), en el que se detallan los porcentajes de carbono, nitrógeno y humedad en los residuos para la resolución de un sistema de ecuaciones algebraicas cuyo resultado arroja las cantidades a colocar en los reactores. Los reactores se construyeron con equipos de laboratorio como matraces Kitasatos donde ocurrió la reacción anaerobia, medidores de pH y temperatura para el registro de variables de control, mangueras plásticas de conexión, probetas donde se almacenó el biogás y planchas de calentamiento para mantener una temperatura de reacción adecuada además, cada reactor contó con un gasómetro para la cuantificación del biogás producido. Transcurrido el tiempo de retención de veintitrés días, en la primer mezcla se obtuvo **6.28 cm³** de *biogás* a una temperatura de 29.60°C y pH promedio 4.72; en la segunda mezcla se obtuvo **103.62 cm³** de *biogás* a una temperatura de 34.30°C y pH promedio 4.9, por último para la tercera mezcla se obtuvo **3.14 cm³** de *biogás* con una temperatura de 38.50°C y pH promedio 4.86. Se pudo observar que la mejor mezcla fue la segunda, ya que presentó mayor generación de biogás a una temperatura en rango mesofílico, por ello con esta relación de carga se alimentó el biorreactor con el sistema de calentamiento solar diseñado por Fabara y Nuñez (2020). Al biogás, producto final se le realizó un análisis cromatográfico de gases para conocer la concentración de CH₄ y de CO₂, éstos fueron de **8.52 $\frac{g}{L}$** y **2.13 $\frac{g}{L}$** respectivamente. Al biol, subproducto de la reacción se realizó el análisis de COT **0.23 $\frac{mg}{L}$** y DQO **1500 $\frac{mg(O_2)}{L}$** .

Palabras clave: residuos orgánicos, agua residual láctea, estiércol vacuno, calentamiento solar, reactores anaerobios.

ABSTRACT

This project analyses three different biomass mixtures containing organic waste, dairy wastewater and cattle manure, these were placed in batch reactors built at laboratory scale. For the preparation of the mixtures was based on the laboratory analysis described by Tipán (2020), which details the percentages of carbon, nitrogen and moisture in the residues for the resolution of a system of algebraic equations whose result yields the quantities to be placed in the reactors. The reactors were built with laboratory equipment such as Kitasatos flasks where the anaerobic reaction occurred, pH and temperature meters for recording control variables, plastic connecting hoses, specimens where biogas was stored and heating plates to maintain an adequate reaction temperature in addition, each reactor had a gasometer for the quantification of the biogas produced. After the retention time of twenty-three days, in the first mixture was obtained 6.28 cm^3 of biogas at a temperature of 29.60 C° and pH average 4.72; in the second mix, 103.62 cm^3 biogas was obtained at a temperature of 34.30 C° and pH average 4.9, finally for the third mixture 3.14 cm^3 biogas with a temperature of 38.50 C° and pH average 4.86. It could be observed that the best mixture was the second, as it presented higher generation of biogas at a temperature in mesophilic range, so with this load ratio the bioreactor was fed with the solar heating system designed by Fabara and Nuñez (2020). The biogas, final product was performed a chromatographic gas analysis to know the concentration of CH_4 and of CO_2 , these were $8.52 \frac{\text{g}}{\text{L}}$ and $2.13 \frac{\text{g}}{\text{L}}$ respectively. The analysis of COT $0.23 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$ and DQO $1500 \frac{\text{mg}(\text{O}_2)}{\text{L}}$ was performed to boil, by-product of the reaction.

Keyword: organic waste, dairy waste water, cattle manure, solar heating system and anaerobic reaction.

ABREVIATURAS

AR:	agua residual
°C:	grado centígrado
C/N:	relación carbono-nitrógeno
CH₄:	metano
cm³:	centímetro cúbico
CIT:	carbono inorgánico total
CO:	carbono orgánico
CO₂:	dióxido de carbono
COT:	carbono orgánico total
CT:	carbono total
DMQ:	Distrito Metropolitano de Quito
DQO:	demanda química de oxígeno
GLP:	gas licuado de petróleo
H:	diferencia de altura
HCl:	ácido clorhídrico
H₂S:	ácido sulfhídrico
IUPAC:	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
IW:	índice de Wobbe
kg:	kilogramo
L	litro
M	masa de carga total
M1	matraz kitasato 1

M2	matraz kitasato 2
m³:	metro cúbico
mL:	mililitro
mg:	miligramo
N₂:	nitrógeno
O₂:	oxígeno
P1:	probeta 1
P2:	probeta 2
P3:	probeta 3
PCI:	poder calorífico inferior
PCS:	poder calorífico superior
pH:	potencial de hidrógeno
RO:	residuos orgánicos
rpm:	revolución por minuto
TRH:	tiempo de retención hidráulica

1. INTRODUCCION

“En el mundo se generan anualmente 10 mil millones de toneladas de residuos urbanos” (Cepal, 2019, pág. 3). Entre las causas principales para su generación están las actividades productivas realizadas por el hombre y el crecimiento poblacional mundial con una tasa del 1.1% (Datos mundiales, 2019).

Se prevé que la cantidad seguirá en aumento por lo que “la optimización en la gestión de residuos, tratamientos en las fuentes de producción y una conciencia social ante esta problemática evitará un desastre global en el ámbito ambiental, social y económico” (Agoglia, 2010, pág. 15).

“Para América Latina y el Caribe la cantidad de residuos producidos fue de 231 millones de toneladas anuales” (Banco mundial, 2018, pág. 1). Para el caso de Quito, la cantidad de residuos producidos en el año 2018 fue de 721 mil toneladas, de las cuales un 60% corresponden a residuos orgánicos (Emgirs-Ep, 2018).

La fuente de generación mayoritaria de residuos orgánicos son los mercados ya que en estos se producen 22 toneladas de residuos diarias, uno de los principales generadores es el Mercado Mayorista del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) que envía sus residuos al relleno sanitario El Inga (Emgirs-Ep, 2018). La excesiva cantidad de residuos producidos por domicilios, negocios, hospitales y centrales de abastos disminuyen la vida útil del relleno sanitario por lo que será necesario la expansión o construcción de uno nuevo (El Comercio, 2020).

“El 80% de las empresas industriales, agroindustriales, de comercio y servicios no depuran sus aguas y las descargan directamente a las redes de alcantarillado público o a los cauces fluviales” (Secretaría del agua, 2014, pág. 6), lo que causa un grave problema ambiental. En el caso específico de la industria láctea, “se estima una relación de 5-10 L de agua residual por L de

leche procesada” (Cuvi, 2017, pág. 6). “La generación de efluentes en la Ganadería San Luis es de 3000 L al día aproximadamente” (Tipán, 2020, pág. 2).

La importancia de la revalorización de los residuos orgánicos junto con el agua residual producida por la industria láctea radica en que, el agua contiene nutrientes que pueden ser aprovechados en el desarrollo de bacterias (Cuvi, 2017). Los residuos proveerán la fuente de alimento y mediante un proceso anaerobio en un reactor *batch* se producirá biogás como alternativa de energía limpia que será empleada como fuente de calor o electricidad (Salamanca, 2009). Además, como subproducto de la reacción anaerobia se obtendrá biol, un fertilizante orgánico (Huerga, 2014).

El presente proyecto evaluó a escala de laboratorio la producción de biogás y biol en tres reactores tipo *batch*, utilizando como biomasa: residuos orgánicos, agua residual láctea y estiércol vacuno. Los reactores fueron construidos con matraces kitasatos, mangueras, probetas, planchas de calentamiento, medidores de pH y temperatura. La mejor mezcla obtenida en el laboratorio fue manejada con los parámetros operacionales óptimos de relación C/N, humedad y pH de la biomasa, TRH, agitación y mezcla; ésta mezcla idónea se cargó en el biorreactor con sistema de calentamiento solar diseñado por Fabara y Nuñez (2020). Durante el tiempo de retención se monitoreó los parámetros de control: pH y temperatura de reacción.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Producir biogás en un reactor anaerobio con sistema de calentamiento a partir de mezclas de residuos.

2.2 Objetivos Específicos

- Operar el reactor con los valores de variables de operación determinados como óptimos según bibliografía y evaluar las variables de control.
- Determinar el volumen de biogás y biol producidos por kilogramo de mezcla tratada en el reactor anaerobio con sistema de calentamiento.
- Determinar la concentración de metano y dióxido de carbono en el biogás producido.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Residuos orgánicos biodegradables

En las últimas décadas los cambios socioeconómicos se han enfocado en: la concentración poblacional en núcleos urbanos, el desarrollo sectorizado de la industria agroalimentaria y la intensificación de las actividades de índole agrícola y ganadera. Esto ha favorecido a la producción constante de residuos orgánicos biodegradables, los cuales requieren de un manejo: reusar, reducir o reciclar, para evitar así, los impactos ambientales que se ven reflejados en daños a la salud pública y el deterioro de los ecosistemas naturales (Reyes, 2017).

“Los desechos agroindustriales comprenden un amplio conjunto de residuos orgánicos biodegradables, los cuales pueden ser clasificados en dos tipos generales: residuos de frutas o plantas y residuos provenientes de animales tales como estiércoles y purines” (Reyes, 2017, pág. 63). De acuerdo a la procedencia de éstos, se los clasifican en:

3.1.1 *Residuos generados por el sector primario*

“Los residuos generados por el sector primario comprenden los residuos agrícolas, ganaderos y forestales” (Reyes & Pérez, 2018, pág. 3). Poseen alto contenido en nitrógeno y entre ellos están los purines de cerdo y vaca, gallinaza y estiércoles. “Los residuos de este sector constituyen el combustible por excelencia para la generación de biogás mediante digestión anaerobia” (Reyes & Pérez, 2019, pág. 5).

3.1.1.1 Estiércol vacuno. El estiércol vacuno está compuesto por materiales orgánicos como: ácidos grasos volátiles (AGV), proteínas, polisacáridos, lípidos y también de compuestos inorgánicos. “Este sustrato es una excelente base para el proceso de digestión anaeróbica ya que posee una alta capacidad tamponadora y un gran contenido de nutrientes necesarios para el desarrollo de las poblaciones anaeróbicas” (Reyes, 2017, pág. 65).

3.1.2 Residuos generados por el sector secundario

Son residuos industriales provenientes de agroalimentarios, textiles, curtiembres, residuos del papel, industrias lácteas, azucareras, conserveras cerveceras y similares (Reyes, 2017). Según la Agencia andaluza de la energía (2011), “el sector industrial produce residuos con alta carga de materia orgánica, muy adecuados para el aprovechamiento energético” (pág. 15).

3.1.3 Residuos generados por el sector terciario

Producidos por servicios los cuales generan dos grandes afluentes como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y las aguas residuales domésticas e industriales (Reyes, 2017).

3.1.3.1 Residuos sólidos. Según, la Empresa Pública Estratégica Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC-EP) (2006), “los residuos sólidos son un conjunto de materiales de origen orgánico e inorgánico procedentes de las actividades domésticas, comerciales, industriales y de todo tipo que se produzcan en una comunidad, con la sola excepción de las excretas humanas” (pág. 10).

Los residuos sólidos urbanos (RSU) se definen en la Ley de Residuos de España, como: aquellos generados en domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, que no tengan la calificación de peligrosos y que por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades citado por (Uned, 2012, pág. 6).

“El Mercado Mayorista de Quito tiene un total de 1401 locales comerciales, genera 22 toneladas de residuos sólidos los cuales son dirigidos al Relleno Sanitario de Quito” (Tipán, 2020, pág. X).

3.1.3.2 Aguas residuales. “Son materiales derivados de residuos domésticos o de procesos industriales, ganaderos u otros” (Ecured, 2015, pág. II). Estos no pueden ser desechados directamente hacia afluentes de ríos o corrientes convencionales ya que afectarían a la salud pública, para su posterior descarga deberán cumplir los límites permisibles establecidos en la normativa vigente.

3.2 Digestión anaerobia

“Es un proceso biológico microbiano que degrada la materia orgánica tanto en sustratos con propiedades fertilizantes y el biogás” (El caso Perú, 2005, pág. I).

Según Angelidaki, Ellegaard, & Kicer (2003), “la digestión anaerobia tradicionalmente ha sido aplicada en el tratamiento de aguas de descarga, lodos, y tratamiento de residuos municipales, con el fin de reducir su impacto ambiental, así como de obtener subproductos que sean aprovechables” citado por (Calero, 2011, pág. 11).

3.3 Etapas de la digestión anaerobia para la producción de biogás

“La digestión anaerobia para la producción de biogás se realiza en ausencia de oxígeno” (Acosta & Obaya, 2005, pág. 36). Este proceso biológico de degradación requiere la participación de bacterias metanogénicas del género *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* y *Methanosarcinas* (Monroy & Viniegra, 1990), las cuales crecen en condiciones anaeróbicas y temperaturas en rango de 27°C a 34°C y pH entre 6.5 a 8.2 (Parra, 2015).

(Corrales, Antolinez, Bohórquez, & Corredor, 2015), afirman que: la digestión anaeróbica es un proceso complejo en el que se involucran un determinado número de bacterias que degradan la materia orgánica, en sucesivas etapas:

- Hidrólisis
- Acidogénesis
- Acetogénesis
- Metanogénesis

3.3.1 *Hidrólisis*

La hidrólisis es el primer paso de la digestión anaerobia de residuos orgánicos generada por la adición de moléculas de agua en donde ocurren reacciones de oxidación-reducción, los carbohidratos, lípidos y proteínas se convierten en compuestos solubles asimilables para las bacterias que usarán la materia orgánica como fuente alimenticia para cumplir sus labores metabólicas (Briseño, 2017). “Esta etapa puede ser el limitante de la velocidad del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido en sólidos” (Reyes, 2017, pág. 67).

3.3.2 *Acidogénesis*

La segunda fase de la digestión anaerobia consiste en la transformación de los compuestos solubles resultantes de la etapa de hidrólisis en ácidos orgánicos (acético, láctico, butírico, entre otros) y alcoholes, mediante el proceso de fermentación, en este proceso intervienen bacterias acidogénicas, comúnmente identificadas como *Butyvirio*, *Propionbacterium*, *Lactobacillus*, *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococos*, *Propionbacterium*, *Bifidobacterium*, *Enterobacterias* y *Streptococos* (González A. , 2014).

Las condiciones de crecimiento de estas bacterias se encuentran en un rango de temperatura entre 37 a 45 °C y pH entre 6 a 6.2 (Chiriboga, 2010). Adicional, en esta fase las bacterias eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema (Ministerio de energía Chile, 2011).

3.3.3 *Acetogénesis*

En esta fase se realiza la conversión bioquímica de los productos de la acidogénesis mediante los siguientes mecanismos establecidos por, González (2014):

“La acetogénesis acetoclástica transforma metabolitos como valerato, butirato y propionato en acetato e hidrógeno para que puedan ser aprovechados posteriormente por los microorganismos metanogénicos. La acetogénesis hidrogenoclástica sintetiza el acetato a través del consumo de hidrógeno y dióxido de carbono” (González A. , 2014).

Según Parra (2015), los grupos acetogénicos mediante el aprovechamiento de la energía producto de la metabolización del hidrógeno, logran consolidar las reacciones de reducción de los ácidos grasos. Dentro de los microorganismos acetogénicos se encuentran *Syntrophomonas Wolfei*, *Syntrophobacter Wolini*, *Acetobacterium Woodii* y *Clostridium Aceticum* (González A. , 2014). Las condiciones de crecimiento de estas bacterias se encuentran en un rango de temperatura entre 35 a 40°C y pH entre 7 a 7.4 (Chiriboga, 2010).

3.3.4 *Metanogénesis*

Última fase de la digestión anaerobia en la que la mayor parte de la energía contenida en el sustrato es convertida en CH_4 (Acosta & Obaya, 2005).

Según González (2014), las bacterias metanogénicas estrictamente anaeróbicas se distinguen en dos tipos principales de microorganismos:

- Metanógenos hidrogenotrófos: a partir del hidrógeno y CO_2 van a generar CH_4 y H_2O .
- Metanógenos acetoclásticos: van a degradar el ácido acético a CH_4 y CO_2 .

Las bacterias metanogénicas principales que crecen en condiciones anaeróbicas y producen metano son: *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* y *Methanosarcinas*, las condiciones de crecimiento de estas bacterias se encuentran en un rango de temperatura de 25 a 45°C y de pH entre 6.5 a 7.5 (Chiriboga, 2010).

3.4 Biodigestor anaerobio

Según Contreras (2006), citado por Reyes (2017), un biodigestor anaerobio es un recipiente hermético donde ocurren procesos de descomposición, en el que se deposita el material orgánico junto con las bacterias para la formación de biogás y fertilizantes orgánicos.

Los biodigestores son una alternativa utilizada para el tratamiento de aguas residuales porque degradan la materia orgánica disuelta en un medio acuoso lo cual permite alcanzar valores permisibles para el cumplimiento de la normativa vigente sobre la descarga de aguas residuales (García, 2016).

Los digestores se clasifican por el proceso de operación, la capacidad de carga y vaciado. La clasificación general los define como digestores de régimen continuo, de régimen semi-continuo y de régimen discontinuo (Salamanca, 2009).

3.4.1 Continuos

Son muy utilizados para plantas de producción de biogás, el efluente de descarga es igual al afluente, estos generan alta producción de biogás para ser aprovechados en aplicaciones industriales mediante la generación de energía eléctrica (Salamanca, 2009).

3.4.2 Semi continuos

Son utilizados en el medio rural puesto por su tamaño pequeño adecuado para uso doméstico, los diseños más populares son el chino y el hindú. Su funcionamiento se basa en colocar

la primera carga con gran cantidad de materias primas y consecutivamente se agregan volúmenes de nuevas cargas del material. (Ministerio de energía Chile, 2011)

3.4.3 *Discontinuos*

Este tipo de biodigestores se cargan una sola vez de manera sistémica y la descarga se da después de un cierto período cuando el proceso de digestión ha finalizado, después se vacían los digestores por completo y se alimentan de nuevo (Salamanca, 2009).

3.5 Parámetros condicionantes para la producción de biogás

Según (Chiriboga, 2010) y (Salamanca, 2009) los parámetros que se deben tomar en cuenta durante la producción de biogás y biol son:

Tabla 1

Parámetros condicionantes para la digestión anaerobia

Parámetros operacionales		Parámetros de control
Variables de operación	relación C/N	pH
que definen a la biomasa:	humedad y pH	temperatura del proceso
Agitación y mezcla		
TRH (tiempo de retención hidráulica)		

Nota: La tabla representa los parámetros operacionales y de control tomados en cuenta para el proceso de digestión anaerobia. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020. Tomado de: (Chiriboga, 2010) y (Salamanca, 2009).

3.5.1 *Parámetros operacionales*

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico sensible a las condiciones de operación como: pH, humedad, relación C/N, agitación y TRH (Chiriboga, 2010). A continuación, se detalla los parámetros operacionales del proceso de biodigestión.

3.5.1.1 Variables de operación que definen a la biomasa. La carga óptima de alimentación dependerá de las variables de operación como son relación C/N, humedad y pH que tenga la biomasa, ya que si la masa a ser colocada en el biorreactor se encuentra por encima de la carga de alimentación óptima, las bacterias acetogénicas producirán más ácidos que los que pueden procesar las bacterias metanogénicas. Esto provocaría la acidificación del lodo e inhibición de la producción de metano (Chiriboga, 2010, pág. 35).

3.5.1.1.1 Relación carbono nitrógeno (C/N). “Se requiere una relación carbono nitrógeno de 30 a fin de que los microorganismos que intervienen en este proceso utilicen carbono para obtener energía y nitrógeno para formar proteínas y estructuras celulares” (Fernandez, 2019, pág. 30).

“Cuando la relación es baja existe pérdidas de nitrógeno asimilable y los microorganismos dejan de operar hasta detener la reacción de producción de biogás, pero cuando la relación es alta se inhibe el crecimiento de bacterias por falta de nitrógeno” (Salamanca, 2009, pág. 41).

3.5.1.1.2 Humedad. En el proceso de biodigestión es importante que la humedad de la carga de residuos orgánicos alcance unos niveles del 80 %, ya que así el agua ocupará todos los poros y, por tanto, el proceso será completamente anaeróbico (Ramírez, 2016). “Si la humedad es baja se disminuye la actividad de los microorganismos y el proceso es más lento” (Castells, 2005, pág. 661).

3.5.1.1.3 pH. El pH en desechos sólidos orgánicos los cuales conforman la carga orgánica a ser colocada en el biodigestor, poseen valores ácidos que van de 4 a 6, así lo afirman Buenrostro, Bernache, Bocco, y Cram (2000).

3.5.2 *Agitación y mezcla*

En el proceso de producción de biogás debe existir un grado de agitación para obtener un homogenizado del sustrato que evite la formación de espumas y la sedimentación, la agitación puede ser mecánica o manual (Salamanca, 2009).

3.5.3 *TRH*

Es el tiempo que los residuos orgánicos líquidos o sólidos permanecen en el digestor hasta su posterior descarga (García, 2016). Los tiempos de retención son cruciales en el desarrollo del proceso ya que durante este tiempo se espera la transformación de los residuos orgánicos en biogás (Ministerio de energía Chile, 2011).

3.5.4 *Parámetros de control*

Son aquellos que son controlados diariamente para conocer si el proceso de fermentación anaeróbica ocurre o está interrumpido.

3.5.4.1 pH. Según Clark & Speece (2009), citado por Reyes (2017), el pH influye en la actividad enzimática de los microorganismos mediante cambios de estado de los iones de las enzimas como el carboxil y amino; alteración que se presenta en los componentes no ionizables del sistema, por ejemplo la desnaturalización de la estructura proteica de las enzimas.

“Una vez estabilizado el proceso fermentativo el pH toma valores que oscila entre 6 y 8” (Reyes, 2017, pág. 71). Es por ello que cuando disminuye a 5 o aumenta a 8 este proceso se inhibe.

3.5.4.2 Temperatura del proceso. “Los procesos anaeróbicos son fuertemente dependientes de la temperatura, la velocidad de reacción depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos” (Ministerio de energía Chile, 2011, pág. 38).

“En el transcurso de la digestión se dan diferentes tiempos de activación de los grupos bacterianos, ya que cada uno de estos grupos poseen una temperatura óptima en donde se puede estabilizar su tasa de crecimiento celular máximo” (Parra, 2015, pág. 10).

De acuerdo a lo establecido por la Agencia Andaluza de la Energía (2011), el intervalo de temperatura para la digestión anaeróbica se define en tres rangos:

- Psicrófilico: por debajo de 20°C.
- Mesófilico: entre 30 a 40°C.
- Termófilico entre 50 a 65°C.

Teniendo en cuenta a Chiriboga (2010), se prefiere operar en la zona mesofílicas ya que así no se requiere de suministro de energía para alcanzar la temperatura de operación. Sin embargo, en la ciudad de Quito por sus temperaturas frías, alrededor de 18°C es adecuado implementar un sistema de calentamiento. Para alcanzar este rango de temperatura en etapa de laboratorio se añadió una plancha de calentamiento y a escala piloto (de biorreactor) se adicionó una camisa de calentamiento solar.

3.5.5 Inhibidores en la reacción de la producción de biogás

Los inhibidores en la reacción de la producción de biogás pueden generarse por razones operativas o por elementos inhibidores que se encuentra en cantidades pequeñas en la biomasa, los cuales actúan negativamente en la estabilidad del proceso anaeróbico (Salamanca, 2009).

Una concentración alta de DBO en el efluente también actúa como inhibidor, ya que provoca la reducción a la mitad del porcentaje de metano en el biogás producido (Acosta & Obaya, 2005).

El exceso de nitrógeno en el sustrato produce amoníaco, lo cual inhibe el proceso anaerobio por encima de ciertos niveles $3 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$. Sin embargo, existen estudios donde se reportan concentraciones tolerantes de 4 a $9 \left(\frac{kg}{m^3} \right)$ de nitrógeno en procesos anaerobios (Acosta & Obaya, 2005).

Con una concentración de H_2S en el biogás por encima de 0.2 % no se inhibe el proceso de producción de biogás, pero se limita el uso de éste, ya que genera problemas de corrosión en las tuberías de conducción del gas y en los recipientes destinados a su almacenamiento (Acosta & Obaya, 2005).

3.6 Productos de la digestión anaerobia

Cuando las etapas de digestión anaerobia culminan se obtienen un producto y un subproducto, el primero es biogás que es usado como fuente de energía alternativa y el otro el biol, que es muy valioso en el área agrícola.

3.6.1 Biogás

El biogás es un combustible natural no fósil, producto de la digestión anaeróbica del material orgánico y su poder calorífico depende de la cantidad de metano que este posea (Salamanca, 2009).

3.6.1.1 Componentes del biogás. “El biogás es una mezcla gaseosa formada principalmente por CH_4 , CO_2 y pequeñas proporciones de otros gases, como H_2S , H_2 , NH_3 ” (Ministerio de energía Chile, 2011, pág. 16).

Este puede ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica o energía eléctrica tanto para la iluminación o la calefacción, también puede ser aprovechado como gas para

uso doméstico o como combustible para vehículos, máquinas agrícolas o bombas de agua, reemplazará así a la gasolina o el diésel en motores de combustión interna (Reyes, 2017).

3.6.1.2 Propiedades del biogás. “El biogás posee una densidad de $0.94 \frac{Kg}{m^3}$ a condiciones atmosféricas, una temperatura de inflamación de alrededor de 700 °C y la temperatura de la llama a los 870 °C” (Ramírez, 2016, pág. 29).

“Posee un bajo poder calorífico, pero aun así, su energía es suficiente para mantener en operación un dispositivo de generación de potencia, motores alternativos o sistemas de calentamiento o cocción de alimentos” (Nogués, Galindo, & Rezeau, 2003, págs. 11-12).

El PCI, es la cantidad de energía liberada durante la combustión estequiométrica de un combustible y el agua en los productos de combustión. El PCS es la cantidad de energía liberada durante la combustión estequiométrica de un combustible y el agua de los productos de combustión se encuentra en fase líquida (González C, 2008, pág. 7).

A la relación entre el poder calorífico (PCS o PCI) y la raíz cuadrada de la densidad relativa del gas analizado se conoce como índice de Wobbe (IW), este es de especial interés, ya que representa la intercambiabilidad entre gases combustibles, problemas de intercambiabilidad que se traducirían en fenómenos de combustión (apagado de llama, retroceso de llama, auto ignición del gas, desprendimiento de la llama del quemador, entre otros) que van a afectar el desempeño de los equipos de combustión (Ortiz, 2015, pág. 9).

A continuación se describe la ecuación 1, utilizada para conocer el IW:

$$IW: \frac{PCI \text{ o } PCS}{\sqrt{\rho_r}} \quad (1)$$

Donde:

IW: Índice de Wobbe, referido al PCS

PCI o PCS: Poder calorífico

ρ_r : Densidad relativa

3.6.2 *Análisis del biogás*

“Debido al estado gaseoso que presenta el metano, componente del biogás, su análisis se realiza principalmente por medio de la cromatografía de gases” (Pineda, 2011, pág. X).

3.6.2.1 Cromatografía de gases. “La cromatografía es un método físico de separación, en el cual los componentes a ser separados son distribuidos entre 2 fases” (Calero, 2011, pág. 21). La fase móvil que fluye en una dirección definida y la fase estacionaria.

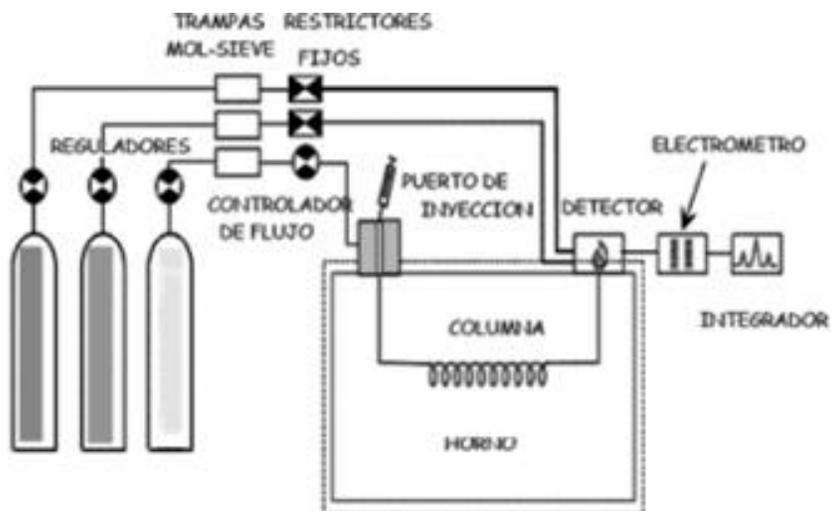
Calero (2011), afirma

Las diferentes técnicas cromatográficas son nombradas de acuerdo al estado físico de la fase móvil; por tanto, en la cromatografía líquida la fase móvil es un líquido puro o en mezcla, mientras que en la cromatografía de gases la fase móvil es un gas químicamente inerte. (pág. 21)

En la figura 1, se muestra un esquema de la operación del equipo para un proceso de cromatografía de gases:

Figura 1

Esquema general de un cromatógrafo de gases



Nota: La figura representa el esquema de un cromatógrafo de gases. Tomado de: (Calero, 2011).

Según Parrales, Reyes, y Pine (2012), la cromatografía de gases puede ser realizada mediante dos estados: gas-sólido o gas-líquido.

La cromatografía gas-sólido, se fundamenta en la retención de los analitos en una fase estacionaria sólida como consecuencia de la adsorción física; este tipo de cromatografía es útil para separar especies, como gases de bajo peso molecular, las cuales no pueden ser retenidas en columnas para cromatografía gas-líquido (Parrales, Reyes, & Pine, 2012).

La cromatografía gas-líquido se basa en la distribución de los analitos de la muestra entre una fase móvil gaseosa y una fase líquida inmovilizada sobre la superficie de un sólido inerte; este tipo de cromatografía es la más utilizada debido a la gran cantidad y variedad de análisis que se puede realizar con las columnas disponibles en el mercado (Parrales, Reyes, & Pine, 2012).

3.6.3 Biol

Es un fluido con características físicas de lodo – líquido, utilizado como fertilizante orgánico ya que posee las siguientes propiedades: mejora la disponibilidad de nutrientes del suelo, estimula el desarrollo de las plantas, favorece su enraizamiento, alarga la fase de crecimiento de hojas, mejora la floración, activa el vigor y poder germinativo de las semillas (Sistema biobolsa, 2018, pág. 3).

Todos estos factores resultarán en una mayor productividad de los cultivos y generación de material vegetal.

3.6.3.1 Análisis del biol

3.6.3.1.1 Demanda química de oxígeno (DQO). “Este parámetro mide la cantidad de sustancias susceptibles a ser oxidadas por medio de oxidantes químicos fuertes los cuales se encuentran disueltos o en suspensión en una muestra líquida” (PanReac Química SLU, 2014, pág. 1). “Este método mide la concentración de materia orgánica, sin embargo, sufre interferencias por presencia de sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas como sulfuros, sulfitos, yoduros, entre otros que también son reflejados en la medición. Se expresan en $\left(\frac{mg}{L}\right) O_2$ ” (Dorotea, 2012, pág. 2)

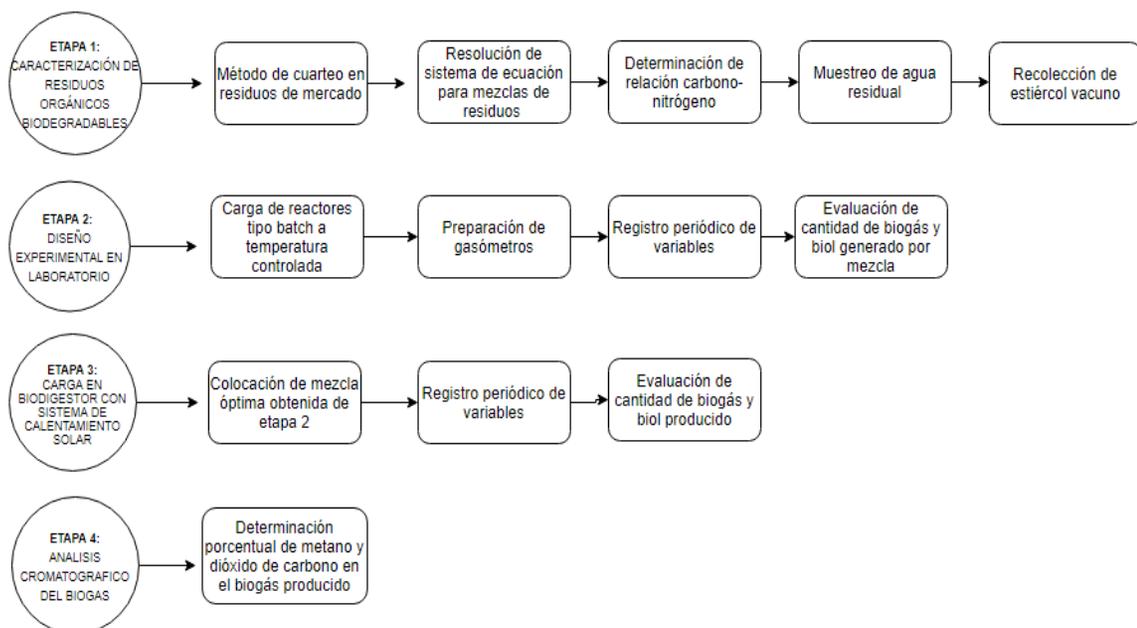
3.6.3.1.2 Carbono Orgánico Total (COT). El carbono orgánico total es la cantidad de carbono presente en un compuesto orgánico. Se usa frecuentemente para medir la carga orgánica presente en aguas y otros tipos de muestras. Su medición se obtiene por la cantidad de CO_2 generada al oxidar la materia orgánica en condiciones especiales. Para conocer la cantidad de COT de una muestra se mide tanto el CT presente, como el CIT. Al restar el carbono inorgánico total del carbono total se obtiene el COT (Dorotea, 2012, pág. 3).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

La parte experimental se llevó a cabo en 4 etapas, las cuales se describen en el diagrama 1:

Diagrama 1.

Etapas de la metodología empleada



Nota: El diagrama representa las etapas de la metodología empleada en el presente trabajo experimental. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

4.1 Etapa 1: Caracterización de los residuos orgánicos biodegradables

4.1.1 *Recolección de los residuos orgánicos biodegradables*

La recolección de residuos orgánicos biodegradables se realizó en el Mercado Mayorista del Distrito Metropolitano de Quito, en la ganadería San Luis y el estiércol en el barrio Ferroviaria Alta de la ciudad de Quito. Toda esta biomasa se colocó en los 3 reactores *batch* a escala de laboratorio y en el biodigestor con sistema de calentamiento.

4.1.1.1 Recolección de los residuos orgánicos del Mercado Mayorista. Los residuos orgánicos utilizados fueron verduras, legumbres y hortalizas, del Mercado Mayorista, estos están

compuestos principalmente por agua, poseen escaso contenido en grasa y son altos en proteínas. La ventaja de utilizar los residuos de vegetales es que su contenido de materia orgánica es fácilmente biodegradable (Medio Ambiente Álora, 2015).

Se realizó el método de cuarteo para obtener una muestra representativa que fue usada para la carga, arranque y operación de los biodigestores.

4.1.1.2 Recolección del agua residual de la industria láctea. La correcta digestión de los residuos se lleva a cabo en fase líquida, por lo que la adición de agua es necesaria (Ministerio de energía Chile, 2011). En este proyecto se usó agua residual de la industria láctea muestreada en el efluente de la ganadería San Luis, según Tipán (2020), “el agua residual láctea está compuesta por carbono, nitrógeno y fósforo, nutrientes esenciales para el crecimiento y realización de reacciones energéticas y metabólicas” (Cuvi, 2017, pág. 16).

4.1.1.3 Obtención del estiércol vacuno. Una fuente eficiente y de bajo costo en microorganismos metanógenos es el estiércol de vaca (Carhuancho, 2012), que fue recolectada en el barrio Ferroviaria Alta un día antes de cada carga para la adición de bacterias que ayudaron en el proceso de biodigestión.

4.1.2 *Obtención de mezclas mediante un sistema de ecuaciones algebraicas*

Para la fase experimental se crearon combinaciones de residuos orgánicos, agua residual de la industria láctea y excretas vacunas que permiten una relación C/N y humedad óptimas, mediante la ecuación 2, planteada por (Tipán, 2020).

$$\frac{C_{x_{C-RSa}} + C_{x_{C-ARb}} + C_{x_{C-excretaC}}}{N_{x_{N-RSa}} + N_{x_{N-ARb}} + N_{x_{N-excretaC}}} = 30 \quad (2)$$

La ecuación 2, considera los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio en la que se estableció los contenidos en fracción en masa de carbono y nitrógeno de los residuos del mercado Mayorista y del agua residual de la ganadería San Luis. Los valores de estiércol vacuno fueron determinados bibliográficamente.

$C_{x_{C-RSa}}$ = contenido en fracción en masa del carbono en los residuos (0.483) (Tipán, 2020).

$C_{x_{C-ARb}}$ = contenido en fracción en masa del carbono en agua residual (0.0023) (Tipán, 2020).

$C_{x_{C-excretaC}}$ = contenido en fracción en masa del carbono en excretas (0.0428) (Tipán, 2020).

$N_{x_{N-RSa}}$ = contenido en fracción en masa del nitrógeno en los residuos (0.0267) (Tipán, 2020).

$N_{x_{N-ARb}}$ = contenido en fracción en masa del nitrógeno en agua residual (0.00059) (Tipán, 2020).

$N_{x_{N-excretaC}}$ = contenido en fracción en masa del nitrógeno en excretas (0.00283) (Tipán, 2020).

Con la ecuación 2, se construyeron 3 sistemas de ecuaciones algebraicas para realizar las mezclas de residuos orgánicos biodegradables.

4.1.3 Humedad de las mezclas

Rohstoffe (2010), afirma que “la cantidad de agua presente en la biomasa afecta en forma directa la energía disponible del biocombustible obtenido, la humedad de las muestras indica un porcentaje alto de agua y la posibilidad de poder homogenizar la biomasa para iniciar el proceso de digestión anaerobia” citado por (Ramírez, 2016, pág. 56).

A continuación, se describe la ecuación 3 planteada por Tipán (2020), para conocer la humedad de las mezclas:

$$X = \frac{0.875a+0.993b+0.86c}{M} \quad (3)$$

La ecuación 3, considera los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio estableciendo los contenidos porcentuales de humedad de los residuos del mercado Mayorista, del agua residual de la ganadería San Luis y del estiércol vacuno.

Donde:

X = Porcentaje de humedad

M = Masa de carga en kg de la mezcla (a+b+c)

0.875 = humedad de los residuos orgánicos

a= kg de residuo sólido

0.993 = humedad de agua residual

b= kg de agua residual

0.86 = humedad de estiércol vacuno

c= kg de estiércol

4.2 Etapa 2: Diseño experimental en el laboratorio

Después de obtener las mezclas con cantidades necesarias de cada componente y la humedad requerida se colocó a estas en reactores tipo *batch* construidos con matraces kitasatos,

mangueras y probetas. Estos se situaron sobre planchas de calentamiento a una temperatura constante de 50 °C y 2 rpm de agitación.

4.2.1 Medición de pH y temperatura en reactores tipo batch

La medición de pH y temperatura interna de la reacción se realizó con el medidor de pH 86031 de marca AZ instrument. El sensor del equipo fue colocado en el interior de cada kitasato para el registro diario de estos parámetros.

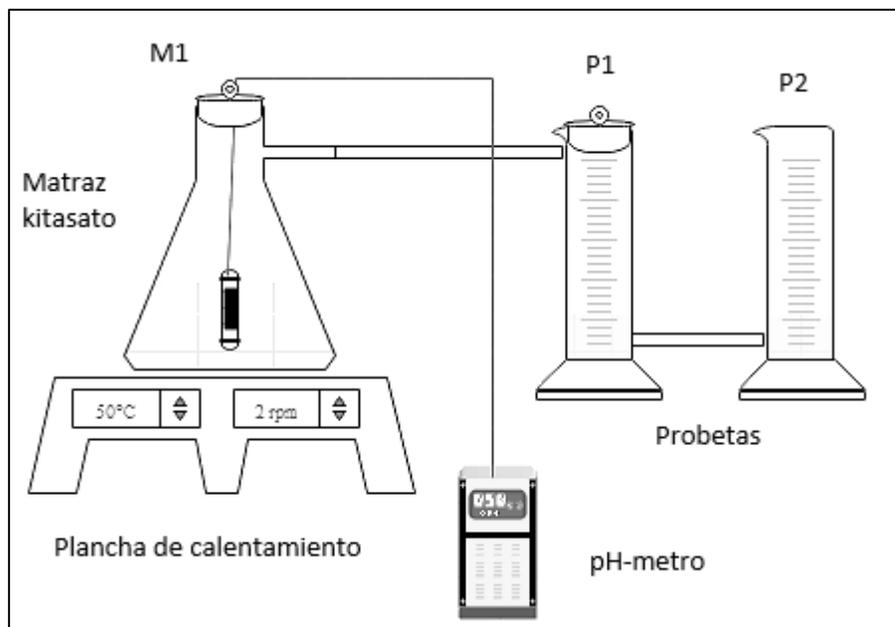
4.2.2 Medición de biogás producido en reactores tipo batch

Para la medición del biogás producido en el laboratorio se utilizaron dos modelos de gasómetros, mecanismos diseñados por Ramírez (2016), para capturar el gas obtenido.

4.2.2.1 Modelo gasómetro 1. Este primer modelo, constó de un matraz kitasato (M1) donde se coloca los residuos orgánicos biodegradables, que se une a una probeta de 250 mL (P1) sellada por la parte superior que se conectó por el extremo inferior con una manguera de 0.5 cm de diámetro y 30 cm de longitud con una segunda probeta (P2). Este sistema se utiliza para medir la presión manométrica del gas contenido en un recipiente como se muestra en la figura 2. Ambas probetas (P1) y (P2), contenían 100 mL de solución barrera de agua acidulada al 5% de *HCl*. “Esta solución evitará que el CO_2 (uno de los componente del biogás) se disuelva en el agua del medidor y tergiverse la medición del volumen de biogás” (Yank, Martina, & Corace, 2002, pág. 12).

Figura 2

Gasómetro 1



Nota: La figura representa la cuantificación de biogás en la mezcla 1. Adaptado de: (Ramírez, 2016). Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

4.2.2.2 Funcionamiento del gasómetro 1. El volumen de biogás generado por el proceso de biodigestión ejerce presión y desplaza el agua contenida en la P1 hacia la P2, esto produce una diferencia de altura, proporcional a la diferencia entre la presión interior del recipiente que recibe el gas y la presión atmosférica que se ejerce sobre la superficie de agua del tubo abierto (Menna, y otros, 2007, pág. 20)

La diferencia de altura, representa el volumen de gas ingresado. Se observó que un volumen de biogás ingresado en el recipiente cerrado desaloja un volumen de agua, esto hace que su nivel disminuya una cierta altura. Ese volumen de agua desalojada ingresa en el recipiente abierto, e incrementa su altura en la misma medida. El volumen de agua desalojada, representa el doble del volumen de gas generado a presión atmosférica, al

considerar su mitad $\left(\frac{H}{2}\right)$, se obtiene el volumen de biogás que se quiere determinar (Menna, y otros, 2007, pág. 21).

El diámetro interno de las probetas utilizadas fue de 4 cm. “El volumen de biogás generado se calculó con la siguiente ecuación 4, en donde se multiplicó la superficie del recipiente por la altura del biogás desalojo $\left(\frac{H}{2}\right)$ ” (Menna, y otros, 2007, pág. 22).

A continuación, se describe la ecuación 4 planteada por (Menna, y otros, 2007), para conocer la producción de biogás:

$$V = \pi * \frac{(\emptyset)^2}{4} * \frac{H}{2} = [cm^2] * H[cm] \quad (4)$$

$$V = \pi * \frac{(4cm)^2}{4} * \frac{H}{2} = (6.28)[cm^2] * H[cm]$$

Dónde:

$V = \text{volumen del biogas producido (cm}^3\text{)}$

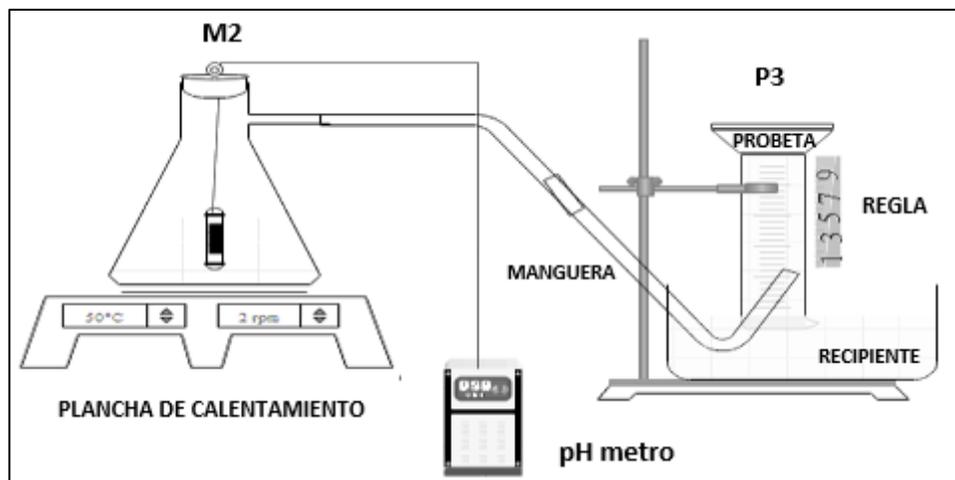
$\emptyset = \text{diámetro interno de la probeta(cm)}$

$H = \text{altura desplazada por el biogás (cm)}$

4.2.2.3 Modelo gasómetro 2. Este segundo modelo de gasómetro constó de un matraz kitasato sellado (M2) donde se colocó los residuos orgánicos biodegradables. Una probeta de 250 mL (P3) que se encuentra invertida sostenida con un soporte universal. La P3 contienen 250 mL de solución barrera de agua acidulada al 5% de *HCl*, posee 15 cm de manguera conectora que se une a un soporte universal y un recipiente con 1000 mL de solución barrera, como se observa en la figura 3.

Figura 3

Gasómetro 2



Nota: La figura representa la cuantificación de biogás en la mezcla 2. Adaptado de: (Ramírez, 2016). Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

4.2.2.4 Funcionamiento del gasómetro 2. La reacción anaerobia en el M2 genera un determinado volumen de biogás el cual ingresa en la P3, llena con solución de agua acidulada al 5% de *HCl*. La P3 se encuentra invertida y suspendida con la ayuda del soporte universal a 4 cm sobre la base del recipiente de vidrio que contiene 1000 mL de la misma solución que la P3. El matraz kitasato y la probeta se encuentran conectadas por medio de una manguera transparente que ingresa por la parte inferior y almacena el biogás, produciéndose así una diferencia de altura, que representa el volumen de biogás producido.

Al igual que en el gasómetro 1, se usó la ecuación 4 para calcular el volumen de biogás producido.

4.3 Etapa 3: Carga en el biodigestor con sistema de calentamiento solar

La mejor mezcla obtenida en los ensayos de laboratorio fue usada en el escalado al biodigestor. La carga de residuos orgánicos biodegradables fue de 3.80 Kg. La temperatura de operación del biodigestor fue establecida a 35°C.

En la etapa se usó el biorreactor *batch*, diseñado por Fabara y Nuñez (2020).

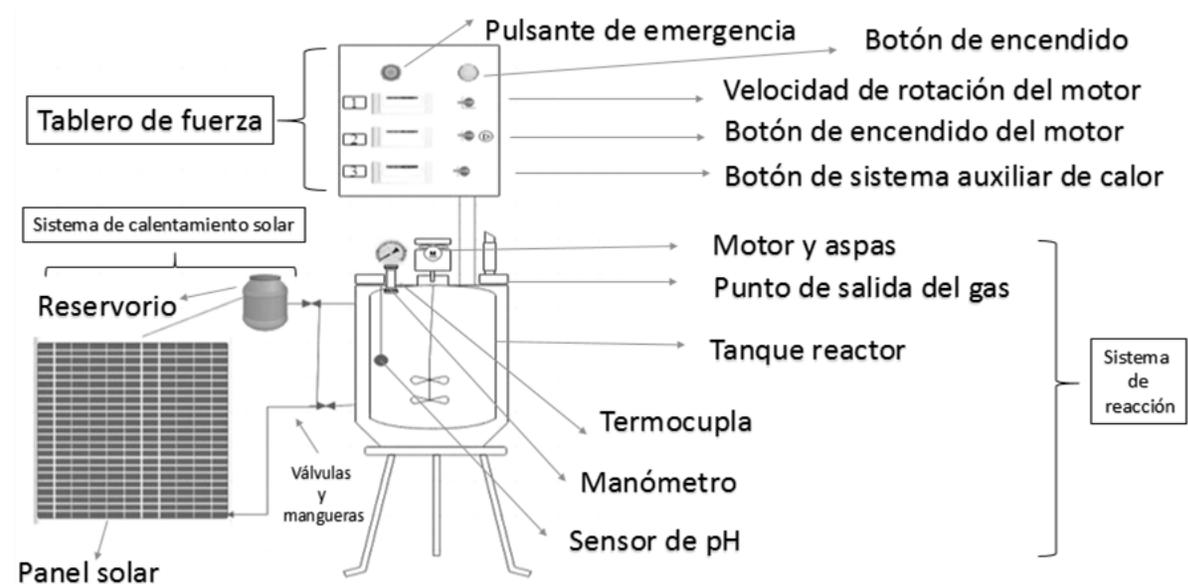
4.3.1 Partes del biorreactor

En la figura 4 se observa los elementos que posee el biorreactor:

- **Tablero de fuerza:** Ubicado en la parte superior del biorreactor y posee las pantallas de visualización del indicador de pH (1), temperatura externa (2) y temperatura interna (3). Además del botón de encendido, potenciómetro de velocidad de rotación del motor, botón de encendido del motor, botón de encendido del sistema auxiliar de calor y el pulsante de emergencia (Fabara & Nuñez, 2020).
- **Sistema de reacción:** Este consta del tanque reactor, manómetro, camisa de calentamiento, motor, salida de gas, termocupla y sensor de pH (Fabara & Nuñez, 2020).
- **Sistema de calentamiento solar:** El cual consta de panel solar, reservorio de agua, mangueras de conexión, válvulas de recirculación (Fabara & Nuñez, 2020).

Figura 4

Biorreactor con sistema de calentamiento solar



Nota: La figura esquematiza al biorreactor con sistema de calentamiento solar. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020. Adaptado de: (Fabara & Nuñez, 2020).

4.3.2 Funcionamiento del biorreactor

Realizada la carga de residuos en el biorreactor es necesario activar el ciclo de calentamiento solar, para ello se cierran las válvulas de recirculación que van hacia el tanque reactor y se abren las que conectan el reservorio de agua con el panel solar. Del reservorio baja agua fría hacia la parte inferior del panel solar la cual atraviesa la superficie interna del panel calentándola y permite que ascienda hacia el reservorio. Alcanzada una temperatura de 35 °C en el reservorio, se desactiva el ciclo de calentamiento y se abren las válvulas de recirculación que van del reservorio hacia la camisa de calentamiento del tanque reactor (Fabara & Nuñez, 2020).

4.4 Etapa 4: Análisis realizados

Transcurrido el tiempo de retención en el biodigestor con el sistema de calentamiento solar, se obtuvo como producto el biogás y como subproducto el biol, a cada uno se le realizó diferentes análisis.

4.4.1 Análisis al producto

El biogás producido fue recolectado en una bolsa tedlar de 2 litros y transportado al laboratorio de análisis instrumental de la Escuela Politécnica Nacional el análisis de la cromatografía de gases.

4.4.1.1 Cromatografía de gases. Para el análisis se tomó como norma de referencia la ASTM D 1945-03, que describe el método de prueba estándar para el análisis de gas natural por cromatografía de gases citado por (Viloria, 2013). Este método determina la composición química de gases naturales y mezclas gaseosas que contengan cantidades insignificantes de hexanos e hidrocarburos, o la determinación de uno o más componentes (Sai global, 2020). Las condiciones de trabajo se detallan en el informe de resultados desarrollado por el laboratorio de análisis instrumental LAI de la Escuela Politécnica Nacional como se puede observar en el (Anexo E).

El procedimiento para la separación analítica de la muestra de biogás se realizó siguiendo los siguientes pasos, mencionados por Ramírez (2016).

- Se recolectó la muestra en bolsa Tedlar.
- Se transportó la muestra hasta el laboratorio en donde se realizó el análisis.
- Se inyectó una pequeña cantidad de muestra en la corriente de gas inerte (helio) a una temperatura elevada de 320 °C.
- La corriente de gas atravesó la columna cromatográfica y separó los componentes de la mezcla por medio de un mecanismo de fraccionamiento (cromatografía gas/ líquido).
- Los componentes separados salen de la columna a intervalos pequeños y pasan al sistema de detección e identificación.

- Se realiza el informe de resultados.

4.4.2 *Análisis al subproducto*

El biol producido fue almacenado en botellas PET de 500 mL y se procedió a realizar los ensayos de DQO y COT.

4.4.2.1 Análisis de DQO. Para la determinación de DQO en el biol, se usó la metodología descrita en el manual del equipo multiparameter photometer with COD marca HANNA:

- Se calentó el termorreactor y se programa el tiempo de reacción de dos horas a 150°C.
- Se usó viales de rango alto y se identificó el vial blanco y el vial de muestra.
- Se colocó en el vial blanco 0.20 mL de agua destilada y en el vial de muestra 0.20 mL de biol.
- Una vez alcanzada la temperatura requerida en el equipo se colocó los viales y se presionó la tecla START.
- Después de dos horas se retiraron los viales del equipo termorreactor y se los llevó hasta el desecador para enfriarlos y alcanzar una temperatura ambiente.
- Se programó el espectrofotómetro para la medición de DQO.
- Se insertó en el compartimiento de celdas el vial blanco y se digitó la tecla ZERO.
- Se colocó en el compartimiento de celdas el vial con la muestra y se digitó la tecla READ.
- Se anotó el valor de la DQO y se apagó el equipo.

4.4.2.2 Análisis del COT. Se realizó la determinación del carbono orgánico total del biol con el equipo TOTAL ORGANIC CARBON ANALYZER marca LABGENI, se usó la metodología:

- Se prendió el equipo y se escogió el método OFFLINE ANALYSIS.
- Se colocó la muestra de biol en un vaso de precipitación de 50 mL.

- Se presionó la tecla START mientras la muestra fue absorbida por el equipo.
- Al finalizar el equipo arrojó el resultado de COT, CO y CI.
- Se imprimió los resultados y se apagó el equipo.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan todos los resultados obtenidos tanto en la etapa de laboratorio como en la de carga del biorreactor con sistema de calentamiento solar.

5.1 Etapa de laboratorio

5.1.1 Resolución de sistema de ecuaciones algebraicas para las mezclas

Para el cálculo de las mezclas de residuos orgánicos biodegradables se usó la ecuación 2, que establece los contenidos porcentuales de carbono y nitrógeno de los residuos del mercado Mayorista, del agua residual y del estiércol vacuno.

5.1.1.1 Resolución del sistema de ecuaciones para la mezcla 1.

$$\frac{C}{N} = 30 \text{ (Tipán, 2020).}$$

$$\frac{C_{x_{C-RS}a} + C_{x_{C-AR}b} + C_{x_{C-excreta}c}}{N_{x_{N-RS}a} + N_{x_{N-AR}b} + N_{x_{N-excreta}c}} = 30 \text{ (Tipán, 2020).}$$

$$\frac{0.483a + 0.0023b + 0.0428c}{0.0267a + 0.00059b + 0.00283c} = 30 \text{ (Tipán, 2020).}$$

$$18.0899a + 3.898b + 17.983c = 30 \text{ (Tipán, 2020).}$$

Donde:

a= kg de residuo orgánicos

b= kg de agua residual

c= kg de estiércol vacuno

Para la mezcla 1, la masa de carga a considerar fue de 1.80 kg ya que la capacidad del recipiente en el que fueron colocados (matraz kitasato) era de 2 L, el valor de residuos orgánicos

colocado fue de 0.70 kg, por tanto la suma de agua residual y de estiércol completan 1.10 kg como se muestra a continuación:

$$a + b + c = 1.80 \text{ kg masa de carga}$$

$$\text{Si, } a = 0.70 \text{ kg residuos orgánicos}$$

$$18.0899 (0.7) + 3.898b + 17.983c = 30$$

$$12.6629 + 3.898b + 17.983c = 30$$

Entonces,

$$b + c = 1.1$$

$$b = 1.1 - c$$

Resolución de ecuaciones:

$$12.6629 + 3.898 b + 17.983c = 30$$

$$12.6629 + 3.898 (1.1 - c) + 17.983c = 30$$

$$12.6629 + 4.2878 - 3.898c + 17.983c = 30$$

$$14.085c = 30 - 12.6629 - 4,2878$$

$$c = \frac{13.0493}{14.085}$$

$$c = 0.93 \text{ kg estiércol vacuno}$$

$$b = 1.1 - c$$

$$b = 1.1 - 0.93 \text{ kg agua residual}$$

$$b = 0.17 \text{ kg agua residual}$$

Tabla 2

Contenido en la mezcla 1

a= 0.70	kg de residuos orgánicos
b= 0.17	kg de agua residual
c= 0.93	kg de estiércol vacuno
M = 1.80	Kg masa de la mezcla

Nota: La tabla representa el contenido de residuos orgánicos biodegradables en la mezcla 1. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

5.1.1.2 Resolución del sistema de ecuaciones para la mezcla 2. Para la mezcla 2, se trabajó en un matraz kitasato de 2 L con una carga de 1.90 kg, el valor de residuo orgánico colocado fue de 0.80 kg por tanto la suma de agua residual y de estiércol completan 1.10 kg, una vez aplicado el sistema de ecuaciones se obtuvieron las siguientes cantidades:

Tabla 3

Contenido en la mezcla 2

a= 0.80	kg de residuos orgánicos
b= 0.30	kg de agua residual
c= 0.80	kg de estiércol vacuno
M = 1.90	Kg masa de la mezcla

Nota: La tabla representa el contenido de residuos orgánicos biodegradables en la mezcla 2. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

5.1.1.3 Resolución del sistema de ecuaciones para la mezcla 3. Para la mezcla 3, se consideró una masa de carga de 2.00 kg, ya que la capacidad del recipiente en el que fueron colocados (matraz kitasato) era de 2 L, el valor de residuo orgánico colocado fue de 0.90 kg por

tanto la suma de agua residual y de estiércol completan 1.10 kg, una vez aplicado el sistema de ecuaciones se obtuvieron las siguientes cantidades:

Tabla 4

Contenido en la mezcla 3

a= 0.90	kg de residuos orgánicos
b= 0.43	kg de agua residual
c= 0.67	kg de estiércol vacuno
M = 2.00	Kg masa de la mezcla

Nota: La tabla representa el contenido de residuos orgánicos biodegradables en la mezcla 3. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

5.1.2 Cálculos de la humedad en las mezclas

Para el cálculo de la humedad de los residuos orgánicos biodegradables se usó la ecuación 3, que establece los contenidos porcentuales de humedad de los residuos del mercado Mayorista, del agua residual y del estiércol vacuno.

5.1.2.1 Cálculo de la humedad en la mezcla 1. Al conocer el contenido de la mezcla 1, descrito en la tabla 2, se procede a reemplazar estos valores en la ecuación 3 de humedad:

$$X = \frac{0.875a + 0.993b + 0.86c}{M}$$

$$XM = 0.875a + 0.993b + 0.86c$$

$$X(1.8) = 0.875a + 0.993b + 0.86c$$

$$X(1.8) = 0.875(0.7) + 0.993(0.17) + 0.86(0.93)$$

$$X = \frac{1.5811}{1.8}$$

$$X = 0.88$$

La mezcla 1, alcanzó un porcentaje de humedad del 88 %.

5.1.2.2 Cálculo de la humedad en la mezcla 2. Al conocer el contenido de la mezcla 2, descrito en la tabla 3, se procede a reemplazar estos valores en la ecuación 3 de humedad:

$$X = \frac{0.875a+0.993b+0.86c}{M}$$

$$XM = 0.875a + 0.993b + 0.86c$$

$$X(1.9) = 0.875a + 0.993b + 0.86c$$

$$X(1.9) = 0.875(0.8) + 0.993(0.302) + 0.86(0.798)$$

$$X = \frac{1.6862}{1.9}$$

$$X = 0.89$$

La mezcla 2, alcanza un porcentaje de humedad del 89 %.

5.1.2.3 Cálculo de la humedad en la mezcla 3. Al conocer el contenido de la mezcla 3, descrito en la tabla 4, se procede a reemplazar estos valores en la ecuación 3 de humedad:

$$X = \frac{0.875a+0.993b+0.86c}{M}$$

$$XM = 0.875a + 0.993b + 0.86c$$

$$X(2) = 0.875a + 0.993b + 0.86c$$

$$X(2) = 0.875(0.9) + 0.993(0.43) + 0.86(0.67)$$

$$X = \frac{1.7907}{2}$$

$$X = 0.90$$

La mezcla 3, alcanza un porcentaje de humedad del 90 %.

En cada una de las mezclas como se puede observar en las tablas 2, 3 y 4 no se requirió de una gran cantidad de agua residual, ya que la humedad que contienen los residuos orgánicos y el estiércol vacuno es alta.

Ramírez (2016), en el estudio de valorización de la producción de biogás en reactores *batch* en los cuales trabajó con biomasa, a temperatura mesofílica y pH neutro, obtuvo una humedad en los residuos orgánico de 72.16%. López (2011), en la investigación de residuos sólidos urbanos para producir biogás trabajó con una humedad de 79.39%. Valdivia (2000), asevera que la carga para que el proceso de digestión no se interrumpa debe poseer un contenido en sólidos del 5 al 10%, lo que indica que la biomasa más adecuada es la de alto contenido en humedad.

El valor promedio de fósforo total en agua residual de la industria láctea fue de 233.45 mg/L, el fósforo forma parte de los nutrientes que requieren los microorganismos para su crecimiento por lo que es importante conocer su presencia para asegurar un proceso biológico (Tipán, 2020).

5.1.3 Composición de los residuos orgánicos utilizados

Una vez conocidas las cantidades para cada una de las mezclas se procedió a pesar los residuos orgánicos biodegradables en la balanza granataria. A continuación, se exponen las composiciones de residuos orgánicos para cada una de las mezclas:

Tabla 5*Composición de residuos orgánicos*

Nombre común	mezcla 1	mezcla 2	mezcla 3
	(kg)	(kg)	(kg)
Apio	0.03	0.00	0.03
Cilantro	0.01	0.03	0.02
Lechuga	0.01	0.10	0.09
Remolacha	0.01	0.00	0.07
Tomate	0.03	0.12	0.10
Zanahoria	0.03	0.09	0.06
Col	0.08	0.04	0.06
Rábano	0.08	0.00	0.07
Nabo	0.04	0.00	0.02
Espárrago	0.03	0.00	0.00
Cebolla de rama	0.01	0.05	0.04
Cebolla de bulbo	0.01	0.03	0.03
Ajo	0.35	0.03	0.02
Pepino cohombro	0.00	0.13	0.07
Coliflor	0.00	0.05	0.05
Ají	0.00	0.00	0.02
Perejil	0.00	0.05	0.07
Brócoli	0.00	0.08	0.08
Total (kg)	0.70	0.80	0.90

Nota: La tabla representa el contenido de residuos orgánicos colocados en las pruebas de laboratorio. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

5.1.4 Medición de pH y temperatura en mezclas

Se realizó la carga de las mezclas en los reactores tipo *batch* a escala laboratorio. Los parámetros monitoreados fueron pH y temperatura durante 23 días. Los valores para los parámetros de fines de semana se calcularon por interpolación como procedimiento que permitió calcular el valor de las variable en un punto no muestral con valor estimado, conocido los valores de esa variable en puntos muestrales con valores reales (Bosque Sendra, 1992), este procedimiento se repitió tanto en la etapa de laboratorio como en la etapa de carga del biorreactor. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 6

Parámetros de control monitoreados en mezclas

Días	mezcla 1		mezcla 2		mezcla 3	
	pH	Temperatura	pH	Temperatura	pH	Temperatura
07/07/2020	6.10	32.20	6.75	25.70	6.58	25.80
08/07/2020	4.92	30.30	4.92	31.30	5.22	34.60
09/07/2020	4.67	30.40	4.67	37.10	4.77	39.90
10/07/2020	4.65	30.50	4.68	36.60	4.76	39.50
11/07/2020	4.63	30.80	4.68	36.00	4.74	39.10
12/07/2020	4.62	30.80	4.69	35.50	4.73	38.70
13/07/2020	4.60	30.70	4.69	34.90	4.71	38.20
14/07/2020	4.60	31.70	4.71	34.50	4.74	38.60
15/07/2020	4.61	30.40	4.72	35.90	4.71	40.40
16/07/2020	4.62	32.00	4.74	36.40	4.72	40.70
17/07/2020	4.62	30.70	4.75	34.50	4.72	39.20
18/07/2020	4.62	30.40	4.77	34.60	4.73	39.30
19/07/2020	4.62	30.20	4.79	34.70	4.74	39.40

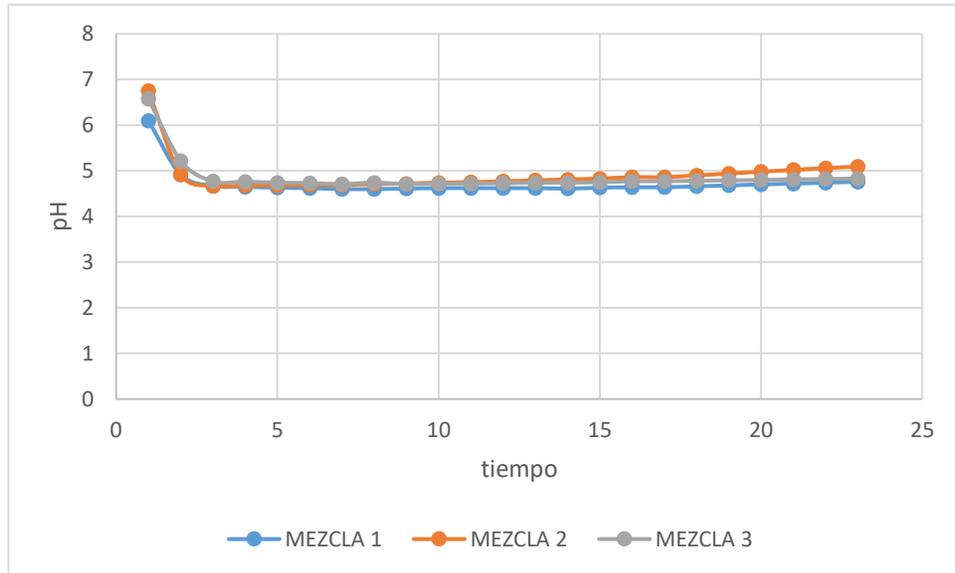
Días	mezcla 1		mezcla 2		mezcla 3	
	pH	Temperatura	pH	Temperatura	pH	Temperatura
20/07/2020	4.61	29.90	4.81	34.80	4.74	39.40
21/07/2020	4.63	30.40	4.83	34.30	4.75	38.70
22/07/2020	4.64	27.00	4.86	33.90	4.77	38.90
23/07/2020	4.64	27.00	4.86	33.90	4.77	38.90
24/07/2020	4.66	27.10	4.90	34.00	4.78	39.10
25/07/2020	4.68	27.20	4.94	34.10	4.79	39.20
26/07/2020	4.70	27.40	4.98	34.20	4.80	39.40
27/07/2020	4.72	27.50	5.02	34.20	4.81	39.50
28/07/2020	4.74	27.70	5.06	34.30	4.82	39.70
29/07/2020	4.76	27.80	5.09	34.30	4.83	39.80

Nota: La tabla representa los valores de pH y temperatura para cada una de las mezclas. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

5.1.4.1 pH en las mezclas. En la figura 5, se detallan las mediciones diarias realizadas en el laboratorio cuya carga en reactores fue del 7 de julio hasta el 29 de julio de 2020, los valores promedios de pH en las mezclas 1, 2 y 3 fueron de 4.72; 4.90 y 4.86 respectivamente. Según Chiriboga (2010), en la experimentación con residuos de frutas el valor de pH final alcanzado fue de 5.00, esto debido a que durante la biodigestión se producen ácidos, etapa fundamental en este proceso bioquímico, al comparar este valor con el de las mezclas el más cercano es el de la mezcla 2.

Figura 5

pH en mezclas



Nota: La figura representa la comparación de las mediciones de pH en cada una de las 3 mezclas. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

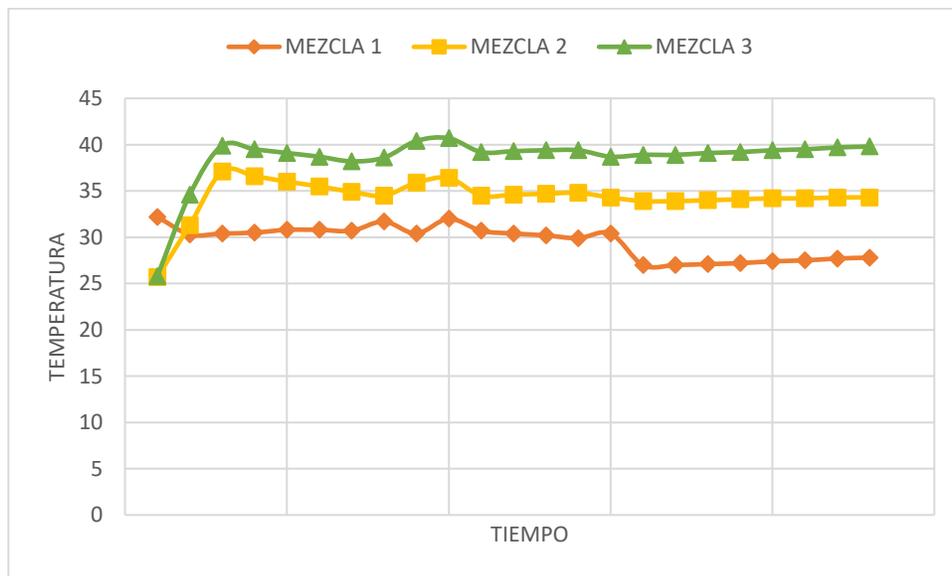
En las mezclas 1, 2 y 3, los valores de pH durante los primeros días fueron valores de 4.60 a 4.70, de acuerdo a lo establecido por Salamanca (2009), en esta fase correspondiente a la acidogénesis se da la formación de ácido por lo que se requiere condiciones de pH bajos, para el crecimiento de bacterias acidogénicas. Con el pasar de los días estos valores suben ligeramente a rangos de pH entre 4.90 a 5.10, correspondientes a la fase metanogénica. En esta etapa debe existir un incremento en los valores de pH para favorecer el desarrollo de las bacterias metanogénicas que tienen como función convertir los ácidos a metano a fin de mejorar la eficiencia de producción de biogás.

5.4.1.2 Temperatura en las mezclas. En la figura 6, se observan valores promedios de temperatura en las mezclas 1, 2 y 3 de 30, 34 y 38 respectivamente. (Herdoiza, 2014) y (Salamanca, 2009) concuerdan que el proceso de digestión bacteriana se llevan a cabo en un

amplio rango de temperaturas, desde 15°C hasta 60°C de los cuales se tiene mayor eficiencia en rangos de temperatura de 30°C a 40°C por ende todas las mezclas estuvieron en el rango óptimo de producción de biogás.

Figura 6

Temperatura en mezclas



Nota: La figura representa la comparación de mediciones de temperatura en cada una de las 3 mezclas. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

5.1.5 Cuantificación del biogás producido en las mezclas

Una vez transcurrido el tiempo de retención de 23 días en las pruebas a nivel laboratorio, se procedió a la medición del desplazamiento del líquido para conocer así la cantidad de biogás producido en cada una de las mezclas.

5.1.5.1 Cuantificación del biogás en la mezcla 1. Para la mezcla 1, la distancia en (cm) que desplazó el biogás fue de 1 cm. Este valor fue reemplazado en la ecuación 3 como se muestra a continuación:

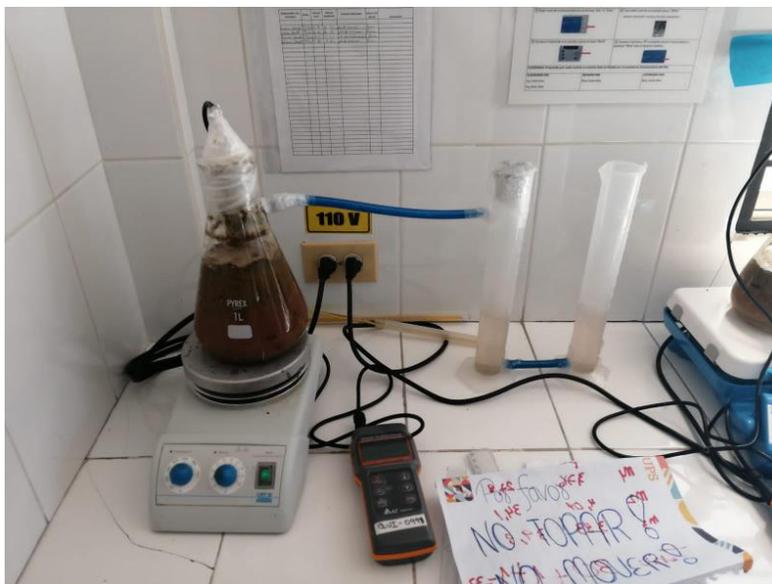


Figura 7. Gasómetro 1 de la mezcla 1

$$V_{m1} = \pi * \frac{(4cm)^2}{4} * \frac{H(cm)}{2} = (6.28) * H$$

$$V_{m1} = (6.28 \text{ cm}^2) * 1 \text{ cm}$$

$$V_{m1} = 6.28 \text{ cm}^3$$

La carga orgánica de alimentación durante los 23 días de reacción para la mezcla 1 fue 0.70 kg de residuos, 0.17 kg de agua residual y 0.93 kg de estiércol vacuno fresco. Se obtuvo un promedio de temperatura de 30 °C, pH promedio de 4.70, humedad del 88%, lo cual generó una cantidad de 6.28 cm³ de biogás.

5.1.5.2 Cuantificación del biogás en la mezcla 2. Para la mezcla 2, la distancia en (cm) que desplazó el biogás fue de 16.50 cm. Este valor fue reemplazado en la ecuación 3 como se muestra a continuación:



Figura 8. Gasómetro 2 de la mezcla 2

Para la mezcla 2:

$$V_{m2} = \pi * \frac{(4cm)^2}{4} * \frac{H(cm)}{2} = (6.28) * H$$

$$V_{m2} = (6.28 \text{ cm}^2) * 16.5 \text{ cm}$$

$$V_{m2} = 103.62 \text{ cm}^3$$

La carga orgánica de alimentación durante los 23 días de reacción para la mezcla 2 fue 0.80 kg de residuos, 0.30 kg de agua residual y 0.80 kg de estiércol vacuno fresco. Se obtuvo un promedio de temperatura de 35 °C, pH promedio de 4.90, humedad del 89%, lo cual generó una cantidad de 103.62 cm^3 de biogás-

5.1.5.3 Cuantificación del biogás en la mezcla 3. Para la mezcla 3, la distancia en (cm) que desplazó el biogás fue de 0.50 cm. Este valor fue reemplazado en la ecuación 3 como se observa a continuación:



Figura 9. Gasómetro 2 de la mezcla 3

Para la mezcla 3:

$$V_{m3} = \pi * \frac{(4cm)^2}{4} * \frac{H(cm)}{2} = (6.28) * H$$

$$V_{m3} = (6.28 \text{ cm}^2) * 0,5 \text{ cm}$$

$$V_{m3} = 3.14 \text{ cm}^3$$

La carga orgánica de alimentación durante los 23 días de reacción para la mezcla 3 fue 0.90 kg de residuos, 0.43 kg de agua residual y 0.67 kg de estiércol vacuno fresco. Se obtuvo un promedio de temperatura de 39 °C, pH promedio de 4.80, humedad del 90%, lo cual generó una cantidad de 3.14 cm^3 de biogás, comparado con las otras 2 mezclas, éste fue el volumen más bajo en generación de biogás.

A pesar de haber obtenido un rango óptimo de temperatura para la generación de biogás, no se evidencia una mayor producción de biogás debido a que se colocó una menor cantidad de

estiércol comparado con las otras mezclas, lo que provoca una limitación de microorganismos los cuales son responsables de la reacción para la producción del biogás (Ramírez, 2016).

Los resultados evidencian que las condiciones óptimas para la generación de biogás se presentaron en la mezcla 2 (mayor producción de biogás) en el rango de temperatura mesofílico entre 34°C y 35°C con pH promedio de 4.90, razón por lo cual se escoge a esta mezcla como idónea para ser colocada posteriormente en el reactor con sistema de calentamiento (Ministerio de energía Chile, 2011).

5.2 Etapa de carga del biorreactor con camisa de calentamiento

5.2.1 Cálculo de la mezcla idónea colocada en el biorreactor

A las cantidades de residuos orgánicos, agua residual y estiércol vacuno cuantificadas en la mezcla 2, se duplicó su valor puesto que la capacidad en volumen que se podía colocar en el biorreactor con sistema de calentamiento solar fue de 4 L, en cambio el volumen utilizado en los matraces kitasato fue de 2 L. Los residuos orgánicos del mercado fueron cortados en trozos pequeños con un cuchillo antes de ingresar al tanque de reacción.

Basados en los resultados de la mezcla 2 descritos en la tabla 3. A continuación, se aprecia los cálculos realizados:

$$x_{ro} = \frac{0.80 \text{ kg de residuos orgánicos} * 4.00 \text{ litros de capacidad}}{1.90 \text{ litros de capacidad}}$$

$$x_{ro} = 1.60 \text{ kg de residuos orgánicos}$$

$$x_{ar} = \frac{0.30 \text{ kg de residuos orgánicos} * 4.00 \text{ litros de capacidad}}{1.90 \text{ litros de capacidad}}$$

$$x_{ar} = 0.60 \text{ kg de agua residual}$$

$$x_{ev} = \frac{0.80 \text{ kg de residuos orgánicos} * 4.00 \text{ litros de capacidad}}{1.90 \text{ litros de capacidad}}$$

$$x_{ev} = 1.60 \text{ kg de estiércol vacuno}$$

Tabla 7

Contenido de la mezcla idónea a ser colocada en el biorreactor con sistema de calentamiento

a= 1.60	kg de residuos orgánicos
b= 0.60	kg de agua residual
c= 1.60	kg de estiércol vacuno
M =3.80	Kg de masa

Nota: La tabla representa el contenido de la mezcla idónea a ser colocada en el biorreactor con sistema de calentamiento. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

5.2.2 Composición de los residuos orgánicos colocados en biorreactor

Una vez conocida la cantidad de residuos orgánicos necesaria para la mezcla a ser colocada en el biorreactor con sistema de calentamiento se procedió a pesar los residuos orgánicos biodegradables en la balanza granataria.

A continuación, se expone la composición de residuos orgánicos para la mezcla:

Tabla 8

Residuos orgánicos que conforman la mezcla idónea a ser colocada en el biorreactor con sistema de calentamiento

Nombre común	Mezcla óptima
Cilantro	0.06
Lechuga	0.20
Tomate	0.24
Zanahoria	0.18
Col	0.08
Cebolla de rama	0.10
Cebolla de bulbo	0.06
Ajo	0.06
Pepino cohombro	0.26
Coliflor	0.10
Perejil	0.10
Brócoli	0.16
Total	1.60 Kg residuos orgánicos

Nota: La tabla representa la cantidad de residuos orgánicos a ser colocados en el biorreactor. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

5.2.3 Medición de pH y temperatura en el biorreactor

Los parámetros monitoreados en el biorreactor con sistema de calentamiento fueron pH y temperatura dentro del tanque de reacción, durante 23 días, los resultados se observan a continuación:

Tabla 9

Parámetros de control monitoreados en el biorreactor

MEZCLA DEL BIORREACTOR		
Días	pH	Temperatura en el día
2/8/2020	6.60	30.00
3/8/2020	5.90	35.30
4/8/2020	5.40	35.40
5/8/2020	5.20	35.50
6/8/2020	5.10	35.80
7/8/2020	5.00	35.80
8/8/2020	5.40	35.70
9/8/2020	4.90	36.70
10/8/2020	4.80	35.40
11/8/2020	4.80	37.00
12/8/2020	4.10	35.70
13/8/2020	4.20	35.40
14/8/2020	4.30	35.20
15/8/2020	4.40	34.90
16/8/2020	4.70	35.40
17/8/2020	4.60	32.00
18/8/2020	4.70	32.00
19/8/2020	4.80	32.10
20/8/2020	4.90	32.20
21/8/2020	5.00	32.40
22/8/2020	5.10	35.50
23/8/2020	5.00	37.00
24/8/2020	5.00	36.00

Nota: La tabla representa los valores de pH y temperatura controlados en el biorreactor con sistema de calentamiento. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

Se obtuvo un promedio de 35 °C en el interior del tanque de reacción, según Briseño (2017), este valor en rango mesófilo es idóneo para la efectividad del proceso anaerobio, ya que a temperaturas mesofílicas aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados en el proceso de biodigestión y por ende la generación de biogás. Según Parra (2015),

la actividad metanogénica a temperaturas psicrófilas conduce a reducir de 10 a 20 veces la velocidad de crecimiento.

5.2.4 *Análisis de normalidad para los datos de pH*

Una vez obtenidos los datos de pH alcanzados en las mezclas 1,2,3 y en la mezcla colocada en el biorreactor con sistema de calentamiento, se realizó el análisis de normalidad mediante la prueba de Shapiro Wilks, el valor arrojado en el programa RStudio corresponde al siguiente:

```
shapiro-wilk normality test
data: valor
W = 0.95399, p-value = 0.296
```

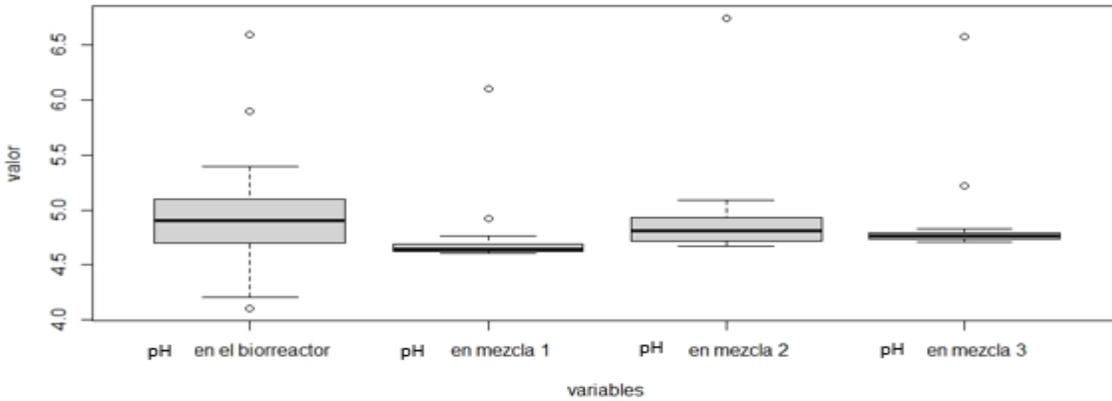
Figura 10. Prueba de Shapiro Wilks en datos de pH

Dado que el p-valor es mayor a 0.05 se establece que los datos de pH alcanzados en las mezclas 1, 2, 3 y en la mezcla colocada en el biorreactor siguen una distribución normal. Obtenido este resultado se procedió a realizar una prueba de análisis ANOVA.

5.2.4.1 Análisis de la varianza (ANOVA) en datos de pH. Se realizó un diagrama de cajas para cada variable: pH en la mezcla 1, pH en la mezcla 2, pH en la mezcla 3 y pH en la mezcla del biorreactor, en éste se puede apreciar las medias de pH para las mezclas.

Figura 11

Diagrama de cajas del pH en las distintas mezclas y en la mezcla colocada en el biorreactor



Nota: La figura muestra las medias entre los datos de pH de las mezclas y de la mezcla colocada en el biorreactor. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

En la figura 11, se aprecia que las medias en los grupos de variables son cercanas con un ligero incremento en el pH en el biorreactor y en la mezcla 2.

5.2.4.1 Nivel de significancia del ANOVA en datos de pH.

Tabla 10

Nivel de significancia del ANOVA en datos de pH

	Fuente de variación	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F	Nivel de significancia
variables	3	0.674	0.2247	1.259	0.296
Residuales	88	15.803	0.1796		

Nota: La tabla representa el nivel de significancia del ANOVA en datos de pH. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

El valor p (0.296) es mayor al nivel de significancia (0.05), se interpreta entonces que no hay significancia estadística en los datos de pH para las distintas mezclas (Soporte Minitab, 2018).

5.2.4.2 Prueba de Tukey para datos de pH.

Tabla 11

Prueba de Tukey

pH	Nivel de significancia
pH en mezcla 1-pH en el biorreactor	0.27
pH en mezcla 2- pH en el biorreactor	0.99
pH en mezcla 3-pH en el biorreactor	0.87
pH en mezcla 2-pH en mezcla 1	0.45
pH en mezcla 3-pH en mezcla 1	0.71
pH en mezcla 3-pH en mezcla 2	0.98

Nota: La tabla representa la prueba de Tukey realizada para identificar los grupos formados según su nivel de significancia. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

En la tabla 11, se observa que los niveles de significancia para cada una de las comparaciones son mayores a 0.05, por lo que forman un grupo homogéneo de datos.

El valor de significancia del pH en la mezcla 2 y en el biorreactor es el más alto, esto se debe a que el contenido colocado en la mezcla 2 fue el mismo en el biorreactor con camisa de calentamiento, razón por lo que al tener las mismas características de biomasa y al evaluar el parámetro de control de pH los valores en las medias de estos grupos van hacer los mismos.

5.2.5 *Cuantificación del biogás producido en el biorreactor*

La cuantificación del gas obtenido en el biorreactor con camisa de calentamiento se realizó mediante la funda Tedlar con volumen de 2 L. Al recolectar la muestra ésta se llenó en $\frac{1}{4}$ de

capacidad, valor ratificado al entregar muestra en el laboratorio de análisis instrumental de la Escuela Politécnica Nacional, con esto se deduce una producción de 0.50 L de biogás.



Figura 12. *Biogás producido en la bolsa Tedlar*

5.3 Análisis realizados

En el proceso de fermentación anaerobia en el biorreactor con sistema de calentamiento, se obtuvo como producto biogás y como subproducto biol. A estos se les realizó determinados análisis cuyos resultados se muestran a continuación:

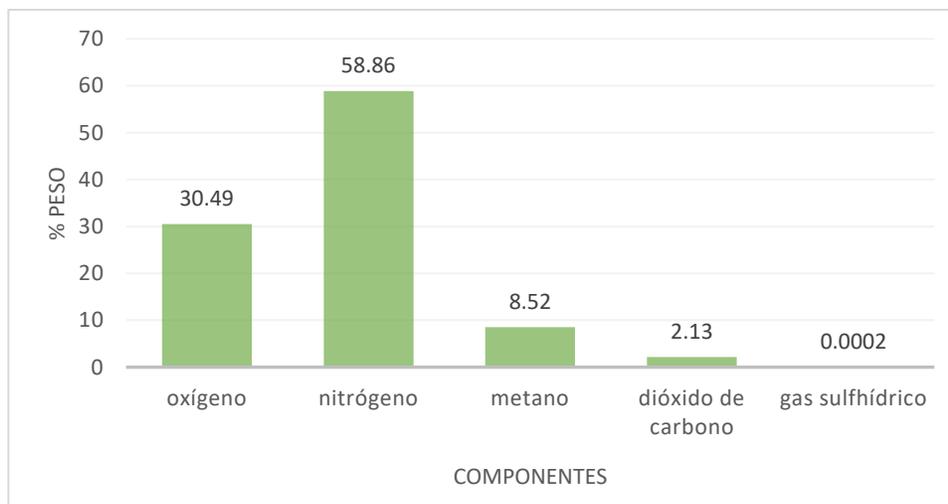
5.3.1 Análisis al producto

En el laboratorio de análisis instrumental de la EPN del Ecuador se analizó la muestra de biogás y se obtuvo la siguiente composición:

5.3.1.1 Composición del biogás producido. Efectuado el análisis de cromatografía se obtuvo los componentes en el biogás ordenados de mayor a menor; así: N_2 , O_2 , CH_4 , CO_2 y H_2S .

Figura 13

Composición del biogás



Nota: La figura representa la composición de la muestra de biogás analizado. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020. Tomado de: Análisis laboratorio Instrumental de la EPN.

Como se observa en la figura 13, el mayor componente en el biogás fue el N_2 seguido del O_2 , esto se debe a que al momento de tomar la muestra del biodigestor ingresó aire por la ranura de la funda Tedlar ya que los componentes del aire son N_2 (78.08%) y O_2 (20.95%) y fueron los de mayor porcentaje obtenidos, esto sucede frecuentemente al no tener un buen mecanismo de recolección de muestra, así lo menciona Barrera (2005). Sin embargo se puede observar en la comparación entre el porcentaje de peso del CH_4 con el CO_2 , el CH_4 es el gas dominante y el que se desea obtener en mayor proporción por el uso potencial como fuente de energía alternativa.

Otra característica importante en el análisis es la mínima cantidad de H_2S encontrado en la reacción siendo esta menor al 0.0002, ya que según Gerardi (2003) las concentraciones elevadas de gas sulfhídrico en la reacción provocan inhibición en el crecimiento de bacterias metanogénicas, por lo que esa mínima cantidad encontrada indicaría que el proceso transcurrió con normalidad.

5.3.1.2 Propiedades del biogás. Los resultados obtenidos en el análisis de laboratorio se observan a continuación,

Tabla 12

Propiedades de la muestra del biogás

Densidad de la muestra	1.16	$\frac{g}{L}$
Peso molecular promedio	27.52	$\frac{g}{mol}$
Poder calorífico superior	5499.85	$\frac{kJ}{m^3}$
Poder calorífico inferior	4952.04	$\frac{kJ}{m^3}$
Factor de compresibilidad	1.00	

Nota: La tabla indica las propiedades del biogás obtenidas en el informe del LAI. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020. Tomado de: LAI de la EPN.

El peso molecular promedio del biogás fue de $27.52 \frac{kg}{mol}$.

El valor obtenido de densidad en la muestra de biogás fue de $1.16 \frac{kg}{m^3}$ éste valor no varía mucho de acuerdo a lo menciona Ramírez (2016), que afirma que el valor de densidad del biogás como gas de combustible es de $0.94 \frac{kg}{m^3}$.

El PCS de la muestra de biogás analizada arrojó un valor de $5499.85 \frac{KJ}{m^3}$, el poder PCI fue $4952.04 \frac{KJ}{m^3}$ por lo que el IW para la muestra de biogás analizada al usar la ecuación 1 el PCS fue de $5613.26 \frac{KJ}{m^3}$, valor que según (Ortiz, 2015) al compararlo con el IW del GLP $86.83 \frac{KJ}{m^3}$ es muy alto, por lo que al mezclar ambos gases combustibles se tendría problemas de intercambiabilidad.

5.3.2 *Análisis del subproducto*

Al subproducto de la digestión anaerobia en el biorreactor con sistema de calentamiento se le realizó los análisis de DQO y COT se obtuvo los siguientes resultados:

5.3.2.1 Resultados del análisis del DQO. Este análisis se realizó en un Analizador de Demanda Química de Oxígeno.

Modelo: Multiparameter photometer with COD

Marca: HANNA

La cantidad de DQO presente en la muestra de biol fue $1.50 \left(\frac{g}{L}\right) O_2$.

Este resultado corrobora a lo establecido por Varnero (2011), en el manual de la FAO, que afirma que los valores menores a $3.00 \left(\frac{g}{L}\right) O_2$ de DQO corresponde a los sustratos como: residuos orgánicos, estiércol sólido y restos de cosecha, éstos pertenecen a un sustrato tipo uno, los cuales se degradan eficientemente en reactores tipo *batch* para que se realice el proceso de digestión anaerobia.

5.3.2.1 Resultado del análisis del COT. Este análisis se realizó en un Analizador de Carbono Orgánico Total.

Modelo: Total Organic Carbon Analyzer

Marca: Labgeni

COT (Carbono Orgánico Total) = CT (Carbono Total) – CIT (Carbono Inorgánico Total)

La cantidad de COT se determinó en laboratorio y se obtuvo los siguientes resultados descritos en la siguiente tabla:

Tabla 13

Cantidad de Carbono Orgánico Total en la muestra de biol

No.	COT ($\frac{mg}{L}$)	Times
1	0.24	2
2	0.21	3
Resultado	0.23	

Nota: La tabla representa la cantidad de carbono orgánico total presente en la muestra de biol. Elaborado por: Manobanda E., Valdez J., 2020.

La cantidad de COT en la muestra de biol fue de $0.23 \left(\frac{mg}{L}\right)$.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se cargó el biorreactor con la mezcla idónea de residuos orgánicos biodegradables obtenida en las pruebas de laboratorio. La carga resultante fue de 1.60 kg de residuos orgánicos, 0.60 kg de agua residual de la industria láctea y 1.60 kg de estiércol vacuno con contenido de C/N=30 y 89% de humedad. El promedio de *pH* fue de 4.90 y de temperatura fue de 35 °C. Al finalizar el tiempo de retención (23 días) se obtuvo como producto 0.50 L de biogás y como subproducto 2 L de biol.

Los volúmenes de biogás y biol producidos por kg de mezcla tratada en el reactor anaerobio con sistema de calentamiento fueron de $131.58 \frac{mL}{kg}$ y $500.00 \frac{mL}{kg}$ respectivamente con lo cual se deduce que es factible el aprovechamiento de residuos orgánicos biodegradables.

La producción de metano es 4 veces la de dióxido de carbono debido que la concentración obtenida en el biogás fue de $8.52 \frac{g}{L} CH_4$ y $2.13 \frac{g}{L} CO_2$. Estos valores indican que en la mezcla gaseosa se obtuvo una mayor concentración de metano, el cual es el elemento que se desea producir en mayor proporción por su potencial beneficio energético.

6.2 Recomendaciones

Los resultados de este proyecto constituyen una línea base sobre las metodologías a ser empleadas en trabajos posteriores en los que se pueda trabajar con diferentes tipos de biomasa para las mezclas, parámetros de operación y gasómetros para la cuantificación del biogás producido.

La solución que se usó para el desplazamiento de volumen fue una solución acidulada al 5% de *HCl*, se podría realizar una comparación de varias soluciones barreras como soluciones de hidróxido de sodio (*NaOH*; 0.1N), solución saturada de *NaCl* y soluciones ácidas $\text{pH} < 2$, para comprobar con cual se recupera mayor cantidad de metano.

Se recomienda un sistema adicional para los gasómetros que permita la eliminación de contaminantes en el biogás producido como: el sulfuro de hidrógeno, siloxanos y mercaptanos (Ramírez, 2016). El tipo de gasómetro deberá constar de un erlenmeyer adicional que contenga 100 g de limadura de hierro y 100 g de carbón activado para la absorción de contaminantes.

Se recomienda experimentar con diferentes composiciones de residuos orgánicos, distintas fuentes de producción y variedad de estiércol animal.

Se recomienda incorporar en el punto de muestreo de biogás una bolsa Tedlar para la recolección directa del biogás producido, para evitar que la muestra a analizar en el cromatógrafo se combine con otros elementos.

7. BIBLIOGRAFÍA

Acosta, Y., & Obaya, C. (2005). La digestión anaerobia, aspectos teóricos. *La digestión anaerobia, aspectos teóricos*, 1, 12-15. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>

Agencia andaluza de la energía. (12 de 09 de 2011). *Estudio básico del biogás*. Obtenido de Estudio básico del biogás: https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/sites/default/files/documentos/estudio_basico_del_biogas_0.pdf

Agoglia, O. (2 de 7 de 2010). *La crisis ambiental como proceso Un análisis reflexivo sobre su emergencia, desarrollo y profundización desde la perspectiva de la teoría crítica*. Obtenido de La crisis ambiental como proceso Un análisis reflexivo sobre su emergencia, desarrollo y profundización desde la perspectiva de la teoría crítica: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/7671/tobam.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Ambiente, S. d. (3 de 1 de 2019). *Radiación ultravioleta*. Obtenido de Radiación ultravioleta: <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/radiacion-ultravioleta-app>

Angelidaki, I., Ellegaard, L., & Kicer, B. (2003). Applications of the anaerobic digestion process, advances in biochemical engineering biotechnology. En I. Angelidaki, L. Ellegaard, & B. Kicer, *Biochemical Engineering Biotechnology* (págs. 82, pp 1 – 33.). Estados Unidos: Wiley.

Arango, O., & Sanches, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 7(2), 24-31. .

Ashraf R, S. F. (29 de 5 de 2007). *Association of fungi, bacteria and actinomycetes with different composts*. Obtenido de Association of fungi, bacteria and actinomycetes with different composts:

https://www.researchgate.net/profile/Rabia_Ashraf/publication/233962514_Association_of_fungi_bacteria_and_actinomycetes_with_different_composts/links/549240960cf2ac83c53dc087.pdf

Auge, M. (2007). *Agua, fuente de vida*. Universidad de Buenos Aires , Departamento de Ciencias Geológicas. La Plata: Universidad de Buenos Aires. Obtenido de <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/AguaFuenteVida.pdf>

Banco mundial. (06 de 03 de 2018). *Los desechos 2.0: Un panorama mundial de la gestión de desechos sólidos hasta 2050*. Obtenido de Los desechos 2.0: Un panorama mundial de la gestión de desechos sólidos hasta 2050: <https://www.bancomundial.org/es/news/infographic/2018/09/20/what-a-waste-20-a-global-snapshot-of-solid-waste-management-to-2050>

Barrera, A. (4 de 9 de 2005). *Caracterización elemental del PM15 y PM2.5 para la identificación de fuentes contaminantes*. Obtenido de Caracterización elemental del PM15 y PM2.5 para la identificación de fuentes contaminantes: http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/384/barrera_lopez.pdf?sequence=13

Berri, M. (4 de 6 de 2009). *Bacterias clostridium*. Obtenido de Bacterias clostridium: <https://www.berri.es/pdf/MANDELL%E2%80%9A%20DOUGLAS%20Y%20BENNET>

T%20Enfermedades%20Infecciosas.%20Principios%20y%20Pr%20C3%A1ctica%E2%80%9A%202%20Vols%20+%20eBook/9788491134992

Bosque Sendra, J. (5 de 4 de 1992). *La enseñanza de los sistemas de información geográfica*.

Obtenido de La enseñanza de los sistemas de información geográfica: http://tig.age-geografia.es//zaragoza92/1992_03_bosque.pdf

Briseño, L. (18 de 3 de 2017). *Producción de biogás a través de la codigestión de residuos sólidos y semisólidos: hacia una planta centralizada de biogás para la generación de energía*.

Obtenido de

<https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/186/1/Producci%C3%B3n%20de%20biog%C3%A1s%20a%20traves%20de%20la%20codigesti%C3%B3n%20de%20residuos%20s%C3%B3lidos%20y%20semis%C3%B3lidos%20hacia%20una%20planta%20centralizada%20de%20biog%C3%>

Bueno, M. (1 de 9 de 2008). *Manual para horticultores ecológicos*. Obtenido de Cómo hacer un buen compost: <https://ecocosas.com/biblioteca-externos/>

Buenrostro, O., Bernache, G., Bocco, G., & Cram, S. (1 de 8 de 2000). *Digestión anaerobia como*

alternativa de tratamiento a los residuos orgánicos generados en los mercados municipales. Obtenido de Digestión anaerobia como alternativa de tratamiento a los

residuos orgánicos generados en los mercados municipales:

<https://www.revistascca.unam.mx/rica/index.php/rica/article/view/32527>

Calero, M. (8 de 3 de 2011). *Investigación del potencial de los subproductos del proceso de*

obtención de etanol lignocelulósico para la producción de biogás mediante fermentación

anaerobia y su análisis por cromatografía de gases. Tesis de grado, Quito. Obtenido de

Investigación del potencial de los subproductos del proceso de obtención de etanol lignocelulósico para la producción de biogás mediante fermentación anaerobia y su análisis por cromatografía de gases.: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/4467>

Carhuancho, F. (12 de Septiembre de 2012). *Aprovechamiento del estiércol de gallina para la elaboración de biol en biodigestores tipo batch como propuesta al manejo de resíduo avícola*. Tesis de grado, Lima. Obtenido de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1769/P06.C375-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cartuja, M. (25 de 8 de 2011). *Estudio básico del biogás*. Obtenido de Estudio básico del biogás: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/tutorial311.pdf>

Castells, X. (24 de febrero de 2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Obtenido de https://books.google.com.ec/books?id=KBTPxli6IRsC&pg=PA661&lpg=PA661&dq=Si+la+humedad+es+baja+se+disminuye+la+actividad+de+los+microorganismos+y+el+proceso+es+m%C3%A1s+lento&source=bl&ots=8tzej7URM&sig=ACfU3U09Wea4ncPi5ymFEkEIA_AYnPNiyw&hl=es-419&sa=X&ve

Castillo, A. (26 de 12 de 2011). *Comprendiendo en detalles las propiedades del biogás*. Obtenido de [Comprendiendo en detalles las propiedades del biogás: http://todoproduktividad.blogspot.com/2011/12/comprendiendo-en-detalles-las.html](http://todoproduktividad.blogspot.com/2011/12/comprendiendo-en-detalles-las.html)

Celec EP. (2006). *Instructivo para la gestión de residuos sólidos*. Cuenca: Celec EP. Obtenido de <https://www.celec.gob.ec/hidropaute/images/Ambiente/Gestion.de.residuos.solidos.pdf>

- Cepal. (27 de 07 de 2019). *Instrumentos para la implementación efectiva y coherente de la dimensión ambiental de la agenda de desarrollo*. Obtenido de Instrumentos para la implementación efectiva y coherente de la dimensión ambiental de la agenda de desarrollo: https://www.cepal.org/sites/default/files/presentations/gestion_de_residuos_-_jordi_pon.pdf
- Chiriboga, O. (1 de 5 de 2010). *Desarrollo del proceso de producción de biogás y fertilizante orgánico a partir de mezclas de desechos de procesadoras de frutas*. Quito. Obtenido de Desarrollo del proceso de producción de biogás y fertilizante orgánico a partir de mezclas de desechos de procesadoras de frutas: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/741/1/96311.pdf>
- Clark, R., & Speece, R. (2009). The pH tolerance of anaerobic digestion. En R. Clark, & R. Speece, *Advanced water pollution research* (págs. 14-27). United States: Vanderbilt.
- Contreras, A. (2006). *Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos*. El caso de Perú: Escuela Técnica de ingeniería.
- Corrales, L., Antolinez, D., Bohórquez, J., & Corredor, A. (24 de Julio de 2015). *Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta*. Obtenido de Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702015000200007
- Corzo, A. (30 de 7 de 2018). *Técnica de análisis en química orgánica cromatográfica*. Obtenido de <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-44-Cromatografia-CORZO.pdf>

Cuvi, K. (17 de septiembre de 2017). *Determinación de la factibilidad al usar un sistema de lodos activados para la depuración de aguas residuales*. Tesis de grado, Quito. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14607/1/UPS%20-%20ST003257.pdf>

Datos mundiales. (12 de 12 de 2019). *Crecimiento de la población por país*. Obtenido de Crecimiento de la población por país: <https://www.datosmundial.com/crecimiento-poblacional.php#:~:text=El%20crecimiento%20de%20la%20poblaci%C3%B3n,y%20la%20tasa%20de%20mortalidad.&text=En%202019%2C%20alcanz%C3%B3%20una%20poblaci%C3%B3n,tasa%20de%20crecimiento%20del%201.1%25>.

Dorotea, J. (27 de 08 de 2012). *Aprovechamiento de biogás proveniente del abono de ganado vacuno en un establo ubicado en Ixtapaluca Estado de México*. Obtenido de Aprovechamiento de biogás proveniente del abono de ganado vacuno en un establo ubicado en Ixtapaluca Estado de México: <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/7013/1/JUAN%20CARLOS%20DOROTEO%20OTLICA.pdf>

Duffie, J. B. (1991). Solar engineering of thermal processes. *Solar engineering*, 2-4.

Eastman, J., & Ferguson, J. (1981). Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase anaerobic digestion. En S. o. digestion, *Wat Pollut Control Fed* (págs. 352-366). Wiley.

Ecured. (10 de 02 de 2015). *Aguas residuales*. Obtenido de Aguas residuales: https://www.ecured.cu/Aguas_residuales

El caso Perú. (02 de 03 de 2005). *Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos*.

Obtenido de Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos:

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/2716/36244-2.pdf?sequence=2>

El Comercio. (20 de 08 de 2020). *Crece el drama de la basura en el relleno sanitario de El Inga*.

Obtenido de Crece el drama de la basura en el relleno sanitario de El Inga:

<https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/quito-basura-relleno-sanitario/>

Emgirs-Ep. (10 de 03 de 2018). *Informe de gestión 2018*. Obtenido de Informe de gestión 2018:

<http://emgirs.gob.ec/phocadownload/informe-rendicion-cuentas/2018/rendicion-de-cuentas-2018.pdf>

European-Biomass-Association. (27 de 2 de 2009). *A biogas road map for Europe*. Obtenido de A

biogas road map for Europe: https://www.big-east.eu/downloads/Brochure_BiogasRoadmap_WEB%5B1%5D.pdf

Fabara, T., & Nuñez, B. (01 de 10 de 2020). *Diseño y construcción de un reactor anaerobio con*

sistema de calentamiento basado en energías alternativas proyectado para la producción

de biogás. Obtenido de [https://pure.ups.edu.ec/en/projects/estudio-de-factibilidad-del-](https://pure.ups.edu.ec/en/projects/estudio-de-factibilidad-del-aprovechamiento-de-agua-residual-de-l)

[aprovechamiento-de-agua-residual-de-l](https://pure.ups.edu.ec/en/projects/estudio-de-factibilidad-del-aprovechamiento-de-agua-residual-de-l)

Fernandez, C. P. (23 de 6 de 2019). *Proyecto de diseño de un biorreactor para la producción de*

compost a partir de biorresiduos. Obtenido de Proyecto de diseño de un biorreactor para

la producción de compost a partir de biorresiduos:

<http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/183933/TFG%20C.Pastor.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Flotats, X., & Campo, E. (21 de 4 de 2004). *Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje*. Obtenido de Procesos biológicos: La digestión anaerobia y el compostaje: https://www.researchgate.net/publication/304771327_Procesos_biologicos_La_digestion_anaerobia_y_el_compostaje
- Gaibor, J. (30 de 7 de 2014). *Caracterización del agua residual generada en la planta de lácteos el Salinerito, parroquia Salinas, cantón Guaranda para el diseño de una planta de tratamiento*. Obtenido de Caracterización del agua residual generada en la planta de lácteos el Salinerito, parroquia Salinas, cantón Guaranda para el diseño de una planta de tratamiento: <https://talentos.ueb.edu.ec/index.php/talentos/article/view/92/121>
- García, G. (2 de 12 de 2016). *Diseño de un biodigestor para el mejoramiento de las aguas residuales en la parroquia de Tumbaco*. Obtenido de Diseño de un biodigestor para el mejoramiento de las aguas residuales en la parroquia de Tumbaco: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/5449/1/124462.pdf>
- Gerardi, M. (2 de 12 de 2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. Obtenido de The microbiology of anaerobic digesters: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0043135469900025>
- González C, A. A. (23 de 9 de 2008). *Estudio experimental de la estabilidad de llama del biogás en un sistema de premezcla*. Obtenido de Estudio experimental de la estabilidad de llama del biogás en un sistema de premezcla: <file:///C:/Users/Admin/Downloads/9402-16104-1-PB.pdf>

González, A. (2014). *Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión*. Obtenido de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70603/fichero/3.+la+digestion+anaerobia.pdf>

González, S., Guerra, R., Trupiano, A., Castañeda, M., Figueroa, M., & Cuevas, C. (24 de 8 de 2004). *Tratamiento de líquidos cloacales pre-sedimentados en un reactor UASB en regiones subtropicales*. (C. d.-I. Universidad Nacional de Salta, Ed.) Obtenido de *Tratamiento de líquidos cloacales pre-sedimentados en un reactor UASB en regiones subtropicales.*: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia20/HTML/articulo03.html>

Herdoiza, W. (2014). Tratamiento biológico anaeróbico de aguas residuales. *Biothane*, 12-15.

Huerga, B. (23 de 1 de 2014). *Biodigestores de pequeña escala*. Obtenido de Biodigestores de pequeña escala: <http://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/26-Biodigestor-Familiar.pdf>

Idae. (3 de 12 de 2007). *Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia*. ((. p. Energía, Editor) Obtenido de *Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia*: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf

Jhorar, B. (3 de 1 de 1991). *Kinetics of composting rice straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment*. *Arid Soil Rest*. Obtenido de *Kinetics of composting rice*

- straw with glue waste at different C/N ratios in a semiarid environment. *Arid Soil Rest.*: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15324989109381289>
- Klinger, I., Alexander, R., & Marchaim, U. (1991). A suggested solution for slaughterhouse wastes: Uses of the residual materials after anaerobic digestion. En *A. s. digestion., Bioresource Technology* (págs. 127-134). Board.
- López, G. (2011). *Producción de biogás a partir de RSU*. Bogotá: Universidad Distrital.
- Marín, J. (7 de 12 de 2007). *Optimización de un método para la determinación simultánea de H₂ y CH₄ por cromatografía gas-sólido en biorreactores anaeróbicos*. Obtenido de Optimización de un método para la determinación simultánea de H₂ y CH₄ por cromatografía gas-sólido en biorreactores anaeróbicos: <http://redalyc.uaemex.mx>
- Marquez, P., Díaz, M., & Cabrera, F. (6 de 12 de 2003). *Factores que afectan al proceso de compostaje*. Obtenido de Factores que afectan al proceso de compostaje: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/20837/3/Factores%20que%20afectan%20al%20p>
- McCarty, P. (1964). Anaerobic waste treatment fundamentals. *Public Works*, 2-5.
- Medio Ambiente Álora. (8 de Junio de 2015). *Residuos orgánicos*. Obtenido de Concejalía de Medio Ambiente del Excmo. Ayuntamiento de Álora: [https://medioambientealora.wordpress.com/2015/06/08/recogida-de-rsu/#:~:text=Son%20biodegradables%20\(se%20descomponen%20naturalmente,sus%20c%3%A1scaras%2C%20carne%2C%20huevos](https://medioambientealora.wordpress.com/2015/06/08/recogida-de-rsu/#:~:text=Son%20biodegradables%20(se%20descomponen%20naturalmente,sus%20c%3%A1scaras%2C%20carne%2C%20huevos).
- Menna, M., Branda, J., Murcia, G., Garín, E., Belliski, G., & Moschione, E. (9 de 11 de 2007). *Metodología de bajo costo para la cuantificación de biogás*. Obtenido de Metodología de

bajo costo para la cuantificación de biogás:

[http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/93253/Documento_completo.pdf-](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/93253/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/93253/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Metcalf, & Eddy. (2006). *Ingeniería de aguas residuales Tratamiento, vertido y reutilización* (Vol. 1 y 2)). Madrid: McGraw-Hill.

Ministerio de energía Chile. (24 de 02 de 2011). *Manual de biogás*. Obtenido de Manual de biogás:

<http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Moncayo, G. (4 de 12 de 2008). *Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogas*. Obtenido de Aqualimpia Beratende Ingenieure: Obtenido de

https://www.academia.edu/6179555/DIMENSIONAMIENTO_DISEÑO_Y_CONSTRUCCIÓN_DE_BIODIGESTORES_Y_PLANTAS_DE_BIOPROCESOS

Monroy, O., & Viniegra, G. (1990). Biotecnología para el aprovechamiento de los desperdicios orgánicos. En O. 6 Monroy, & Viniegra, *Biotecnología para el aprovechamiento de los desperdicios orgánicos* (págs. 44, 65-93). España: G. AGT Editor.

Morán, S. (30 de 04 de 2020). *Colapso del relleno de El Inga*. Obtenido de Colapso del relleno de

El Inga: [https://www.planv.com.ec/historias/sociedad/imagenes-exclusivas-revelan-el-colapso-del-relleno-el-inga?fbclid=IwAR3oWhsgo-](https://www.planv.com.ec/historias/sociedad/imagenes-exclusivas-revelan-el-colapso-del-relleno-el-inga?fbclid=IwAR3oWhsgo-cYfZirRgqa66BcA8EEcMMzETd_8SAIW3l-YKbKQhkUZnota3Y)

[cYfZirRgqa66BcA8EEcMMzETd_8SAIW3l-YKbKQhkUZnota3Y](https://www.planv.com.ec/historias/sociedad/imagenes-exclusivas-revelan-el-colapso-del-relleno-el-inga?fbclid=IwAR3oWhsgo-cYfZirRgqa66BcA8EEcMMzETd_8SAIW3l-YKbKQhkUZnota3Y)

Mosquera, B. (8 de 10 de 2010). *Manual para elaborar y aplicar abonos y plaguicidas orgánicos*.

Obtenido de Manual para elaborar y aplicar abonos y plaguicidas orgánicos:

https://www.academia.edu/15348102/Abonos_organicos

- Nair, H. M., & Miller, J. (2009). *Basic gas chromatography*. (J. W. Inc, Ed.) New Jersey: 2da edición.
- Nogués, F., Galindo, D., & Rezeau, A. (2003). *Energía de la biomasa*. España: Pressas Universitarias de Zaragoza.
- Ortiz, M. (30 de 2 de 2015). *Fundamentos de la intercambiabilidad del gas natural*. Obtenido de Fundamentos de la intercambiabilidad del gas natural: https://www.cnogas.org.co/documentos/1_Intercambiabilidad%20del%20gas%20natural.pdf
- Palmowski, L., & Muller, J. (1 de 1 de 2003). *Anaerobic degradation of organic materials - significance of the substrate surface area*. Obtenido de Water Sci Technol: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12926693/>
- PanReac Química SLU. (21 de 10 de 2014). *Reactivos para análisis de DQO*. Obtenido de https://www.itwreagents.com/download_file/info_point/IP-025/es/IP-025_es.pdf
- Parra, R. (11 de 12 de 2015). *Digestión anaeróbica mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria*. Tunja, Colombia: Print version ISSN 1909-0455. Obtenido de Digestión anaeróbica mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-04552015000200014&script=sci_abstract&tlng=es
- Parrales, A., Reyes, M., & Pine, W. (30 de 11 de 2012). *Cromatografía del gas natural*. Obtenido de Cromatografía del gas natural: <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/91597/D-68860.pdf>

- Pavlostathis, S. G. (2005). Kinetics of anaerobics treatment: a critical review. *Critical reviews in environmental control*, 10-15.
- Pedraza A, C. J. (3 de 12 de 2016). *Estudiocinetico de bacterias metanogenicas a diferentes temperaturas*. Obtenido de Estudiocinetico de bacterias metanogenicas a diferentes temperaturas:
https://www.researchgate.net/publication/319598611_Estudio_cinetico_de_bacterias_metanogenicas_a_diferentes_temperaturas/citation/download
- Pérez, G. (2020). *Informe de resultados cromatografía de gases (LAI)*. Quito: Laboratorio de análisis instrumental- EPN.
- Picado, J., & Añasco, A. (6 de 7 de 2005). *Preparación y uso de abono sorganicos sólidos y líquidos*. Obtenido de Preparación y uso de abono sorganicos sólidos y líquidos:
https://cedeco.or.cr/files/Abonos_organicos.pdf
- Pineda, G. (9 de 11 de 2011). *Caracterización de biogás proveniente de la fermentación de la mezcla de agua de lavado de café y glicerina residual de biodiesel por medio de cromatografía de gases*. Obtenido de Caracterización de biogás proveniente de la fermentación de la mezcla de agua de lavado de café y glicerina residual de biodiesel por medio de cromatografía de gases:
http://revistaiiqb.usac.edu.gt/index.php/revista_cientifica/article/view/285
- Pino, C. (23 de 3 de 2005). *Determinación de la mejor dosis de biol en el cultivo de banano como alternativa a la fertilización foliar química*. Obtenido de Determinación de la mejor dosis de biol en el cultivo de banano como alternativa a la fertilización foliar química:
<https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/14619>

Ramírez, G. (3 de 12 de 2016). *Valoración de la producción de biogás durante un proceso de digestión anaerobia con contenido ruminal de origen bovino bajo condiciones de tiempo, carga y temperatura diferenciales*. Obtenido de Valoración de la producción de biogás durante un proceso de digestión anaerobia con contenido ruminal de origen bovino bajo condiciones de tiempo, carga y temperatura diferenciales: <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/2771>

Reyes, E. (01 de Diciembre de 2017). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos*. Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjZiqWk6NzoAhUkTt8KHdcvBQ0QFjAAegQIAhAB&url=https%3A%2F%2Fwww.lamjol.info%2Findex.php%2FFAREM%2Farticle%2Fdownload%2F5552%2F5248&usg=AOvVaw3ny13O2lS8O-cbF6zqdU44>

Reyes, E. (2017). *Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos*. México: Revista Científica de FAREM. Obtenido de <https://www.camjol.info/index.php/FAREM/article/view/5552>

Reyes, E., & Pérez, E. (29 de 06 de 2019). Obtenido de <https://www.lamjol.info/index.php/FAREM/article/download/8474/8666?inline=1>

Reyes, E., & Pérez, E. (2019). *Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las excretas de ganado, caballo, cerdo y gallinaza para la generación de biogás*. México: Revista Científica de FAREM-Estelí. Obtenido de <https://www.lamjol.info/index.php/FAREM/article/download/8474/8666?inline=1>

- Rivas, C., & Mota, M. (3 de 7 de 2008). *Bacterias anaerobias*. Obtenido de Bacterias anaerobias: <http://www.higiene.edu.uy/cefa/2008/BacteriasAnaerobias.pdf>
- Rizvi, H., Ahmad, N. A., Abbas, F., Hussain, I., Yasar, A., & Ali, S. (9 de 12 de 2015). *Start-up of UASB reactors treating municipal wastewater and effect of temperature/sludge age and hydraulic retention time (HRT) on its performance*. Obtenido de Start-up of UASB reactors treating municipal wastewater and effect of temperature/sludge age and hydraulic retention time (HRT) on its performance: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535213004449>
- Rohstoffe, F. N. (7 de 2 de 2010). *Guía sobre el biogás desde la producción hasta el uso*. (F. N. (FNR), Ed.) Obtenido de Guía sobre el biogás desde la producción hasta el uso: <https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/l/e/leitfadenbiogas-es-2013.pdf>
- Rovira, L. (5 de 8 de 2005). *Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos: estudio de las necesidades para la implantación en Perú*. Obtenido de Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos: estudio de las necesidades para la implantación en Perú: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/2008/05_invest_JARAUTA.pdf?sequence=1
- Sai global. (5 de 3 de 2020). *Método de prueba estándar para el análisis de gas natural por cromatografía de gases*. Obtenido de Método de prueba estándar para el análisis de gas natural por cromatografía de gases: https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/ASTM-D-1945-2014-R2019-141779_SAIG_ASTM_ASTM_2820179/

Salamanca, J. (5 de 7 de 2009). *Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor a escala piloto para la generación de biogás y fertilizante orgánico*. Obtenido de Diseño, construcción y puesta en marcha de un biodigestor a escala piloto para la generación de biogás y fertilizante orgánico: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/740/1/94246.pdf>

Secretaría del agua. (23 de 05 de 2014). *Aguas residuales: realidades y perspectivas*. Obtenido de Aguas residuales: realidades y perspectivas: <https://es.slideshare.net/CCIFEC/20-gestin-de-aguas-residuales-en-ecuador-senagua>

Sistema biobolsa. (1 de 07 de 2018). *Manual de biol*. Obtenido de Manual de biol: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SISTEMA%20BIOBOLSA%20s.f.%20Manual%20del%20BIOL.pdf

Skoog, D., Holler, F., & Nieman, T. (2007). Principios de análisis instrumental. En D. Skoog, *Principios de análisis instrumental* (págs. 12-13). España: 5ta edición.

Smith, J. M. (2004). *Introducción a la termodinámica en ingeniería química*. California: Mc Graw Hill.

Soporte Minitab. (2018). *Interpretar los resultados clave para Prueba de normalidad*. Obtenido de Como se puede observar en la tabla el nivel de significancia del grupo de variables es menor a 0.05, razón por lo que se concluyó que las estadísticas de temperatura en las mezclas son diferentes.

Sumálaga. (7 de 3 de 2016). *Residuos orgánicos*. (S. u. Málaga, Editor) Obtenido de Residuos orgánicos: <http://www.consorciorsumalaga.com/5936/residuos-organicos>

- Sven G & Morten L. (2013). *Animal manure recycling treatment and management*. Reino Unido: Wiley.
- Tipán, E. (3 de 1 de 2020). *Evaluación de parámetros físicos y químicos de mezclas de agua residual de la industria láctea y residuos orgánicos para la obtención de biogás*. Tesis de grado, Quito. Obtenido de Evaluación de parámetros físicos y químicos de mezclas de agua residual de la industria láctea y residuos orgánicos para la obtención de biogás: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18610/1/UPS%20-%20ST004524.pdf>
- Uned. (30 de 03 de 2012). *Gestión y tratamiento de los residuos urbanos*. Obtenido de Los residuos urbanos y su problemática: <https://www2.uned.es/biblioteca/rsu/pagina1.htm>
- Valdivia. (2 de 3 de 2000). *Uso de biogás para la generación de energía eléctrica mediante un motor gasolinero estacionario modificado*. Obtenido de Uso de biogás para la generación de energía eléctrica mediante un motor gasolinero estacionario modificado: <https://core.ac.uk/download/pdf/129438505.pdf>
- Varnero, M. T. (4 de 8 de 2011). *Preparación del manual de biogás*. Obtenido de Preparación del manual de biogás: <http://www.fao.org/3/a-as400s.pdf>
- Viloria, A. (13 de Agosto de 2013). *Gerencia de petróleo y gas*. Obtenido de <https://www.carec.com.pe/biblioteca/biblio/6/36/Material%20de%20apoyo%20%20-%20Calidad%20de%20Gas%20y%20sus%20Productos.pdf>
- Yank, L., Martina, P., & Corace, J. (5 de 4 de 2002). *Determinación de CO₂ en diferentes muestras de gas mediante el uso del aparato de Orsay*. Obtenido de Departamento de termodinámica: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952014000700002

8. ANEXOS

ANEXO 1

Obtención de residuos orgánicos biodegradables



Caracterización de residuos en mercado mayorista de Quito



Recolección de estiércol vacuno fresco



Recolección de agua residual



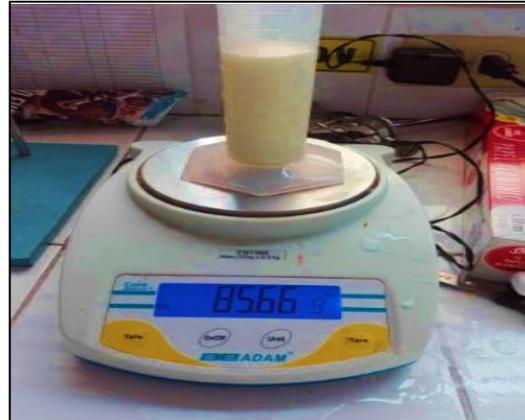
Muestra de residuos orgánicos

ANEXO 2

Puesta en marcha del diseño experimental



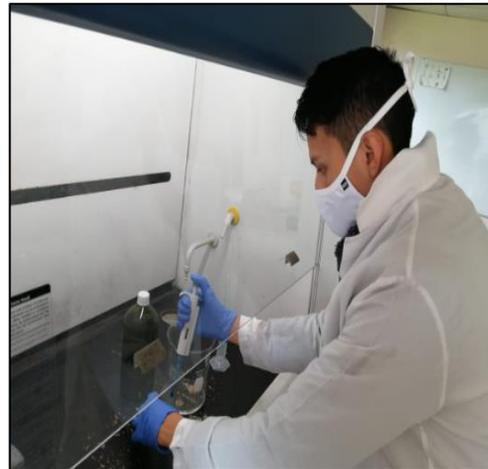
Residuos orgánicos para la mezcla 1



Cantidad de agua residual para la mezcla 1



Estiércol vacuno para la mezcla 1



Preparación de solución barrera



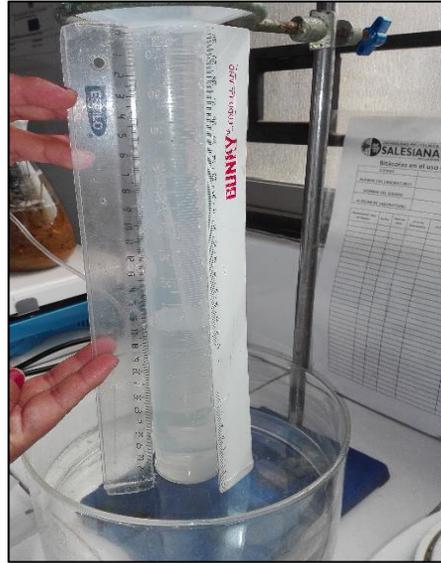
Gasómetro 1 de la mezcla 1



Gasómetro 2 de la mezcla 2



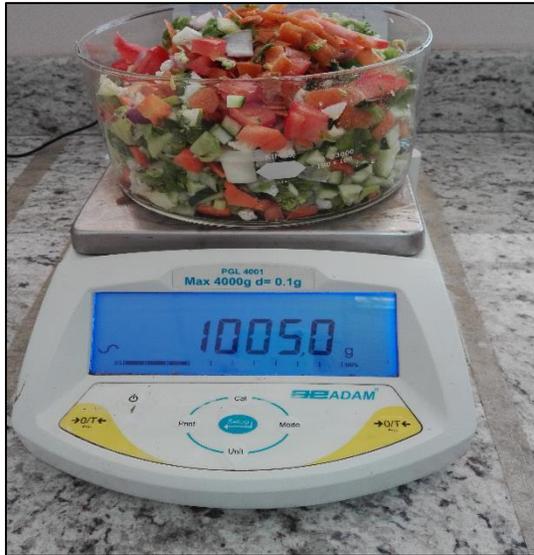
Gasómetro 2 de la mezcla 3



Medición del biogás producido en el gasómetro 2 de la mezcla 3

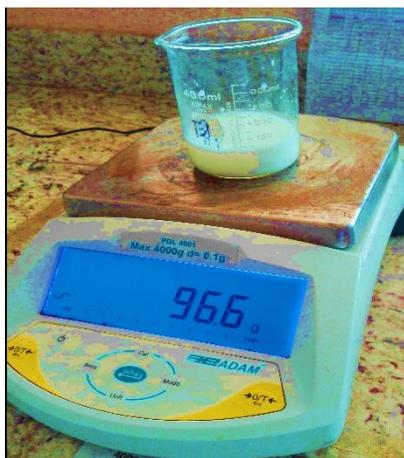
ANEXO 3

Carga arranque y operación en el biodigestor con sistema de calentamiento



Residuos orgánicos hacer colocados en el biorreactor

Estiércol vacuno hacer colocado en el biorreactor



Cantidad de agua residual hacer colocada en el biorreactor

Cara de residuos en el biorreactor



Residuos orgánicos biodegradables en el biorreactor



pH y temperatura una vez cargado los residuos orgánicos en el biorreactor



Operación del biorreactor



Recolección del biogás



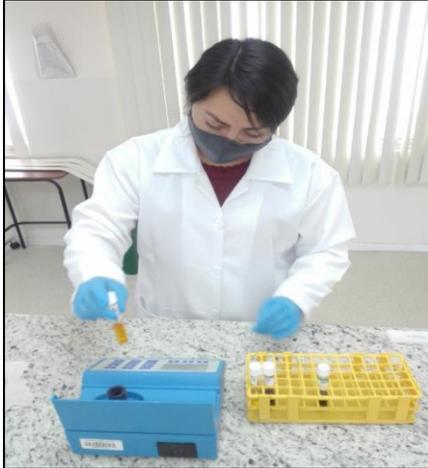
Biogás en funda Tedlar



Recolección del biol

ANEXO 4

Análisis realizados al subproducto biol



Análisis de la DQO de la muestra de biol



Resultado de la DQO en la muestra de biol



Análisis del COT en la muestra de biol



Resultado del COT en la muestra de biol

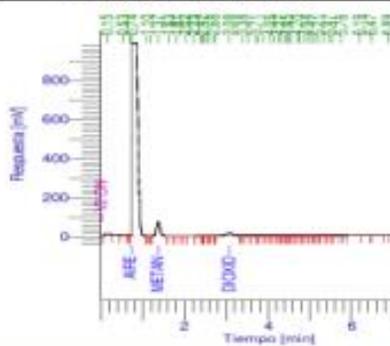
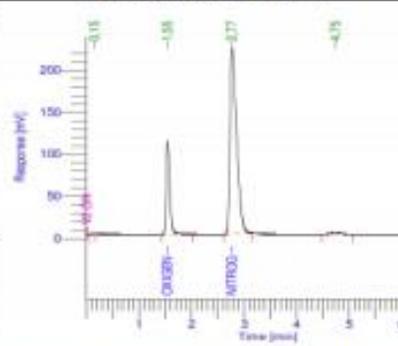
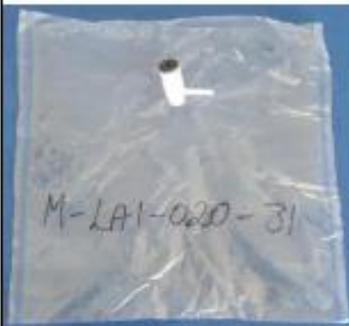
ANEXO 5

Informe de resultados del análisis del producto biogás realizado en el Laboratorio Instrumental de la EPN

	INFORME DE RESULTADOS	Página:	1 de 1	
		FPT-7.8-03-03		

INFORME No. I-LAI-020-31

Orden de Trabajo No. DQ-OT0037-2020

INFORMACIÓN CLIENTE					
Cliente / Empresa:	Evelyn Manobanda		Persona de contacto:	Evelyn Manobanda	
Dirección / Telf.:	Ferroviaria Alta		E-mail:	emanobandat@est.ups.edu.e	
PARÁMETROS DE LA MUESTRA					
Identificación:	M-LAI-020-31		Fecha de muestreo:	20/08/2020	
Tipo de muestra:	Biogas		Plan de muestreo:	No especificado por el cliente	
Tipo de contenedor:	Bolsa Tedlar		Fecha inicio del ensayo:	20/08/2020	
Fecha de recepción:	20/08/2020		Fecha entrega informe:	28/08/2020	
CONDICIONES DE TRABAJO					
Temperatura y %HR ambiente:	19.3 °C	45.8 %	Norma de referencia:	ASTM D 1945-03 (2014)	
Temperatura y Presión de la muestra:	66.80 °F	10.73 psi	Procedimiento interno:	PE-7.2-01-02	
	19.33 °C	73980.8 Pa		PE-7.2-02-02	
RESULTADOS					
COMPOSICIÓN	COMPONENTE		% Peso	% Moles	
	Oxígeno		30.49	26.23	
	Nitrógeno		58.86	57.83	
	Metano		8.52	14.61	
	Dióxido de carbono		2.13	1.33	
	Gas sulfhídrico		<0,0002	<0,0002	
PROPIEDADES	Densidad relativa		0.96		
	Peso molecular promedio [g/mol]		27.52		
	Densidad de la muestra (g/L)		1.16		
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]		5499.85		
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]		4952.04		
	Factor de compresibilidad (z)		1.0000		
CROMATOGRAMA 1		CROMATOGRAMA 2		MUESTRA	
					

Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI