

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES



“OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE ALFALFA Y
EXCRETAS DEL CUY A ESCALA DE LABORATORIO”

AUTOR:

ACERO TUTILLO BRAYAN PAÚL

DIRECTOR

Dr. JUAN CARLOS GARCÍA MONTOYA, PHD.

2022

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios y mis ángeles que me han cuidado durante esta etapa de mi vida.

Un agradecimiento infinito a mi padre Leonidas Acero y mi madre María Tutillo por el apoyo incondicional que han sabido darme a cada momento, y por darme este gran regalo que es la educación, también por instruirme y enseñarme el valor del respeto y de la gratitud.

A mi familia, quienes siempre me han brindado su apoyo y siempre han sabido motivarme para no decaer.

Un agradecimiento especial a mi director de trabajo de titulación, Dr. Juan Carlos García, por compartir sus conocimientos, por el acompañamiento y preocupación con el fin de culminar este trabajo. Así mismo a mis asesores MsC. Jorge Granja y MsC. Santiago Zarate, igualmente por transmitirme y compartirme su conocimiento y experiencia para la realización de este trabajo.

Un agradecimiento al Ing. Jorge Guagalango, quien fue un guía importante en la realización de este trabajo de investigación. Que Dios bendiga a su hogar y a su familia.

A la Universidad Técnica del Norte por darme la oportunidad de formar parte de ella y formarme como un profesional crítico, con valores y principios.

Un agradecimiento profundo a mis compañeros y amigos con quienes e compartido esta etapa, gracias por ese apoyo dentro y fuera de las aulas y por todos esos momentos que se quedan guardados en nuestros corazones.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a Dios, quien me ha brindado el don de la vida. A mis ángeles que desde el cielo me miran y me cuidan.

A mis padres Leonidas Acero y Maria Tutillo, por ser pilares fundamentales en mi vida, quienes, con su amor y cariño, me han brindado su apoyo incondicional y me han dado esa motivación para culminar y terminar mi carrera profesional.

A mis hermanas que siempre me han acompañado en todo este proceso, y sacarme una sonrisa en cada momento.

A mi novia Jessica que ha estado apoyándome desde el inicio de este proceso académico y me ha motivado a terminar esta gran etapa y formarme como un profesional.

A mi hijo Mathias, quien con su sonrisa me demuestra lo hermoso que es la vida y con sus ocurrencias me ha motivado a seguir siempre adelante a pesar de las dificultades del camino.

A mis amigos y compañeros de la carrera quienes me han acompañado desde el comienzo hasta el final de la carrera académica, gracias por su amistad y el apoyo que me han brindado y por la motivación con la frase “tu si puedes”.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN NRO. 001-073-CEAACES-2013-13
Ibarra-Ecuador

**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte de manera digital para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA:	172657226-4	
NOMBRES Y APELLIDOS:	Brayan Paúl Acero Tutillo	
DIRECCIÓN:	Cayambe - Pichincha	
EMAIL:	bpacerot@utn.edu.ec brayanpaula95@gmail.com	
TELEFONO FIJO Y MOVIL:	_____	0997451952

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	“OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE ALFALFA Y EXCRETAS DEL CUY A ESCALA DE LABORATORIO”
AUTOR:	Brayan Paúl Acero Tutillo
FECHA:	02 de agosto del 2022
SOLO PARA TRABAJO DE TITULACIÓN	
PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> PRESGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Energías Renovables
DIRECTOR:	Dr. Juan Carlos García Montoya PhD.

MISIÓN INSTITUCIONAL: Contribuir al desarrollo educativo, científico, tecnológico, socioeconómico y cultural de la región norte del país. Formar profesionales críticos, humanistas y éticos comprometidos con el cambio social.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN NRO. 001-073-CEAACES-2013-13
Ibarra-Ecuador

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 02 días del mes de agosto de 2022

EL AUTOR:

(Firma).....
Nombre: Brayan Paúl Acero Tutillo



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
 UNIVERSIDAD ACREDITADA RESOLUCIÓN Nro. 001-073-CEAACES-2013-13
 Ibarra-Ecuador

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
 AMBIENTALES**

**CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE
 TITULACIÓN**

Ibarra, 02 agosto del 2022

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: **“OBTENCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE RESIDUOS DE ALFALFA Y EXCRETAS DEL CUY A ESCALA DE LABORATORIO”**, de autoría del señor /ita **Brayan Paúl Acero Tutillo** estudiante de la Carrera de **INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES** el tribunal tutor **CERTIFICAMOS** que el/la autor/a o autores ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

TRIBUNAL TUTOR

Dr. Juan Carlos García Montoya
DIRECTOR TRABAJO TITULACIÓN

FIRMA

MSc. Jorge Edwin Granja Ruales
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

MSc. Santiago Zarate Baca
MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TRITULACIÓN

Misión Institucional:

Contribuir al desarrollo educativo, científico, tecnológico, socioeconómico y cultural de la región norte del país. Formar profesionales críticos, humanistas y éticos comprometidos con el cambio social.

Índice de Contenidos

RESUMEN	XIII
ABSTRACT	XIV
Capítulo I.....	1
Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	1
1.2 Definición del Problema	3
1.3 Justificación	3
1.4 Pregunta Directriz	4
1.5 Objetivos.....	4
1.5.1 Objetivo General.....	4
1.5.2 Objetivos Específicos	4
1.6 Hipótesis	5
Capítulo II.....	6
Revisión de Literatura	6
2.1 Energía.....	6
2.2 Residuos Orgánicos	6
2.3 Estiércol	6
2.4 Biocombustibles.....	7
2.5 Proceso de Biodigestión.....	7
2.6 Digestión Anaeróbica	7
2.7 Etapas de Digestión anaeróbica	7
2.7.1 Etapa Hidrolítica.....	7
2.7.2 Etapa Acidogénica.....	7
2.7.3 Etapa Metanogénica	8
2.8 Biodigestor.....	8
2.8.1 Tipos de Biodigestores	8

2.9	Parámetros de Funcionamiento de un Biodigestor	9
2.9.1	Temperatura.....	9
2.9.2	pH	9
2.9.3	Agitación	9
2.10	Características de la Materia Prima.....	9
2.10.1	Solidos Totales	9
2.10.2	Solidos Volátiles.....	10
2.10.3	Humedad.....	10
2.10.4	Relación Carbono Nitrógeno (C/N).....	10
2.11	Biogás.....	10
2.12	Análisis Estadístico	11
2.12.1	Análisis de Varianza ANOVA	11
2.12.2	Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks	11
2.12.3	Test LSD de Fisher	12
2.12.4	Coefficiente de Correlación de Pearson.....	12
2.13	Marco Legal	12
2.13.1	Constitución de la República del Ecuador 2018.....	12
2.13.2	Código Orgánico del Ambiente	12
2.13.3	Objetivos de Desarrollo Sostenible	12
Capítulo III	14
Metodología.....		14
3.1	Ubicación Geográfica	14
3.2	Tamaño de Muestra	15
3.3	Recolección de Residuos del Cuy.....	15
3.4	Pesaje y Caracterización de Residuos.....	16
3.4.1	Composición Biomasa.....	17
3.5	Selección de Muestras	17

3.6	Preparación de Muestras	18
3.7	Método por Secado de Estufa	19
3.8	Preparación de Muestras para el Análisis Elemental.....	20
3.9	Análisis Proximal.....	21
3.10	Construcción de un Biodigestor tipo Batch o Estacionario.....	21
3.10.1	Medida del Biodigestor	21
3.11	Fase de Experimentación	22
3.11.1	Preparación de la Mezcla.....	23
3.11.2	Temperatura.....	23
3.11.3	Monitoreo de Temperatura.	23
3.11.4	Monitoreo de pH.....	23
3.12	Contenido de Sólidos Totales.....	24
3.13	Mezcla Óptima	25
3.14	Relación Agua Sustrato	25
3.15	Medición de Biogás.....	26
3.16	Modelo Estadístico.....	26
3.16.1	Análisis de Varianza ANOVA	26
3.16.2	Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks	26
3.16.3	Test LSD de Fisher	27
3.16.4	Coeficiente de Correlación de Pearson.....	27
3.17	Determinación del Potencial Energético	27
3.17.1	Cantidad de Energía a Obtener a Partir del Biogás	27
3.17.2	Energía Eléctrica Estimada a Obtener a Partir de Biogás	28
Capítulo IV	29
Resultados y Discusión.....		29
4.1	Caracterización del Estiércol de Cuy y sus Residuos Alimenticios	29
4.2	Selección de Muestras para la Experimentación	30

4.3	Curva de Secado	31
4.3.1	Estiércol	31
4.3.2	Rastrojo.....	31
4.4	Porcentaje de Humedad	32
4.5	Análisis Elemental de las Muestras	33
4.5.1	Relación Carbono/Nitrógeno	33
4.6	Análisis Proximal.....	34
4.7	Mezclas	35
4.8	Relación Agua Sustrato	35
4.9	Temperatura	36
4.9.1	Temperatura EXP 1 (30°C)	36
4.9.2	Temperatura EXP 2 (ambiente).....	36
4.10	Monitoreo de pH	37
4.11	Producción de Biogás.....	38
4.12	Análisis Estadístico	39
4.12.1	Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks	40
4.12.2	Análisis de Varianza ANOVA	40
4.12.3	Test LSD Fisher.....	40
4.12.4	Coefficiente de Correlación de Pearson.....	41
4.13	Determinación del Potencial Energético	41
4.13.1	Cantidad de Energía a Obtener a Partir del Biogás	42
4.13.2	Energía Eléctrica Estimada a Obtener a Partir del Biogás	43
Capítulo V	44
	Conclusiones y Recomendaciones	44
5.1	Conclusiones.....	44
5.2	Recomendaciones	45
Referencias	46

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Composición Química del Biogás</i>	11
Tabla 2 <i>Composición de la biomasa de residuos de cuy</i>	29
Tabla 3 <i>Muestras experimentación</i>	30
Tabla 4 <i>Peso promedio de las muestras seleccionadas</i>	32
Tabla 5 <i>Porcentaje humedad del estiércol</i>	32
Tabla 6 <i>Porcentaje humedad del rastrojo</i>	33
Tabla 7 <i>Relación C/N de las muestras</i>	33
Tabla 8 <i>Sólidos volátiles del estiércol y rastrojo del cuy</i>	34
Tabla 9 <i>Relación C/N de las mezclas</i>	35
Tabla 10 <i>Datos ingresados en el software INFOSTAT</i>	39
Tabla 11 <i>Prueba de normalidad Shapiro Wilks</i>	40
Tabla 12 <i>Análisis de varianza de la producción de biogás</i>	40
Tabla 13 <i>Comparación LSD de Fisher</i>	41
Tabla 14 <i>Resultados del coeficiente de correlación de Pearson</i>	41
Tabla 15 <i>Valores para el cálculo del potencial energético</i>	42
Tabla 16 <i>Valores para el cálculo de la energía a obtener</i>	42

Índice de figuras

Figura 1 <i>Mapa de ubicación comunidad Buena Esperanza de Guachalá</i>	14
Figura 2 <i>Recolección residuos del cuy</i>	16
Figura 3 <i>Caracterización de la biomasa</i>	17
Figura 4 <i>Selección de muestras para el envío a laboratorio</i>	18
Figura 5 <i>Pesaje de las muestras</i>	19
Figura 6 <i>Estufa Memmert</i>	20
Figura 7 <i>Construcción del biodigestor</i>	22
Figura 8 <i>Salida de muestra para medida de pH</i>	24
Figura 9 <i>Curva de secado del estiércol</i>	31
Figura 10 <i>Curva de secado rastrojo</i>	32
Figura 11 <i>Temperatura interna de trabajo de cada biodigestor en la EXP 1</i>	36
Figura 12 <i>Temperatura interna de trabajo de cada biodigestor en la EXP 2</i>	37
Figura 13 <i>Lectura de pH EXP 1 y EXP 2</i>	38
Figura 14 <i>Producción acumulada de biogás</i>	39

RESUMEN

Con la escasez de los combustibles fósiles el ser humano ha buscado la forma de obtener nuevos combustibles, que ayuden a cubrir la demanda energética, por ejemplo, el biogás generado a partir de desechos orgánicos. Para la obtención de este biocombustible se realiza una digestión anaeróbica que es un proceso biológico que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, esto parte de materia orgánica, el cual mediante la acción de microorganismos transforma esta materia, en una mezcla de gases denominado biogás constituido principalmente por metano y dióxido de carbono y otros gases en pequeñas cantidades. Gran parte del sector rural se dedica a la crianza de animales de granja, los mismos generan residuos orgánicos como es el estiércol, que es utilizado como abono orgánico o a su vez se lo desecha descomponiéndose al aire libre. Por tal razón la investigación se centró en la producción de biogás utilizando excretas de cuy, utilizando dispositivos a escala laboratorio, se realizó un experimento a temperatura ambiente y otro a una temperatura controlada de 30°C (mesofílica) con el fin de evaluar el rendimiento, esto en un periodo aproximado de 40 días. En la investigación se demuestra una mayor producción de biogás en el experimento con una temperatura mesofílica teniendo un 99% de correlación entre la temperatura y la producción. Dando a entender que la producción de biogás es directamente proporcional a la temperatura.

Palabras clave: digestión anaerobia, biodigestor, temperatura, estiércol, biogás.

ABSTRACT

Faced with the scarcity of fossil fuels, mankind has sought ways to obtain new fuels to help meet energy demand, for example, biogas generated from organic waste. To obtain this biofuel, an anaerobic digestion process is carried out, which is a biological process that takes place in the absence of oxygen. This process starts with organic matter, which through the action of microorganisms transforms this matter into a mixture of gases called biogas, composed mainly of methane and carbon dioxide and other gases in small quantities. A large part of the rural sector is dedicated to raising farm animals, which generate organic waste such as manure, which is used as organic fertilizer or, in turn, is disposed of by decomposition in the open air. For this reason, the research focused on the production of biogas from guinea pig excrement, using laboratory-scale devices. An experiment was carried out at room temperature and another at a controlled temperature of 30°C (mesophilic) to evaluate the yield, over a period of approximately 40 days. The research shows a higher biogas production in the mesophilic temperature experiment, with a 99% correlation between temperature and production. This implies that biogas production is directly proportional to temperature.

Keywords: anaerobic digestion, biodigester, temperature, manure, biogas.

Capítulo I

Introducción

1. Antecedentes

La International Energy Agency (IEA) (2019) afirma que la “energía ha sido parte fundamental para el desarrollo de la sociedad, con una relación directa de la demanda energética versus el aumento de la población”. La generación de energía eléctrica mundial en el 2019 registro un total de 26 908 TWh presentando un aumento del 1.3% con referencia al año 2018, dentro de esta generación destacan los combustibles fósiles con una participación del 63% (Olade, 2021). La energía que la población consume en gran parte se la genera a partir de combustibles fósiles, principalmente el petróleo el cual constituye la base de la economía global y de la civilización, motivo por el que se lo explota de una manera acelerada, y por eso en algún momento este recurso se agotará (Ferrari, 2013). “En el 2019 las reservas comprobadas de petróleo alcanzaron 1 654.22 billones de barriles” (AIHE, 2020). Para el Ecuador en el año 2019 la producción de energía eléctrica fue de 32 283.96 GWh, teniendo un incremento del 10.4% con respecto al año anterior, del cual el 21.89% representa a los combustibles fósiles (ARC, 2020).

La producción promedio a nivel mundial de crudo líquido para el año 2019 fue de 98.99 millones de barriles diarios y el consumo de este fue 98.79 millones de barriles diarios, la demanda de este combustible se debe al crecimiento continuo de varios sectores como carreteras, aviación y residencial, lo que proporciona una base sólida para el crecimiento constante del sector, en el mismo año en el Ecuador la producción de crudo total fue de 194.1 millones de barriles por año, teniendo un aumento de 5.3 millones de barriles al año con respecto al año pasado (AIHE, 2020).

Según el BP Statistical Review of World Energy (2019), “los productos petroquímicos, como el gas licuado de petróleo (GLP) es un combustible energético más usado a nivel mundial teniendo un consumo de un 34%”. Según la WLPGA (2020), “la producción mundial de GLP en 2019 fue de 331 millones de toneladas”. En el mismo año según AIHE (2020), “el Ecuador tuvo una producción y consumo de 1.2 millones de toneladas de GLP, de estos 0.16 millones de toneladas producidos en el país y 1.04 millones importados para suplir la demanda”.

El uso de estos combustibles ha generado diversos problemas, uno de ellos y el más notorio es la emisión de gases los cuales son expulsados a la atmosfera, que se producen por la quema de dichos combustibles y también es el principal causante del cambio climático el cual se da por la concentración de los gases de efecto invernadero, especialmente por el CO₂, estas concentraciones son provocadas por la proliferación del uso de los combustibles fósiles (Andrade et, al, 2017). Según PNUMA (2020), “las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a nivel mundial fueron de 38 giga toneladas en 2019, teniendo un incremento del 2.6%, con respecto al promedio de incremento que desde el 2010 fue de 1.3% anual”. Según la OMS (2018). “cada año se producen unos 7 millones de muertes prematuras debido a la contaminación del aire en espacios abiertos y cerrados”.

En el año 2019 dentro de la generación de energía eléctrica mundial las energías renovables tuvieron una participación del 27%, dentro de este porcentaje se encuentra principalmente la hidroenergía con el 16%, eólica y solar con el 8% y el 3% biomasa y geotermia (Olade, 2021). Dentro de este pequeño porcentaje de participación de la biomasa aproximadamente el 64.5% de la biomasa utilizada a nivel mundial para la generación de energía corresponde a la biomasa tradicional como es la leña, residuos de cosechas y estiércol de animales, por lo general se lo quema en chimeneas o estufas ineficientes para cocinas, para producir calor en viviendas o para obtener iluminación (REN21, 2017). En Ecuador las energías renovables representaron el 78.11% de la producción total de energía eléctrica, repuntando la hidroenergía con el 76.32%, la biomasa con el 1.28, eólica 0.26, biogás 0.13% y fotovoltaica con 0.12% (ARC, 2020).

Con el aprovechamiento de las energías renovables incluyendo la biomasa contribuyen de manera directa a la reducción del uso de combustibles fósiles, a la diversificación de la matriz energética y, sobre todo a la mitigación de los gases de efecto invernadero (ESPOL, 2019). En Ecuador, la principal fuente para la biomasa proviene del banano, arroz, cacao, caña de azúcar, maíz, palma africana, piña, café, palmito y plátano, incluyendo los residuos de tres actividades pecuarias como son; avícola, porcina y vacuna, por tal razón existen importantes avances en el campo de la biomasa como la producción de combustible de segunda generación y la obtención de energía por procesos termoquímicos o biológicos (ESPOL, 2019).

1.2 Definición del Problema

Desde el descubrimiento del petróleo, el hombre avanzó con un paso agigantado en la industrialización, dando así un gran protagonismo a este recurso no renovable, el cual hasta la actualidad es el más explotado y utilizado para la generación de energía, por tal razón los gases que se generan por la combustión de este recurso han sido los responsables de la contaminación del ambiente.

La biomasa fue la fuente energética más importante para la humanidad hasta el inicio de la revolución industrial, cuando quedó relegada a un segundo lugar por el uso masivo de combustibles fósiles (Toledo, 2019). Morocho (2012), afirma que “los animales y sus excretas producen alrededor del 23% del metano de todo el planeta”. El riesgo de enfermedades para la población humana es el consumo de aguas contaminadas por bacterias patógenas presentes en las excretas de los animales como es *Escherichia coli* y también contenidos altos de nitratos los cuales reducen la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre (Pinos et al., 2012).

En el Ecuador en el año 2012, existían un promedio constante de 21 millones de cuyes, que pueden llegar a producir hasta 47 millones de estos animales al año y que son destinados a la venta (Cuzco, 2012). La crianza de cuyes en el Ecuador es común ya que existe una gran demanda de su carne, se estima que el consumo de cuyes asados en el sector de Cayambe fue de 761 330 y cuyes faenados fue de 401 893, con esto se tiene que el consumo de la carne de cuy es alto (Amaguaña, 2007).

Por la alta producción de cuyes en el Ecuador se generan residuos orgánicos como sus excretas y residuos de su alimento en los denominados galpones o jaulas, con la alta generación de estos residuos se podrían generar enfermedades esto debido a que el uso sin tratar de materiales fecales de origen animal y humano constituye un riesgo de contaminación de los productos y un peligro en caso de que los productos se consuman frescos, esto se debe a que comúnmente el estiércol de cuy se lo utiliza como abono orgánico en diferentes cultivos (Ramírez, 2014).

1.3 Justificación

El Ecuador posee un 78.11% de energía renovable, esto se debe al abundante recurso hídrico presente en el país, ya que la energía hidráulica es la que sobresale con el 76.32%, por tal razón en el país ha priorizado la generación de electricidad a partir de

fuentes de energía renovable con el objetivo de tener una matriz energética limpia y así dejar de lado el consumo de combustibles fósiles (ARC, 2020).

En Ecuador también existe el Plan Nacional de Eficiencia Energética el cual se lo realiza con el apoyo de Banco Interamericano de Desarrollo (BID) a través de la cooperación técnica del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. El Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035 (PLANEE) fomenta la sustitución progresiva de combustibles y fuentes de energía que tienen un alto impacto ambiental por otros con bajo contenido o sin carbono, incluyendo fuentes de energía renovable.

En la mayoría de las zonas rurales de países en vías de desarrollo, alguna de las necesidades energéticas se satisface utilizando la biomasa, como actividad principal es la combustión directa de esta, como ramas de árboles, hojas secas, etc. entre esta biomasa se encuentra el estiércol de animales de granja (Robles & Omar, 2018).

El estiércol de cuy se identifica la facilidad de recolección en comparación del estiércol de otros animales, puesto que normalmente se los encuentra en galpones, la cantidad de estiércol producido por un cuy es de 2 a 3 kg por cada 100 kg de peso vivo (Pantoja, 2014). El estiércol de cuy es uno de los estiércoles de mejor calidad, junto con el de caballo, por sus propiedades físicas y químicas, por lo que usualmente es usado por los agricultores como abono directo (Lasallista, 2010).

1.4 Pregunta Directriz

¿Es posible obtener biogás a partir del residuo alimenticio y excremento del cuy?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Evaluar la producción de biogás a partir del residuo de tallos de alfalfa y el excremento del cuy.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar los parámetros físicos y químicos del residuo de alfalfa y las excretas del cuy.
- Construir tres biodigestores de régimen estacionario a escala laboratorio para la producción de biogás.
- Evaluar el rendimiento de biogás a partir de mezclas óptimas de sustrato.

1.6 Hipótesis

Los residuos alimenticios y las excretas del cuy tienen rendimientos eficientes para la producción de biogás.

Capítulo II

Revisión de Literatura

En este capítulo se presenta la información obtenida para el avance de la investigación, se toma como referencias investigaciones, artículos científicos y estudios que centrados en la producción de biocombustibles con residuos orgánicos y la digestión anaeróbica.

2.1 Energía

La energía es todo aquello que puede originar o dar existencia a un trabajo, también se puede decir que es la capacidad que posee la materia para producir calor, trabajo en forma de movimiento, luz, crecimiento biológico, etc, y por materia se entiende cualquier cuerpo sólido, líquido y gaseoso existente (Argentina S. d., 2003). Las fuentes de energía son elaboraciones naturales más o menos complejas de las que el hombre puede extraer energía para realizar un determinado trabajo u obtener alguna utilidad, y aunque existen innumerables fuentes de energía, en última instancia, toda la energía procede del Sol salvo la energía geotérmica de nuestro planeta Tierra y la energía nuclear de fisión (Colino & Caro, 2010).

2.2 Residuos Orgánicos

Los residuos orgánicos son aquellos que se descomponen naturalmente, tienen la característica de poder desintegrarse o degradarse rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica (Sánchez & Vargas, 2015). Los residuos orgánicos son una fuente de vida nueva para los suelos, una fuente de energía y de renovación por tal razón en los últimos años se puede observar un cambio fundamental en el pensamiento con respecto a los residuos y desechos esto más que una carga, los residuos orgánicos son un recurso (FAO, 1980).

2.3 Estiércol

El estiércol son restos del metabolismo de los alimentos consumidos por los animales, los organismos toman los nutrientes necesarios para su mantenimiento, producción y reproducción y lo demás son elementos que la digestión no utiliza, por lo tanto, son expulsados como heces y orina (Sánchez & Vargas, 2015). Borrero (2001) afirma que “el estiércol es el excremento de animales que resultan como desechos del proceso de digestión de los alimentos que consumen, generalmente entre el 60% y 80% de lo que consume el animal lo elimina como estiércol”.

2.4 Biocombustibles

Los biocombustibles son recursos energéticos que son procesados por el ser humano a partir de materia producidas recientemente por seres vivos, que se denominan “biomasa”, estos pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos y su finalidad es liberar la energía contenida en sus componentes químicos mediante una reacción de combustión, existen diferentes tipos de biocombustibles, por lo que se los clasifica por generaciones basado en el tipo de materia prima y a la tecnología usada para producirla (Álvarez, 2009).

2.5 Proceso de Biodigestión

Los procesos de biodigestión se dan con la correcta separación de residuos, esto es fundamental para su proceso y así obtener su poder calorífico y usarlos para la generación de energía (FAO, 2011). El proceso consiste en un proceso biológico que es desarrollado por microorganismos anaerobios que trabajan en ausencia de oxígeno, transformando la materia orgánica en biogás (Instituto Tecnológico Universitario de Crespo, 2013).

2.6 Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases principalmente metano y dióxido de carbono, conocida como biogás y a una suspensión acuosa o lodo que contiene los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica (Acosta & Obaya, 2005).

2.7 Etapas de Digestión anaeróbica

2.7.1 Etapa Hidrolítica

En esta primera etapa se degradan los compuestos orgánicos complejos como lípidos, proteínas hidratos de carbono y compuestos inorgánicos, estos son despolimerizados por la acción de enzimas hidrolíticas en moléculas solubles y fácilmente degradables como ácidos grasos, aminoácidos, monosacáridos y compuestos inorgánicos (Gonzales, 2014).

2.7.2 Etapa Acidogénica

Los monómeros producidos en la fase hidrolítica son absorbidos por diferentes bacterias facultativas y obligatorias se degradan en ácidos orgánicos de cadena corta como ácido butírico, propiónico, acético, hidrogeno y dióxido de carbono, durante esta fase los azúcares simples, ácidos grasos y aminoácidos son convertidos en ácidos orgánicos y alcoholes (Parra, 2015).

2.7.3 *Etapa Metanogénica*

Los microorganismos metanogénicos tienen dos vías metabólicas diferentes, una es la vía acetoclastica la cual transforma el ácido acético en CH₄ y CO₂, y la vía hidrogenotrófica, que a partir del H₂ y el CO₂ genera CH₄ (Casanovas et al., 2019).

2.8 Biodigestor

Un biodigestor es una herramienta alternativa que sirve para aprovechar diferentes desechos madereros, sólidos orgánicos, animales para poderlos convertir en gas metano y usarlos en diferentes formas de producción de energía, esta tecnología varía dependiendo de la cantidad de desechos que se quiera transformar (Elizondo, 2005). Los biodigestores varían de acuerdo con su complejidad y utilización, van desde los más sencillos como los digestores discontinuos o de cargas por lotes y los más complejos se caracterizan por tener dispositivos que permiten aumentar la carga de residuos orgánicos, control de temperatura y agitación (FAO, 2011).

2.8.1 *Tipos de Biodigestores*

Continuos: un biodigestor de flujo continuo es aquel que tiene un afluente y un efluente continuo, en este se tiene un intercambio de masa a lo largo del tiempo de operación, generalmente se adiciona materia prima diariamente, y ese mismo volumen de lodos es removido del digestor, así manteniendo un volumen del digestor constante (Chiriboga, 2010).

Semi Continuos: son utilizados principalmente en zonas rurales, donde los desechos son generados a diario o la materia prima se la puede encontrar fácilmente, por tal razón la carga y descarga del biodigestor es cada día o cada dos días, es decir periodos cortos de tiempo, también dependerá del volumen y tiempo de retención del biodigestor, los diseños más conocidos son el tipo Chino y el tipo Hindú (Haro, 2017).

Discontinuos o Régimen Estacionario: en este tipo el ingreso de la materia prima se lo hace una sola vez, después se lo debe sellar herméticamente para que estos desechos orgánicos o excrementos puedan descomponerse en un tiempo determinado (Tupiza & Velasquez, 2013).

2.9 Parámetros de Funcionamiento de un Biodigestor

Para que exista un proceso de digestión anaerobia eficiente se debe cumplir con diferentes parámetros importantes de funcionamiento como son la humedad, temperatura y pH.

2.9.1 Temperatura

La temperatura es crucial ya que este asegura la eficiencia del proceso de degradación de la materia orgánica. Las bacterias metanogénicas que se encuentran en el proceso de descomposición presentan diferentes velocidades de degradación de la biomasa en función de la temperatura (Vivanco et al., 2006).

2.9.2 pH

El pH de un sustrato para que el proceso de digestión se desarrolle de una forma satisfactoria debe encontrarse cerca de la neutralidad, si este valor cae por debajo de 6 o sube por encima de 8.3 puede presentar problemas graves como la reducción de la producción o hasta detenerse el proceso (Campos, 2001).

2.9.3 Agitación

Este parámetro es muy importante para la producción de biogás, para una buena digestión debe haber un buen contacto entre los microorganismos y la biomasa por lo que se debe agitar a menudo la materia del digestor, esta agitación se la realiza con el objetivo de mezclar la población bacteriana con la materia, remover y distribuir los metabolitos que producen bacterias metanogénicas, evitar la formación de natas y costras que obstruyen la salida del biogás y evitar espacios muertos sin actividad biológica manteniendo uniforme la densidad de bacterias (Tupiza & Velasquez, 2013).

2.10 Características de la Materia Prima

La materia prima, biomasa o sustrato que va a entrar en el digestor para empezar con el proceso de digestión anaerobia debe cumplir con algunas características para mejorar el rendimiento de este proceso.

2.10.1 Sólidos Totales

Los sólidos totales representan la fracción sólida que resulta de la diferencia del peso de la muestra original y la humedad (Martín, 2016).

2.10.2 Sólidos Volátiles

Este representa una fracción de los sólidos totales, el cual se degrada para producir biogás durante el proceso de digestión anaerobia, este parámetro representa el contenido real del material orgánico degradable presente en la biomasa representada en porcentaje (%) o en mg/L (Fernández, 2017).

2.10.3 Humedad

La humedad de la biomasa tiene un papel importante para el crecimiento celular, la biomasa que se vaya a tratar para la DA debe cumplir de por lo menos 90% de humedad, para la biomasa que no cumpla con esta especificación, es necesaria la adición de agua para así alcanzar el % de humedad requerido (Duran et al., 2018).

2.10.4 Relación Carbono Nitrógeno (C/N)

El carbono y el nitrógeno son las fuentes principales de alimentación para las bacterias metanogénicas, el carbono es la fuente de energías y el nitrógeno contribuye a la formación de nuevas células, si la relación C:N es alta, el nitrógeno será consumido de una manera rápida por las bacterias metanogénicas para formar proteínas y no reaccionara con el material restante, por lo que la producción de biogás será lenta, y si la relación C:N es baja se produce amoníaco, el cual es toxico e inhibe el proceso (Fernández, 2017).

2.11 Biogás

El Biogás es una mezcla de gases que se producen como un producto resultado de procesos fisicoquímicos, que tienen lugar en la descomposición de material orgánico que presente materia microbiana (Aguilar Virgen, Taboada González, & Ojeda Benítez, 2011). En la composición química del gas el componente más abundante es el metano como se muestra en la tabla 1 (Cepero et al., 2012).

Tabla 1.*Composición Química del Biogás*

Componente	Fórmula	Porcentaje %
Metano	CH ₄	40-70
Dióxido de Carbono	CO ₂	30-60
Hidrógeno	H ₂	0.10
Nitrógeno	N ₂	0.50
Monóxido de Carbono	CO	0.10
Oxígeno	O ₂	0.10
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	0.10

Nota: Composición química del Biogás. (Cepero et al., 2012)

2.12 Análisis Estadístico

Es el análisis que emplea técnicas estadísticas que ayuda a la interpretación de datos, esto con el fin de ayudar para la toma de decisiones o para la explicación de condicionantes que determinan la ocurrencia de algún fenómeno (e8DSoluciones, 2012).

2.12.1 Análisis de Varianza ANOVA

El ANOVA es una herramienta básica para el estudio del efecto de uno o más factores sobre la media de una variable, es una prueba estadística que se lo emplea cuando se desea comparar las medias de dos o más grupos, este método parte de la hipótesis nula la cual dice que la media de la variable estudiada es similar en los diferentes grupos, de lo contrario la hipótesis alternativa dice que las medias difieren de forma significativa (Amat, 2016).

2.12.2 Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks

La prueba de normalidad de Shapiro Wilks se la utiliza para verificar si existe una distribución normal de la variable, esta prueba es empleada cuando el número de datos es menor o igual a 50 (Molina et al., 2020). Así mismo esta prueba plantea las dos hipótesis, la hipótesis nula (H₀) la cual si el valor de p es mayor a 0.05 proviene de una distribución normal y en el caso de que el valor de p sea menor del nivel de significancia se rechaza

la hipótesis nula y dando paso a aceptar la hipótesis alternativa (H_i) no proviene de una distribución normal (Gaona, 2019).

2.12.3 Test LSD de Fisher

Este test es una herramienta estadística de comparaciones múltiples, el cual permite comparar las medias de los t niveles de un factor después que se ha rechazado la hipótesis nula la cual indica una igualdad de medias mediante la técnica ANOVA (Pérez, 2013)

2.12.4 Coeficiente de Correlación de Pearson

Este coeficiente ayuda a medir la fuerza o el grado de asociación existente entre dos variables cuantitativas que poseen una distribución normal, cuando $p=+$ la relación es directa entre las variables, si $p=-$ la relación es inversa y si $p=0$ son independientes (Restrepo & González, 2007).

2.13 Marco Legal

El marco legal de la presente investigación se basa en las normativas vigentes que establece leyes aplicables para el manejo y aprovechamiento de los recursos energéticos renovables, y así mismo para la producción y transmisión de energía obtenida por estos recursos. Con esto se toma en cuenta la siguiente estructura legal.

2.13.1 Constitución de la República del Ecuador 2018

La Constitución de la República del Ecuador en sus artículos 15 y 413 promueve el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto, además promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.

2.13.2 Código Orgánico del Ambiente

El Código Orgánico del Ambiente en su artículo 5, numeral 8 contempla el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, como lo son las energías renovables y de bajo impacto ambiental

2.13.3 Objetivos de Desarrollo Sostenible

Dentro de los objetivos de desarrollo sostenible se encuentra el objetivo 7 energía Asequible y no Contaminante el cual explica que es necesario invertir en fuentes de

energía limpias y mejorar la tecnología para contar con energía limpia en los países en desarrollo.

Capítulo III

Metodología

En este capítulo se detalla los procesos que se llevaron a cabo para el cumplimiento de los objetivos planteados, también el uso de materiales y que equipos que se utilizarán durante la investigación.

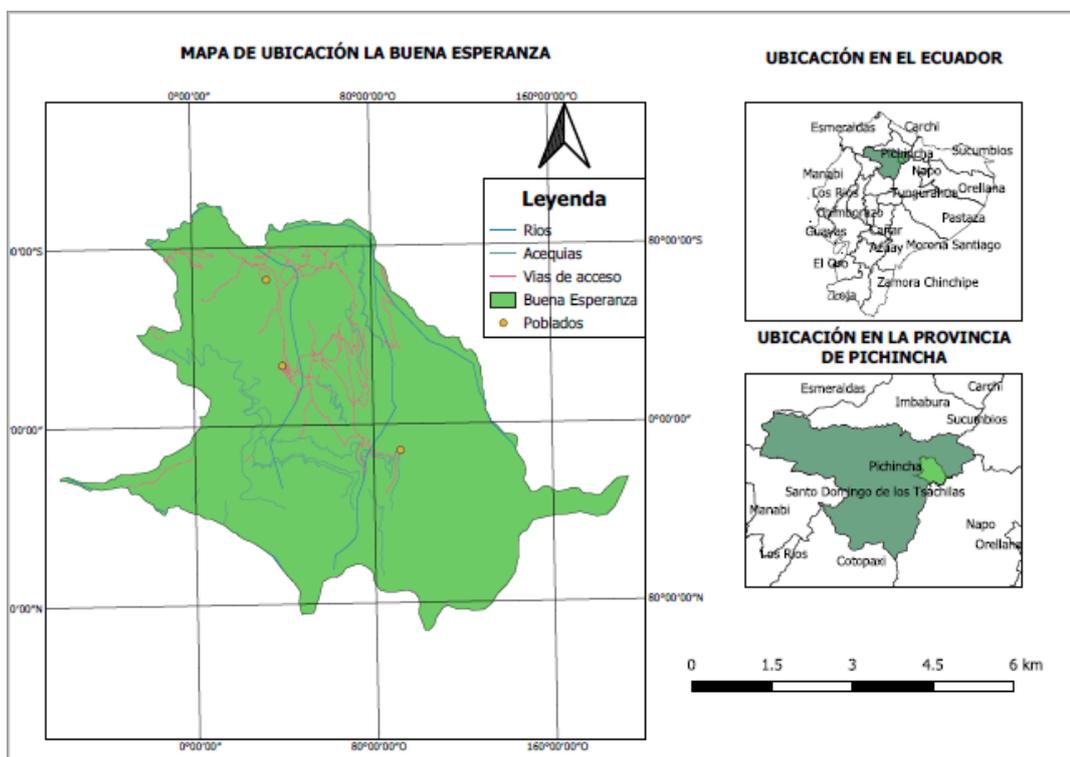
3.1 Ubicación Geográfica

La recolección de las muestras para realizar el estudio de parámetros físicoquímicos de los residuos generados por el cuy se lo realizo en la comunidad de la Buena Esperanza de Guachala.

La comunidad de la Buena Esperanza de Guachalá, se encuentra ubicada en la provincia de Pichincha, cantón Cayambe, formando parte de las comunidades rurales de la parroquia de Cangahua; la comunidad tiene como coordenadas geográficas $0^{\circ}02'25''$ Sur y $78^{\circ}10'15''$ Oeste, limita al norte con las empresas florícolas Fiorentina Flowers y Terrafrut, al oeste con la hacienda Guachalá y la comuna San Antonio de Guachalá, al sur con la comunidad de San Pedro de Cangahua y al este con la comunidad de Pitaná.

Figura 1

Mapa de ubicación comunidad Buena Esperanza de Guachalá



3.2 Tamaño de Muestra

El tamaño de muestra para la investigación ayuda a saber el número de individuos o cosas son necesarios para estimar un parámetro determinado con el grado de confianza deseado, o el número necesario para poder detectar alguna diferencia entre los grupos de estudio (García et al., 2013). En una investigación de campo el error admisible es del 8% y un nivel de confianza del 90%, en la ecuación (1), (Cabrera y Jaramillo, 1995). En la fase de campo existe una probabilidad alta en el acceso a la toma de muestras por lo que se valora con 99% a la probabilidad de éxito (p) y un 1% de probabilidad de fracaso (Guagalango & Vásquez, 2021).

$$n = \frac{p*q*Z^2}{e^2} \quad (1)$$

Donde

n: número de muestras

p*q: varianza

Z=nivel de confianza deseado

e=límite de error muestral

3.3 Recolección de Residuos del Cuy

La recolección de los residuos del cuy es una tarea fácil en comparación a la generada por otros animales, es se debe a que la crianza de estos animales se lo realiza en galpones donde se acumulan estos residuos o también caen al piso y al momento de su recolección se los deposita en sacos de yute utilizando distintas herramientas como son una pala, rastrillo y escoba (Cordero, 2010).

La recolección del estiércol y de los residuos de alimento del cuy se lo realizó con el uso de una pala, un rastrillo y una escoba, y posterior se lo deposito en un costal de yute, este proceso se lo realizo una vez al día por el periodo de 30 días.

Figura 2*Recolección residuos del cuy*

Nota: Se muestra la recolección y el almacenamiento de los residuos del cuy.

3.4 Pesaje y Caracterización de Residuos

El pesaje total de los residuos generados se llevó a cabo en una balanza analógica de marca soyoda con una capacidad de 20 kg y con una precisión de 0.05 kg.

La caracterización de residuos es la actividad la cual ayuda a determinar la composición de un residuo en diferentes fracciones (Ecoembes, 2016). Teniendo en cuenta esto y que los residuos del cuy son materia fresca, esta se la puede separar manualmente para conocer su composición física como es el mismo estiércol, residuos de alimento generalmente alfalfa y otras impurezas (Carhuancho, 2012).

Para proceso de caracterización de las muestras recogidas se utilizó un mantel de 1 m², en donde se colocó toda la biomasa y se procedió a la separación del estiércol, el rastrojo y otras impurezas presentes en las muestras. Es recomendable el uso de guantes y mascarilla para no contraer alguna infección o alguna enfermedad respiratoria.

Figura 3

Caracterización de biomasa



Nota: Se muestra el peso húmedo de la biomasa, lista para su caracterización y finalmente separado en diferentes estratos como son: estiércol, residuos de alfalfa y/o pasto y otras impurezas.

3.4.1 Composición Biomasa.

Una vez realizada la caracterización de la biomasa, se vuelve a pesar cada uno de los sustratos, para así conocer el porcentaje de participación que tiene cada uno de estos en los residuos del cuy.

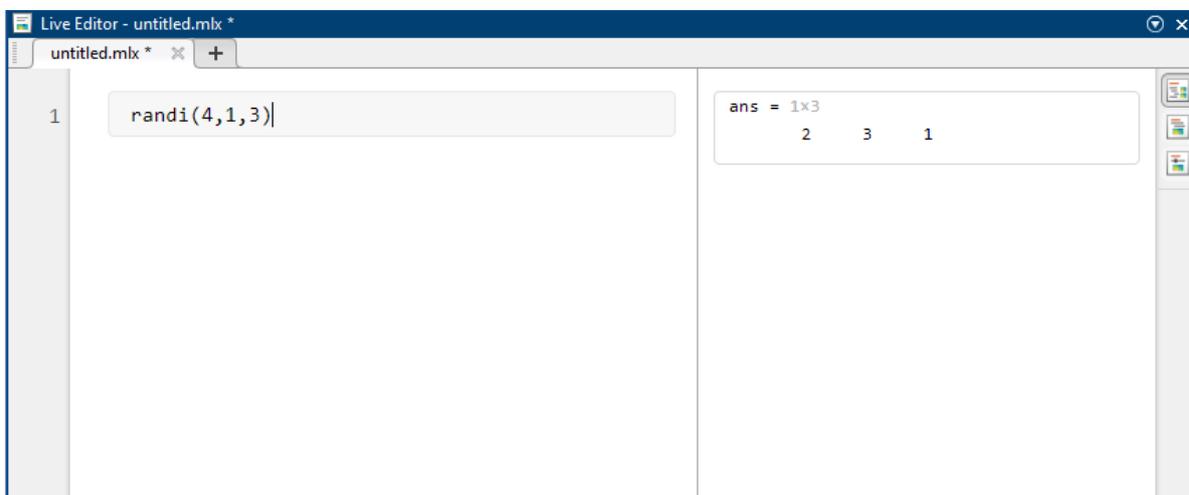
3.5 Selección de Muestras

La selección de las muestras se las hizo utilizando el método estadístico conocido como aleatorio simple como lo afirma Otzen & Manterola (2017) que “el muestreo aleatorio simple garantiza a cada individuo, animal o cosa que compone la población tiene la misma oportunidad de ser incluidos”, así mismo Espinoza (2016) afirma que “para este proceso se puede utilizar software que generen números aleatorios”.

Para esta selección de muestras se utilizó el software Matlab el cual ayuda a la generación de números aleatorios y así seleccionar las muestras que serán tratadas en el laboratorio para la obtención de los parámetros químicos de la biomasa residual del cuy.

Figura 4

Selección de muestras para el envío a laboratorio



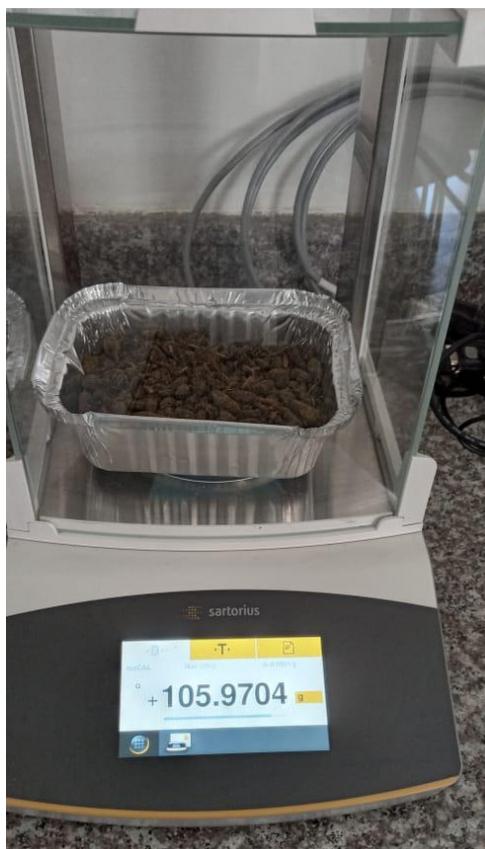
Nota: Panel de inicio del software MatLab

3.6 Preparación de Muestras

Se trabajo con una proporción de 100 g de cada una de las muestras, para la preparación de cada una se realizó el secado y triturado. Con el fin de obtener el porcentaje de humedad, solidos totales y para su posterior análisis elemental y proximal.

Para el proceso de pesaje de la muestra se utilizó una báscula de marca sartorius con una precisión de 0.0001 g.

Para empezar, se pesó el recipiente vacío, después colocar la cantidad de muestra necesaria y por último restar el peso del recipiente para obtener el peso deseado.

Figura 5*Pesaje de las muestras*

Nota: Pesaje de muestras balanza marca sartorius, precisión de 0.0001 g

3.7 Método por Secado de Estufa

El método llamado secado por estufa es aquel que determina el porcentaje de la humedad con ayuda de la ecuación (2), esta se basa en la pérdida de peso que sufre la muestra cuando se somete a las condiciones de tiempo y temperatura establecidas, considerando que dicha pérdida se origina por la eliminación de agua (NMX-AA-16-1984).

$$H = \frac{G - G_1}{G} * 100 \quad (2)$$

Donde

H: humedad en %

G: peso de la muestra húmeda en g

G1: peso de la muestra seca en g

Nota: tener en cuenta que para obtener G y G1 se debe restar el peso del recipiente.

Para el proceso de secado y la determinación del porcentaje de humedad de las muestras se tomó como guía a la norma mexicana (NMX-AA-16-1984) la cual indica, programar la estufa a 105 °C, introducir las muestras y en periodos de 60 minutos pesar estas muestras, este proceso se repitió hasta conseguir un peso constante, se lo considera cuando entre dos pesajes consecutivos la diferencia es menor al 0.01%.

Figura 6

Estufa Memmert



3.8 Preparación de Muestras para el Análisis Elemental

El análisis elemental CHNSO, también conocido como análisis elemental orgánico o microanálisis elemental, determina las cantidades de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y oxígeno (O) presentes en una muestra, es una técnica fiable y rentable usada para evaluar la pureza y la composición química de los compuestos (Toledo, 2016).

La preparación de las muestras se las hizo de acuerdo con los requerimientos del laboratorio de la Universidad Central del Ecuador, para lo cual a la biomasa seca se la

trituró y tamizó, utilizando una trituradora de marca FRITCH y para su tamizado se lo hizo con una malla de 0.50 mm, todas las muestras trituradas y tamizadas se las colocaron en bolsas ziploc con su respectivo código para posterior enviarlas al laboratorio.

3.9 Análisis Proximal

Estos análisis nos indicarán el contenido de humedad, sólidos volátiles, cenizas y carbón fijo presentes en la biomasa a trabajar (FAO, 1993).

Para la realización del análisis proximal se aplicó el mismo proceso descrito en la preparación de muestras para el análisis elemental.

3.10 Construcción de un Biodigestor tipo Batch o Estacionario

Un biodigestor tipo Batch es un recipiente o tanque cerrado herméticamente el cual se carga con residuos orgánicos una sola vez en forma total y la descarga se efectúa una vez que ha dejado de producir biogás (ITDG, 2003)

Para la experimentación de se construyó 3 biodigestores tipo Batch a escala laboratorio, para esto se utilizó tubos PVC de 6 pulgadas de diámetro, se colocó 2 tapones en las dos bocas del tubo. Para la salida del biogás se adaptó un acople roscable para conectar una válvula de seguridad de ½ pulgada y posterior se conectó una unión de la válvula hacia una manguera de ¼ pulgada hacia un matraz Erlenmeyer.

Para el sellado tanto de las tapas como de las adaptaciones se lo realizó con pega tubo PVC ADHEPLAST y con un sellante de construcción blanco denominado SIKAFLEX. Para unir los accesorios roscables como válvulas y uniones se utilizó teflón. Para asegurar las mangueras se utilizó abrazaderas y sellante SIKAFLEX.

3.10.1 Medida del Biodigestor

Para la construcción de los biodigestores se requirió un volumen del recipiente de 6 litros, para lo cual se utilizó la fórmula de volumen de un cilindro, debido a que se desconoce el volumen de capacidad de la tubería PVC.

$$V = \pi * r^2 * h \quad (3)$$

Donde

V=volumen

r=radio interno del cilindro

h=altura del cilindro

En la ecuación (3) despejamos la altura (h), para conocer la altura que será necesaria para cumplir con el volumen del digestor y así proceder a cortarlo.

$$h = \frac{V}{\pi * r^2} \quad (4)$$

Una vez realizado el cálculo se procedió a cortar el tubo a la altura que indica el resultado.

Figura 7

Construcción del biodigestor



3.11 Fase de Experimentación

Para la fase de experimentación se realizaron 2 experimentos cada uno con tres repeticiones, el primer experimento se lo denominó con las siglas EXP 1 y para el segundo experimento se lo denominó como EXP 2. Esto con el fin de registrar la producción de biogás que esta biomasa presenta en los dos experimentos.

3.11.1 Preparación de la Mezcla

Para empezar con el proceso de digestión anaerobia se debe realizar un pretratamiento de la biomasa, esto con la finalidad de que esta ingrese de una manera homogénea, uno de estos tratamientos puede ser la reducción del tamaño y triturado del residuo (IDAE, 2007).

Para el pretratamiento de la biomasa se colocó el estiércol en un recipiente plástico, para el triturado se utilizó un triturador de madera el cual se usó hasta obtener una consistencia blanda. Por otro lado, el rastrojo se redujo de longitud utilizando una tijera hasta que sea posible colocarlo en una licuadora, esta se utilizó para triturar y homogeneizar el rastrojo y el estiércol del cuy juntos.

3.11.2 Temperatura

El EXP 1 tendrá una temperatura constante de 30°C, para lo cual se utilizó 1 contenedor de termo espuma para cada digestor, a los que se les agrego una cantidad suficiente de agua hasta que cubra la mayor parte del equipo. Para mantener una temperatura de 30°C se utilizó un calentador de agua de pecera de 50W de potencia.

Para el EXP 2 se trabajará a temperatura ambiente, para lo cual cada equipo iniciará su proceso de digestión al aire libre sin ningún control de temperatura. Los equipos serán colocados en una caseta de plástico esto para protegerlo del agua en caso de que existan lluvias.

3.11.3 Monitoreo de Temperatura.

El intervalo de temperatura óptimo para el crecimiento de los metanógenos y la producción de biogás es de 25 a 30 °C (García, 2016).

Para el control y monitoreo de la temperatura del sustrato se utilizó un sensor de temperatura modelo Pt 100 de 3 hilos, con un rango de medición de temperatura de -100 a 400 °C, resistente al agua ya que su sensor es de acero inoxidable, esta ira conectado a un Arduino y a su vez se conecta a un computador para obtener datos de la temperatura.

3.11.4 Monitoreo de pH.

Para llevar un proceso óptimo se considera un pH en un rango de 6.8 a 7.5, esto para el crecimiento de los metanógenos, el cual tiene influencia en la actividad enzimática (Cantuña, 2016). Cuando el pH baja se produce que los ácidos grasos volátiles (AGV)

alcancen su estado tóxico, lo que provoca que se genere cantidades limitadas de metano en el biogás, lo que también disminuye su eficiencia energética (Cóndor, 2018).

La medición de pH se lo realizó al inicio de la experimentación al momento que los digestores entraron en marcha y así mismo se realizó al momento que el proceso de digestión finalizó. Para obtener la muestra y verificar el pH se colocó una válvula en la parte inferior del prototipo de biodigestor y a su salida se ubicó un tapón el cual servirá como recipiente donde se depositará la muestra.

Esta medición se lo hizo con un pH metro Oakton PC 450, el cual tiene una precisión de ± 0.01 . La medición se lo hizo de manera directa en el sustrato extraído de la válvula inferior ubicada en el biodigestor.

Figura 8

Salida de muestra para medida de pH



3.12 Contenido de Sólidos Totales

Los sólidos totales se definen como la materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a $103 - 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ (IDEAM, 2007).

Conforme exista un incremento de los sólidos totales en el efluente se ve afectada la movilidad de las bacterias metanogénicas, esto podría presentar un bajo rendimiento

en producción de biogás, el porcentaje de sólidos totales para biodigestores de tipo discontinuo oscila entre 40% a 60% esto asegura un buen funcionamiento del proceso (Cantuña, 2018).

Los sólidos totales se los obtuvo del proceso realizado en el laboratorio Labinam de la Universidad Técnica del Norte, mediante el secado de muestras para su posterior envío al laboratorio de la Universidad Central del Ecuador, para determinar el análisis elemental y proximal de cada una de las muestras.

3.13 Mezcla Óptima

En términos generales, se considera que una relación C/N óptima que debe tener el material “fresco o crudo” que se utilice para iniciar la digestión anaeróbica, es de 30 unidades de carbono por una unidad de nitrógeno, es decir, C/N = 30/1. Por lo tanto, cuando no se tiene un residuo con una relación C/N inicial apropiada, es necesario realizar mezclas de materias en las proporciones adecuadas para obtener la relación C/N óptimas (FAO, 2001).

Para la realización de las mezclas se tomó en cuenta primero la mezcla que se encuentre dentro del rango optimo y posteriormente la mezcla que tenga esta relación (C/N) más alta y así empezar con el proceso de biodigestión.

3.14 Relación Agua Sustrato

La biomasa que se encuentre destinada a la biodigestión debe cumplir con una humedad de por lo menos el 90%, en el caso de que esta biomasa no cumpla con esto es necesario la adición de agua y así alcanzar la humedad requerida (Durán et al., 2018).

Por tal razón se utiliza la ecuación (5) la cual ayuda a obtener la cantidad de agua a adicionar al sustrato.

$$m_{H_2O} = \frac{H_{ob} - H_{act}}{100 - H_{ob}} \quad (5)$$

Donde

m_{H_2O} = agua a adicionar al sustrato (kg de agua) / (kg de sustrato)

H_{ob} = humedad objetiva del sustrato (90%)

H_{act} = humedad del sustrato

3.15 Medición de Biogás

Los métodos de gases producidos en la digestión anaerobia pueden ser volumétricos o manométricos, en este tipo de ensayos es importante que se mida la concentración de estos gases (Cleves et al., 2016).

Para la medición de la producción de biogás se utilizó el método por desplazamiento de fluidos. En el cual se utilizó un matraz de 250 ml el cual contiene 150 ml de hidróxido de sodio al 5% (NaOH) el cual cumple la función de absorber el CO₂ del biogás. Posterior a esto por la presión ejercida por el biogás generado, esta solución se desplazará hacia una pipeta graduada de 25 ml, que ayuda a cuantificar la cantidad de biogás producido.

3.16 Modelo Estadístico

3.16.1 Análisis de Varianza ANOVA

Para el análisis estadístico se llevará a cabo un análisis de varianza ANOVA. Es una fórmula estadística que se utiliza para comparar las varianzas entre las medias de diferentes grupos (TIBCO, 2021).

Para la realización de este análisis se utilizó el software INFOSTAT en el cual se tabuló los datos obtenidos de la producción de biogás de los dos experimentos denominados EXP 1 y EXP 2, cada uno con sus tres repeticiones. Se tomará como variable dependiente la producción de biogás ya que su producción se verá afectada por el cambio de temperatura por lo cual a este parámetro se lo tomará como la variable independiente.

En lo que respecta a la determinación de la hipótesis sería:

- Hipótesis nula (H₀)=las medias de producción de biogás son iguales, la temperatura no influye.
- Hipótesis alternativa (H₁)=las medias son significativamente diferentes, la temperatura influye.

3.16.2 Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks

Esta prueba se emplea para determinar si existe una distribución normal cuando el tamaño de la muestra es menor a 50 datos (Flores & Flores, 2021). Con el uso del software se obtendrá un valor “p” el cual indicara si existe una distribución normal en los datos, siendo así que si este valor “p” es mayor o igual a 0.05 existe normalidad y si este

valor es menor indicara que los datos no siguen una distribución normal (Droppelmann, 2018).

3.16.3 Test LSD de Fisher

Una vez obtenido el resultado de la prueba de normalidad se procede a realizar un Test LSD de Fisher el cual tendrá un nivel de significancia del 5%. Esto ayudara a conocer si existe una diferencia significativa con respecto a sus medias.

3.16.4 Coeficiente de Correlación de Pearson

Para este proceso se ingresó en el software INFOSTAT el promedio de la producción acumulada de biogás de cada uno de los experimentos. Esto nos ayudara a conocer si existe una relación entre la variable dependiente y la variable independiente en el proceso de digestión anaerobia.

3.17 Determinación del Potencial Energético

Para la determinación del potencial energético se lo determino en base a la media de producción de biogás de cada experimento. Para la cantidad de materia orgánica disponible se obtiene en referencia a la media de las muestras recogidas diariamente. Posterior empleando la ecuación (6) se calcula la cantidad de biogás a obtener con el estiércol del cuy y sus residuos alimenticios.

$$B = \frac{B_i * M_{Od}}{M_{Oi}} \quad (6)$$

Donde

B =Biogás producido (m^3)

B_i =producción inicial de biogás (m^3)

M_{Od} =Materia orgánica disponible (t)

M_{Oi} =Materia orgánica inicial

3.17.1 Cantidad de Energía a Obtener a Partir del Biogás

Posterior a la obtención del potencial energético del biogás se procede a calcular la cantidad de energía. El valor energético del biogás está determinado por la concentración de metano y este se ubica entre 20 y 25 MJ/m³ comparado con 33 a 38 MJ/m³ para el gas natural (Gutierrez, 2007). Se utilizo como valor energético un promedio de 22.50 MJ/m³.

Empleando la ecuación (7) se procedió al cálculo de la cantidad de energía que es capaz de generar con el biogás, obtenido a partir del estiércol de cuy y residuos de alimento.

$$E = \frac{B * Ce}{1m^3} \quad (7)$$

Donde:

E =Cantidad de energía (MJ)

B =Biogás producido (m^3)

Ce =contenido energético del biogás (MJ/m^3)

3.17.2 Energía Eléctrica Estimada a Obtener a Partir de Biogás

Para determinar un estimado de la energía eléctrica que se puede generar a partir del biogás se utiliza el factor de conversión de 1MJ es igual a 0.277778 kWh. La ecuación (8) es la ocupada para esta transformación.

$$EE = \frac{E * 0.277778 kWh}{1MJ} \quad (8)$$

Donde

EE =Cantidad de energía eléctrica (kWh)

E =Cantidad de energía (MJ)

Capítulo IV

Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del proyecto de investigación, esto en base a los objetivos específicos propuestos. Se discute desde la recolección de residuos, caracterización, las mezclas para el proceso de digestión anaeróbica, parámetros del proceso, rendimientos de producción de biogás y su potencial energético.

4.1 Caracterización del Estiércol de Cuy y sus Residuos Alimenticios

El tamaño de la muestra se dio utilizando la ecuación (1) del cual dio como resultado 10, dando a entender que ese es el número de muestras a tomar, por ende, se realizara la recolección de esta biomasa en 10 lugares distintos. En la tabla 2 se presenta el promedio de los residuos generados por el cuy de cada uno de los lugares. Se presenta el peso en kg y el porcentaje de cada sustrato presente en la biomasa recogida.

Tabla 2

Composición de la biomasa de residuos de cuy

Muestras	Peso húmedo kg	Estiércol		Rastrojo		Otros	
		kg	%	kg	%	kg	%
1	5.60	4.12	73.51	1.22	21.84	0.26	4.64
2	4.04	2.92	72.29	0.98	24.24	0.14	3.46
3	9.81	6.74	68.69	2.85	29.09	0.22	2.22
4	3.44	2.33	67.61	0.99	28.61	0.13	3.78
5	6.22	4.31	69.39	1.70	27.35	0.20	3.26
6	4.25	3.09	72.59	1.02	23.94	0.15	3.47
7	4.07	2.88	70.82	1.02	25.06	0.17	4.12
8	4.01	2.69	67.10	1.12	27.84	0.20	5.06
9	7.06	4.98	70.44	1.89	26.76	0.20	2.80
10	7.86	5.61	71.45	2.06	26.23	0.18	2.32
Promedio		3.97	70.40	1.48	26.10	0.18	3.51

Nota: se presenta los pesos promedios del peso húmedo de la biomasa generada, seguido de la cantidad de materia presente en dicha biomasa en peso (kg) y porcentaje (%).

El peso promedio total de las muestras es de 3.97 kg para el estiércol representando el 70.40%, el rastrojo un peso promedio de 1.48 kg representando un 26.10% y otras impurezas tienen un peso promedio de 0.18 kg teniendo un 3.51% de participación.

El peso del estiércol generado se aproxima a la expuesta por Pantoja (2014) el cual afirma que “por cada 100 kg de peso vivo, se genera entre 2.50 a 3 kg de estiércol”.

4.2 Selección de Muestras para la Experimentación

Las muestras seleccionadas para el envío al laboratorio y realizar los respectivos análisis dio como resultado las muestras número 2, 6 y 7, las cuales se detallan en la tabla 3.

Tabla 3

Muestras experimentación

Muestras	Peso húmedo kg	Estiércol		Rastrojo		Otros	
		kg	%	kg	%	kg	%
2	4.04	2.92	72.27	0.98	24.25	0.14	3.46
6	4.25	3.09	72.70	1.02	23.05	0.15	3.52
7	4.07	2.88	70.76	1.02	24.07	0.17	4.17
Promedio	4.12	2.96	71.91	1.01	23.80	0.15	3.71

Nota: se presentan las muestras seleccionadas para la experimentación

En el cual se aprecia que el estiércol tiene un peso promedio de 2.96 kg, el rastrojo un peso de 1.01 kg y otras impurezas un peso de 0.15, teniendo un porcentaje de presencia en la biomasa residual de 71.91%, 23.80% y 3.71% respectivamente

Con las muestras seleccionadas se procedió a la experimentación en el laboratorio LABINAM de la Universidad Técnica del Norte como es el secado y triturado de la materia orgánica para el envío de las muestras al laboratorio y obtener el análisis elemental y el análisis proximal de la biomasa.

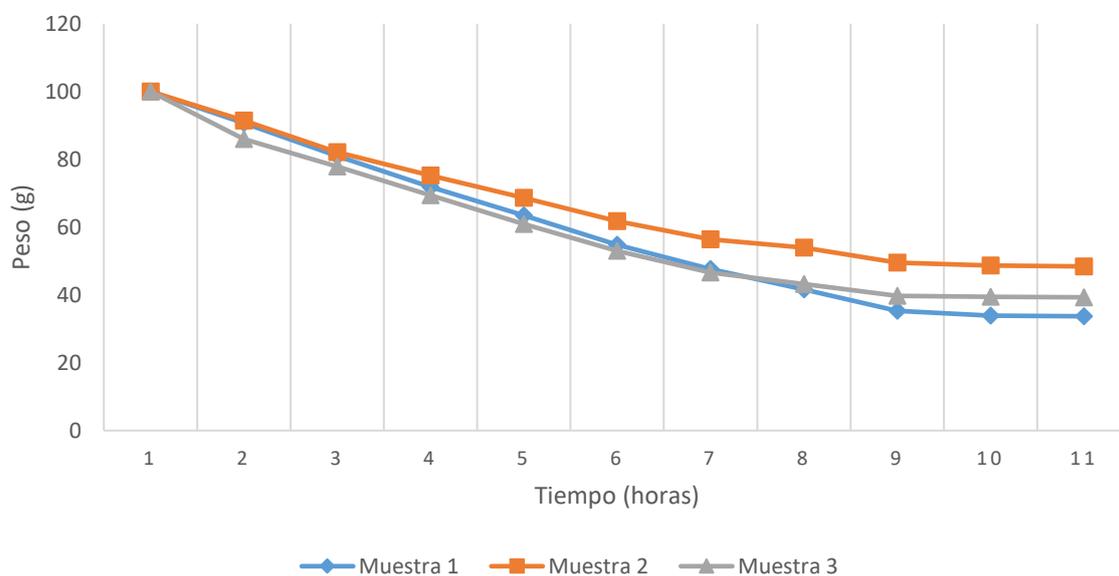
4.3 Curva de Secado

4.3.1 *Estiércol*

La curva de secado de las muestras del estiércol del cuy se lo presenta en la figura 9, en donde se observa la disminución del peso conforme se seca a una temperatura constante de 105°C en periodos de 60 minutos, en donde el peso inicial es de 100 g y este se reduce aproximadamente de 66.30 g a 51.60 g llegando con un peso seco final de 33.70 g.

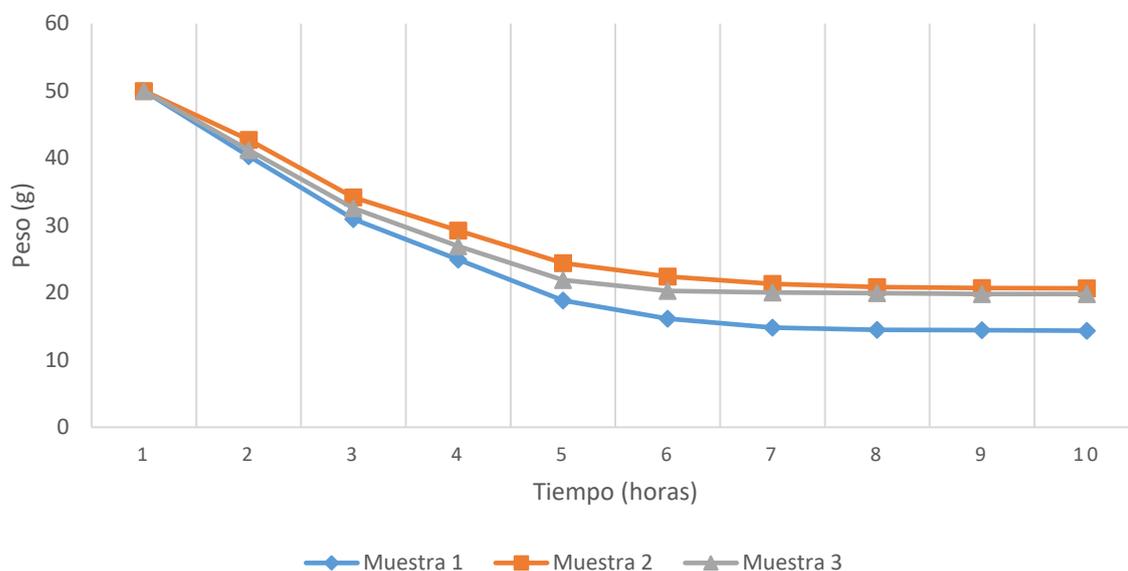
Figura 9

Curva de secado del estiércol



4.3.2 *Rastrojo*

En la figura 10 se presenta el secado del rastrojo de cuy la cual fue sometida a una temperatura constante de 105 °C con un monitoreo de 60 min, en donde el peso inicial fue de 50 g y este se redujo aproximadamente 35.60 g a 29.30 g llegando a un peso seco final de 14.40 g.

Figura 10*Curva de secado rastrojo*

4.4 Porcentaje de Humedad

En la tabla 4 se muestra el porcentaje de humedad del estiércol, teniendo como resultado una media del 59.52 % de humedad presente en dicha biomasa así mismo se obtiene una media del 40.48 % de sólidos totales.

Tabla 4*Porcentaje humedad del estiércol*

Muestra	Humedad	Sólidos totales
	%	%
EM1	66.29	33.71
EM2	51.58	48.42
EM3	60.69	39.31
Promedio	59.52	40.48

En la tabla 5 se muestra el porcentaje de humedad del rastrojo teniendo una media del 63.45 % de humedad y por ende una media del 36.55 % de sólidos totales presentes en la biomasa.

Tabla 5

Porcentaje humedad del rastrojo

Muestra	Humedad	Sólidos totales
	%	%
M1	71.30	28.70
M2	58.68	41.32
M3	60.38	39.62
Promedio	63.45	36.55

4.5 Análisis Elemental de las Muestras

4.5.1 *Relación Carbono/Nitrógeno*

En la tabla 6 se muestra el resultado del análisis elemental de cada una de las muestras enviadas al laboratorio en donde EM representa el estiércol y M representa el rastrojo y así obtener la relación carbono nitrógeno de cada una de las muestras, estos resultados se los representa en porcentajes.

Tabla 6

Relación C/N de las muestras

Muestra	N	C	Relación C/N
EM1	1.63	42.42	26:1
EM2	2.04	40.29	19:1
EM3	1.73	40.52	23:1
M1	1.90	38.07	20:1
M2	1.92	40.21	20:1
M3	3.14	41.08	13:1

Se puede observar que 2 de las 3 muestras de estiércol se encuentran dentro del valor óptimo con relación C/N, lo mismo ocurre en las muestras del rastrojo dando a entender que esta biomasa si cumple con este parámetro para el proceso de biodigestión. Tay, (2017) presenta resultados similares en lo que respecta a la relación C/N del estiércol de cuy, así mismo dando a entender que este residuo se encuentra dentro del rango óptimo para el proceso de digestión.

La FAO (2011) afirma “que la relación C/N del estiércol del conejo y de las gallinas es de 23:1”, comparado con el promedio entre las tres muestras de estiércol de esta investigación se obtiene una relación C/N de 22:1 el cual se aproxima al valor de la relación C/N del estiércol del conejo y de las gallinas. Por otro lado, se determinó que el estiércol de cuy se encuentra por encima del estiércol porcino, en lo que refiere a este parámetro.

4.6 Análisis Proximal

4.6.1 Cantidad de Sólidos Volátiles

En la tabla 7 se muestra el porcentaje de sólidos volátiles de cada muestra.

Tabla 7

Sólidos volátiles del estiércol y rastrojo del cuy

Muestra	Sólidos Volátiles %
EM1	63.65
EM2	59.03
EM3	59.73
M1	57.62
M2	63.22
M3	62.41

Este parámetro es importante, debido a que este nos indica el contenido de material orgánico presentes en los sólidos totales, este parámetro nos ayuda a conocer la proporción de materia orgánica que tiene el residuo.

Se puede apreciar que el porcentaje de sólidos volátiles presentes tanto el estiércol como el rastrojo son superiores al 50%, estos contienen componentes orgánicos, teóricamente son los que deben ser convertidos a metano en el proceso de biodigestión (FAO, 2011).

4.7 Mezclas

La mezcla se lo realizó según la disponibilidad de la materia la cual fue de 70% de estiércol y 30% de rastrojo de alfalfa, posterior se observará la mezcla más alta y que se encuentre dentro de los parámetros óptimos, en la tabla 8 se expone las diferentes mezclas realizadas y sus respectivas relaciones.

Tabla 8

Relación C/N de las mezclas

N.º de mezcla	Mezcla	Sustrato %	Relación C/N
Mezcla 1	EM1	70	24:1
	M1	30	
Mezcla 2	EM2	70	19:1
	M2	30	
Mezcla 3	EM3	70	20:1
	M3	30	

Como resultado se puede apreciar que la mezcla EM1 Y M1 tienen una relación C/N más alta con respecto a las otras dos mezclas, por consiguiente, se escoge la mezcla 1 para iniciar con el pretratado de la materia e iniciar con el proceso de digestión anaerobia.

4.8 Relación Agua Sustrato

Para la mezcla de sustrato y agua según la ecuación (5) se determinó que por cada kg de sustrato se debe agregar 2.4 litros de agua, por lo que se agregó 1 kg de biomasa la cual se dividió en 0.70 kg de estiércol y 0.30 kg de rastrojo y se adiciono 2.40 litros de agua.

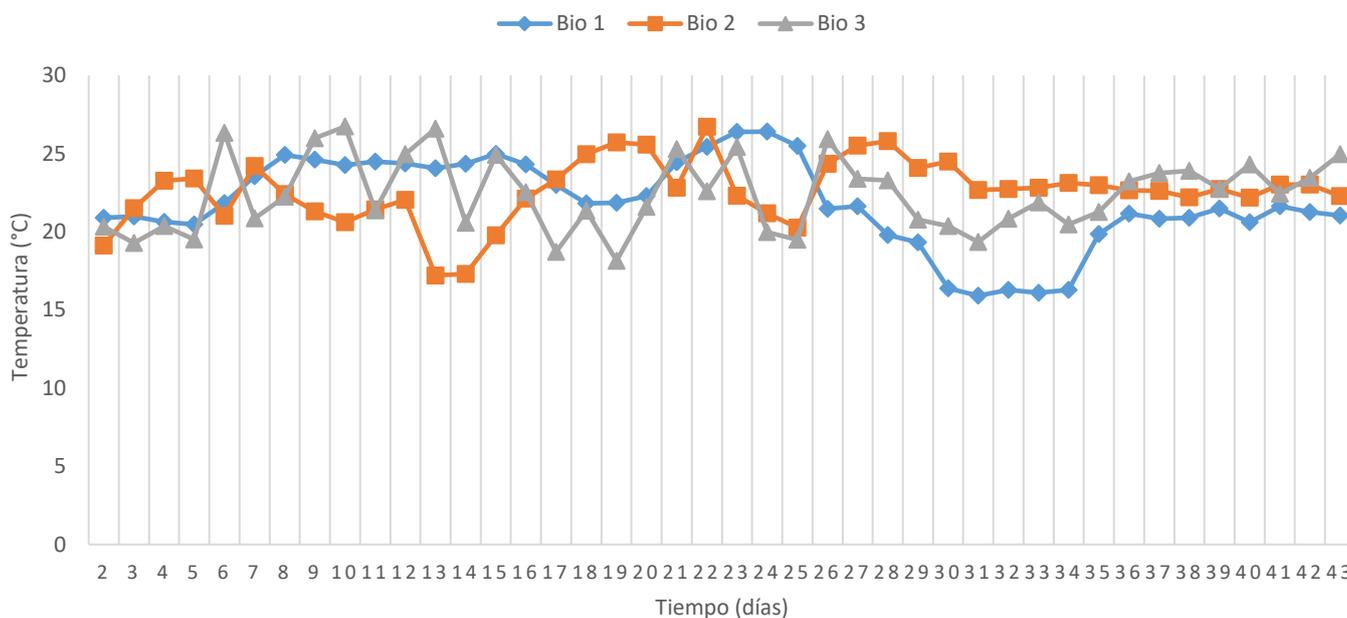
4.9 Temperatura

4.9.1 Temperatura EXP 1 (30°C)

En la figura 11 se aprecia la temperatura interna de cada biodigestor los cuales se encuentran en un rango de 15°C - 27°C, teniendo como promedio de 21.74, 22.49 y 22.40 °C para cada biodigestor.

Figura 11

Temperatura interna de trabajo de cada biodigestor en la EXP 1



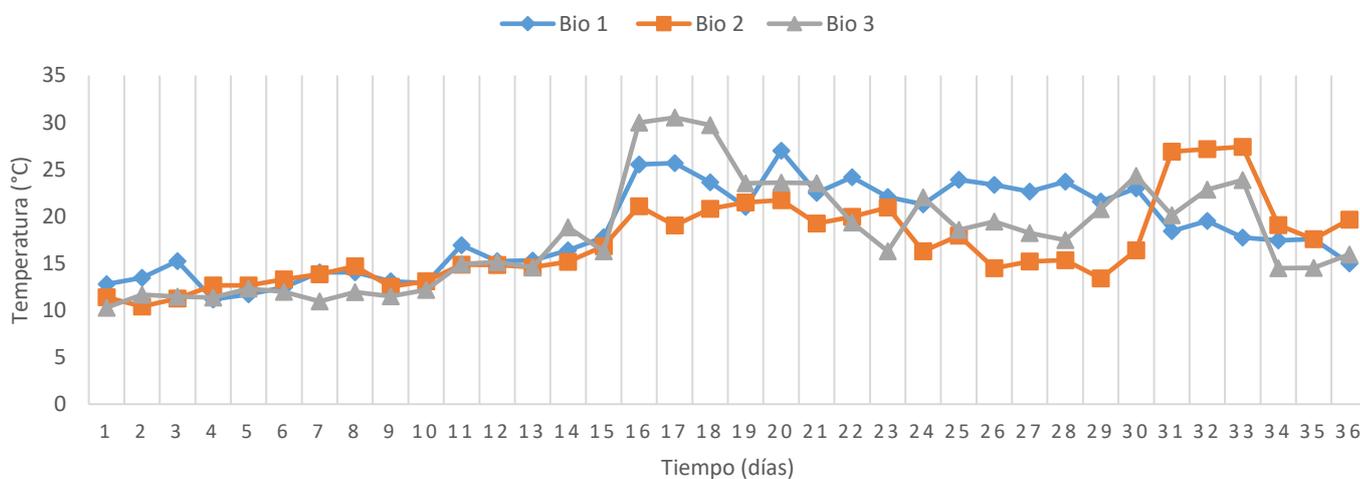
En la figura 11 se aprecia la variación de temperatura que existe dentro de cada digestor, con esto se entiende que existe una reacción en el proceso de digestión. También se puede ver que en los últimos días del proceso la temperatura tiende a permanecer ligeramente constante, esto debido a que los microorganismos terminaron con el proceso de descomposición de la biomasa o a su vez esta biomasa tendió a acidificarse.

4.9.2 Temperatura EXP 2 (ambiente)

La temperatura de trabajo interna para la segunda experimentación se la detalla en la figura 12 la cual se encuentra en el rango de 11°C – 27°C, teniendo como promedio 18.58, 17.02 y 17.89 °C respectivamente para cada digestor.

Figura 12

Temperatura interna de trabajo de cada biodigestor en la EXP 2

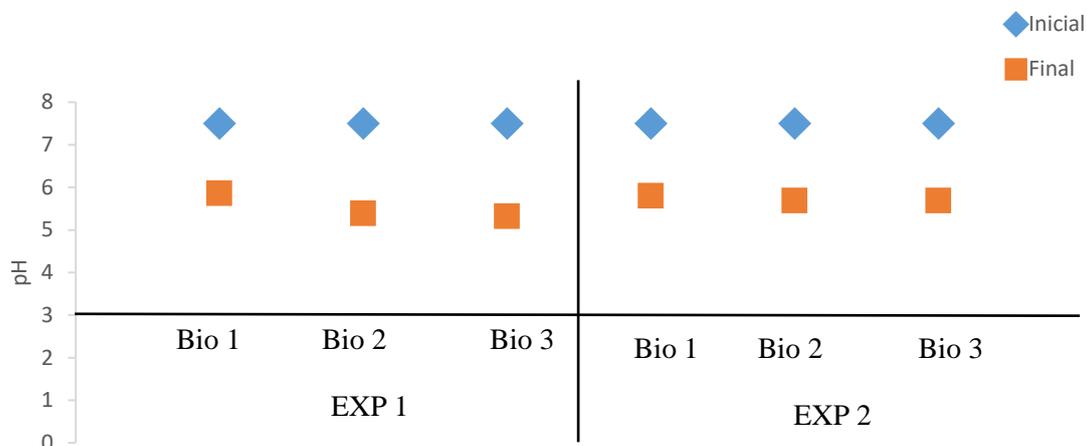


En la figura 12 se aprecia que la variación de temperatura en los primeros 14 días del proceso no presenta mayor variabilidad, es a partir del día número 15 que se presenta un aumento brusco de temperatura, esto se debe a que la temperatura externa de trabajo no se mantiene constante presentando variabilidad en el transcurso del día y la noche y por ende los microorganismos que se encuentran en el sustrato demoran en iniciar el proceso de digestión.

Tanto la figura 11 y 12 presentan el cambio de temperatura que existe dentro de cada uno de los digestores de cada experimento, dando a entender que en el EXP 1 el cual mantuvo una temperatura externa de 30 °C fue el que inicio con una producción de biogás antes que el EXP 2 y también con una producción superior.

4.10 Monitoreo de pH

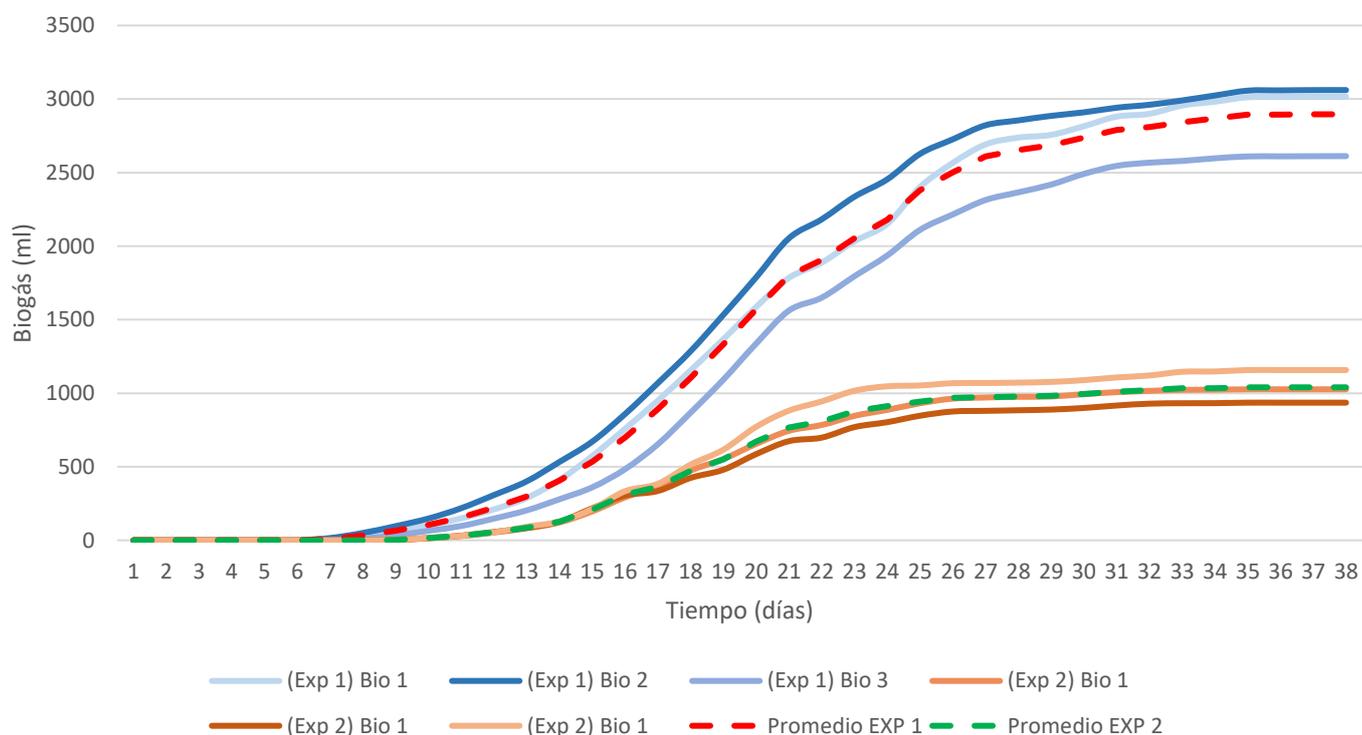
En la figura 13 se detallan los niveles de pH registrados al principio del proceso que fue de 7.5 ligeramente neutro que es considerado un rango óptimo para el proceso de digestión, y al final se aprecia una reducción de este pH dando a entender que el residuo se acidifico durante este proceso llegando a un nivel menor a 6.

Figura 13*Lectura de pH EXP 1 y EXP 2*

Se aprecia que existió una acidificación en el sustrato final, esto debió darse por la creación excesiva de ácidos grasos volátiles los cuales no pudieron ser consumidos por las bacterias metanogénicas, debido a esto el sustrato llegó a acidificarse llegando a tal punto de finalizar el proceso de digestión anaerobia.

4.11 Producción de Biogás

En la figura 14 se aprecia la producción de biogás de cada experimentación EXP 1 y EXP 2, cada una de las experimentaciones tuvo una mezcla de estiércol y rastrojo los cuales fueron de 70% y 30% respectivamente. Para el experimento EXP 1 se trabajó con una temperatura externa constante de 30°C del cual se obtuvo una producción acumulada promedio de 2896.45 ml de biogás, en cuanto el experimento EXP 2 el cual se desarrolló a una temperatura ambiente se obtuvo una producción acumulada promedio de 1040.00 ml de biogás. Así mismo se observa que la producción de biogás en el EXP 1 comenzó a partir del día 7 y 8 los cuales iniciaron con un volumen aproximado de 15 ml de biogás, por otro lado, la producción de biogás en el EXP 2 comenzó en el día 9 con una producción aproximada de 3 ml de este biocombustible.

Figura 14*Producción acumulada de biogás*

4.12 Análisis Estadístico

Para el análisis de varianza ANOVA se digitaron en el software INFOSTAT las tres repeticiones del EXP 1 y EXP 2, y la producción de biogás acumulada de cada repetición, siendo este la variable dependiente.

Tabla 9*Datos ingresados en el software INFOSTAT*

Experimento	Repetición	Biogás
EXP 1	Bio 1	3016.35
EXP 1	Bio 2	3061.05
EXP 1	Bio 3	2611.95
EXP 2	Bio 1	1026.60
EXP 2	Bio 2	935.80
EXP 2	Bio 3	1157.60

4.12.1 Prueba de Normalidad de Shapiro Wilks

En la tabla 10 se muestra los resultados de la prueba de Shapiro Wilks, dando como resultado un valor de p igual a 0.3544.

Tabla 10

Prueba de normalidad Shapiro Wilks

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO Producción	6	0	171.63	0.89	0.35

Con el valor de p según las hipótesis dadas por esta prueba se obtiene que los datos si tienen una distribución normal. Con este resultado se procede a un análisis de varianza ANOVA.

4.12.2 Análisis de Varianza ANOVA

Este análisis se llevó a cabo con un 95% de confianza comparando el biogás acumulado producido en cada repetición de cada experimento, y así determinar si existe significancia entre las medias. En la tabla 11 se detalla el resultado el cual indica que si existe diferencias significativas entre los dos experimentos con un valor de $p=0.0003$.

Tabla 11

Análisis de varianza de la producción de biogás

F.V.	SC	GI	CM	F	p-valor
Modelo	5169609.90	1	5169609.90	140.41	0.0003
Error	147276.38	4	36819.10		
Total	5316886.28	5			

Con este resultado se determina que tanto el experimento EXP 1 y EXP 2, mantienen una media diferente, tomando en cuenta que los experimentos se realizaron a diferente temperatura, da a entender que esta variable afecta a uno de los experimentos en el proceso de digestión.

4.12.3 Test LSD Fisher

En la tabla 12 se detallan los resultados de la prueba de Fisher, con una confianza del 95%.

Con este resultado se da a entender que el EXP 1 tuvo una mayor producción de biogás, esto debido a su temperatura de trabajo, lo que este Test da veracidad a que la temperatura es un factor influyente e importante en el tiempo que se lleva a cabo el proceso de digestión anaerobia.

Tabla 12

Comparación LSD de Fisher

Experimento	Medias	N	E.E.	
EXP 2	1040.00	3	110.78	A
EXP 1	2896.45	3	110.78	B

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

4.12.4 Coeficiente de Correlación de Pearson

En la tabla 13 se detalla el resultado de este coeficiente el cual se presenta en forma de matriz, en donde tenemos en la diagonal inferior un valor muy cercano al número 1 el cual nos indica que la relación entre las variables es más fuerte. En la diagonal superior tenemos como resultado un valor de significancia menor a 0.05 por tal razón damos paso a rechazar la hipótesis nula (H_0) y aprobamos la hipótesis alternativa la cual afirma que si existe una relación entre las variables.

Tabla 13

Resultados del coeficiente de correlación de Pearson

	Temperatura	Producción
Temperatura	1.00	0.00029
Producción	0.99	1.00

Con los resultados obtenidos de esta prueba da a entender de que, si existe una relación entre la producción y el parámetro de temperatura, llegando a la conclusión de que la producción de biogás es directamente proporcional a la temperatura.

4.13 Determinación del Potencial Energético

Para determinar el potencial energético según la ecuación (6) se tomó en cuenta el promedio de la producción de biogás de cada experimentación, para la materia orgánica

disponible se tomó el promedio diario de la materia teóricamente disponible en base a la recolección de las muestras. Para la variable biomasa inicial se tomó la cantidad de biomasa que fue utilizada para la experimentación. A continuación, en la tabla 14 se detallan el valor de cada una de las variables necesarias para el cálculo.

Tabla 14

Valores para el cálculo del potencial energético

Variable	Valor	Unidad
Producción inicial de biogás (B _i)	0.00289645	m ³
Materia orgánica disponible (MO _d)	0.05450000	t
Materia orgánica inicial (MO _i)	0.00340000	t

Con la utilización de la ecuación (6) se determinó el potencial energético del biogás dando como resultado 0.046 m³/día de biogás.

La producción de biogás a partir del estiércol del cuy se encuentra dentro de la producción de estiércol del conejo y de los ovinos ya que según la FAO (2001) “la producción a partir de estiércol de conejo tiene una producción de 0.021 m³/día de biogás y la producción a partir del estiércol ovino tiene una producción de 0.075 m³/día”.

4.13.1 Cantidad de Energía a Obtener a Partir del Biogás

En la tabla 15 se detalla las variables necesarias para determinar la energía a obtener del biogás.

Tabla 15

Valores para el cálculo de la energía a obtener

Variable	Valor	Unidad
Cantidad de biogás (B)	0.046	m ³
Contenido energético biogás (C _e)	22.500	MJ/m ³

Como resultado de la ecuación (7), se obtuvo un valor de 1.035 MJ/día

4.13.2 Energía Eléctrica Estimada a Obtener a Partir del Biogás

Según la ecuación (8) con el factor de conversión se obtuvo un resultado de 0.2875 kWh/día, dando como resultado final 104.93 kWh/año.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- La recolección de los residuos del cuy representa una tarea fácil en comparación con los residuos de otros animales. Los residuos del cuy son aptos para el proceso de digestión esto debido a que en sus parámetros físico químicos presenta una relación C/N dentro de los parámetros óptimos, así mismo estos residuos tienen un porcentaje promedio del 60% de sólidos volátiles los cuales dan a entender que más de la mitad de la materia orgánica se transformara en biogás.
- Los digestores anaeróbicos representan un dispositivo importante para el proceso de digestión, por lo que para su construcción se debe tener una revisión minuciosa el cual permita cumplir con la función establecida y así tener un desempeño óptimo en el proceso. Por lo que se concluye que estos dispositivos construidos de una forma artesanal o casera son útiles para realizar un proceso de digestión anaeróbica, siempre y cuando se realice una revisión para evitar que exista fugas, así mismo es importante incorporar sistemas que ayuden a tener una mejor operación como por ejemplo un sistema de agitación y control de pH.
- La mayor producción de biogás se alcanzó en el EXP1 con una temperatura mesofílica de 30 °C, el cual tuvo una producción promedio de 2896.45 ml de biogás acumulado, esto demuestra que a mayor temperatura mayor será la generación de biogás. Esto se evidenció en el análisis de correlación el cual indica una relación del 99% entre la temperatura y la producción de biogás, dando a entender que la producción de biogás es directamente proporcional a la temperatura.

5.2 Recomendaciones

- Para la recolección de residuos utilizar equipos de protección para evitar enfermedades respiratorias o infecciones. Realizar el análisis físico químico de otros residuos generados por estos animales debido a que existen diferentes tipos de alimentación hacia estos, por lo que se recomienda realizar los distintos análisis físico químicos.
- Realizar una revisión diaria al biodigestor con el fin de evitar fugas. Incluir en el digestor los dispositivos necesarios para la medición de parámetros como la temperatura y pH, también incluir un sistema de agitación el cual ayudara a que el proceso sea más eficiente.
- Evaluar la producción de biogás con distintas combinaciones de los mismos residuos del cuy. Evaluar el residuo final para determinar si existe una mayor eficiencia frente al residuo original.

Referencias

- Acosta, Y., & Obaya, C. (2005). *La digestión Anaerobia. Aspectos teóricos. Parte 1.* Cuba.
- AIHE, A. d. (2020). *aihe.org.ec*. Obtenido de <https://www.aihe.org.ec/wp-content/uploads/2020/05/Petroleo-en-Cifras-2019.pdf>
- Álvarez, C. (Agosto de 2009). *economia.unam.mx*. Obtenido de <http://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/359/04carlosalvarez.pdf>
- Amat, J. (Enero de 2016). *Ciencia de Datos*. Obtenido de https://www.cienciadedatos.net/documentos/19_anova#Informaci%C3%B3n_sesi%C3%B3n
- Andrade, H., Arteaga, C., & Segura, M. (2017). *scielo.org.co*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v18n1/v18n1a06.pdf>
- ARC, A. d. (2020). *controlrecursosyenergia.gob.ec*. Obtenido de <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/11/Estad%C3%ADstica-2019-nuevologosmall.pdf>
- ARCONEL. (2015). *ARCONEL*. Obtenido de <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/proyecto-de-biogas-pichacay/>
- ARCONEL. (2015). *arconel.gob.ec*. Obtenido de <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/ecuador-posee-un-5155-de-energia-renovable/>
- Argentina, S. d. (2003). *Conceptos sobre Energía*.
- Argentina, S. d. (2019). *energia.gob.ar*. Obtenido de http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/sintesis_balance/2019-12-09_Balance_de_Gestion_en_Energia_2016-2019_final_y_anexo_pub_.pdf

- Barreros, E. (2017). *EFEECTO DE LA RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO EN EL TIEMPO DE DESCOMPOSICIÓN DEL ABONO DE CUY (Cavia porcellus), ENRIQUECIDO*. Cevallos-Ecuador.
- BID. (2017). *Plan Nacional de Eficiencia Energética 2016-2035*. Quito.
- Boqué, R., & Maroto, A. (2004). *El análisis de la varianza (ANOVA), Comparación de múltiples poblaciones*. Tarragona.
- Caines Calepa, J. R. (2010). *Diseño, Construcción y Operación de un Digestor Anaerobio tipo Cúpula*.
- Campos, A. (2001). *Optimización de la digestión anaerobia de purines de cerdo mediante codigestión con residuos orgánicos de la industria agroalimentaria*. Lleida.
- Cantuña, L. (2018). *EVALUACIÓN POR VALORACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN DEL RENDIMIENTO DE PRODUCCIÓN DE METANO A PARTIR DE SUERO LÁCTEO DE LA QUESERÍA ARTESANAL DE LA ZONA RURAL DE MACHACHI INOCULADO CON ESTIÉRCOL BOVINO*. Quito.
- Carhuancho, F. (2012). *APROVECHAMIENTO DEL ESTIÉRCOL DE GALLINA PARA LA ELABORACIÓN DE BIOL EN BIODIGESTORES TIPO BATCH*. Lima.
- Casanovas, G., Della, F., Reymundo, F., & Serafini, R. (2019). *Guía teórico práctico sobre el biogás y los biodigestores*. Buenos Aires.
- CELEC. (2019). *celec.gob.ec*. Obtenido de <https://www.celec.gob.ec/enerjubones/index.php/sala-prensa/noticias/112-usd-400-millones-se-invertiran-en-la-construccion-de-los-proyectos-fotovoltaico-el-aromo-y-villonaco-ii-y-iii>
- Chiriboga, O. (2010). *Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás y Fertilizante Orgánico a partir de Mezclas de Desechos de Procesadoras de Frutas*. Quito.
- Colino, A., & Caro, R. (2010). *Fuentes Energéticas*.
- Cordero, I. (2010). *Aplicación de biol a partir de residuos: ganaderos, de cuy y gallinaza, en cultivos de raph.anus sativus para determinar su incidencia en la calidad del suelo para agricultura*. Cuenca.
- Droppelmann, G. (2018). *PRUEBAS DE NORMALIDAD, Normality Test*. Chile.

- Durán, A., German, G., Basurto, G., Castelán, G., Peralta, S., Aguilar, M., & Sánchez, A. (2018). *Estudio de digestión anaeróbica seca y húmeda en planta piloto, para determinar el potencial de producción de biogás a partir de residuos orgánicos generados en el municipio de Naucalpan de Juárez*. México.
- e8DSoluciones. (Mayo de 2012). Obtenido de https://e8dsoluciones.es/pdf/e8d_ana_est_que_es.pdf
- Eastman, R. (2012). *Guia para SIG y procesamiento de imagenes*. Clark University . IDRISI. Obtenido de <https://clarklabs.org/wp-content/uploads/2016/10/IDRISI-Selva-Spanish-Manual.pdf>
- Ecoembes. (2016). *ecoembes.com*. Obtenido de <https://www.ecoembes.com/es/recicladores/especificaciones-tecnicas>
- Ecuador, B. c. (2018). *Contenido.bce.fin.ec*. Obtenido de <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/ASP201806.pdf>
- Energético, I. d. (2017). *geoenergia.gob.ec*. Obtenido de <https://www.geoenergia.gob.ec/transporte-lidera-estadisticas-de-consumo-energetico-en-ecuador/>
- ESPOL, E. s. (2019). *espol.edu.ec*. Obtenido de <http://www.espol.edu.ec/es/noticias/encuentro-internacional-sobre-biomasa-para-uso-energ%C3%A9tico>
- Estrada, M. (2010). Manejo y procesamiento de la gallinaza. *Lasallista*.
- Estratègics, M. C. (2016). *Balance Energètic Nacional 2016*.
- FAO. (1980). *El reciclaje de materia orgànica en la agricultura de Amèrica Latina*.
- FAO. (2011). *Manual de biogàs*. Santiago de Chile.
- Fernández, Á. (2017). *Dimensionamiento de una planta para la valorización mediante digestión anaerobia de los purines generados en una granja porcina*. Cádiz.
- Ferrari, L. (2013). Energías fósiles: diagnóstico, perspectivas e implicaciones económicas. *Redalyc*, 36.

- Flores, C., & Flores, K. (2021). *PRUEBAS PARA COMPROBAR LA NORMALIDAD DE DATOS EN PROCESOS PRODUCTIVOS: ANDERSON DARLING, RYAN-JOINER, SHAPIRO-WILK Y KOLMOGÓROV-SMIRNOV*. Panamá.
- Gaona, J. (2019). *Sistema web para la gestión de citas e historias clínicas en el centro de rehabilitación ASTEFIR, La Victoria - 2019*. Lima.
- García, G. (2016). *Diseño de un biodigestor para el mejoramiento de las aguas residuales en la parroquia de tumbaco ejemplificado en los barrios Tola chica, Tola Grande y Santa Rosa*. Quito.
- Gasnova. (2019). *Gasnova.com*. Obtenido de <http://www.gasnova.co/wp-content/uploads/2019/08/INFORME-DEL-SECTOR-DEL-GLP-2019.pdf>
- Gonzales, A. (2014). *Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia*. Sevilla.
- Guagalango, J., & Vásquez, D. (2021). *EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS MUNICIPALES DEL CANTÓN URCUQUÍ PARA EL ESCALAMIENTO DE UNA PLANTA DE BIOGÁS*. Ibarra.
- Gutierrez, A. (29 de Octubre de 2007). *Odepa, Oficina de Estudios y políticas Agrarias*. Obtenido de <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos/el-biogas-alternativa-energetica-emergente-2#:~:text=El%20valor%20energ%C3%A9tico%20del%20biog%C3%A1s,4.000%20a%205.000%20Kcal%2Fm3>.
- Haro, H. (2017). *Diseño de un biodigestor para el tratamiento de los desperdicios orgánicos generados en la facultad de hospitalidad y servicios de la Universidad Técnica Equinoccial*. Quito.
- IDAE (Institución para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *"Biomasa: Digestores anaerobios"*. Madrid.
- IDEAM. (2007). *Sólidos totales secados*. Colombia.
- Infantes, P. (2015). *Diseño y Construcción de un Biodigestor Industrial Para Tratamiento de residuos Orgánicos*. Berlín.

- International Energy Agency.* (2019). Obtenido de https://www.google.com/search?sxsrf=ALeKk01y621jgYBmDRK3FH13_V0xDgBK8g%3A1594180875148&source=hp&ei=C0UFX-m0BuLH_QaI1ovQCg&q=iea&oq=iea&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQAzIECAAQQzICCAAyBAgAEAoyAggAMgIIADICCAyAggAMgIIADICCAyAggAOggIABCxAxCDAVCFVjIBGCDcGgAcAB4AIAB2wKI
- ITDG. (2003). *Practical ACTION*. Obtenido de <https://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/03-biodigestores.pdf>
- López, L. A. (2017). *Evaluación de potencial energético de los residuos sólidos agroindustriales del proceso de extracción de aceite de palma africana como alternativa energética para el reemplazo de la leña en la zona norte del departamento del Cesar*. Manizales: Universidad de Manizales.
- Martín, J., Esteves, A., & Manrique, S. (2016). *Influencia del porcentaje de sólidos en la producción de biogás a partir de gano caprino*. Salta.
- Ministerio de Energía de Chile. (2017). *Manual del Biogás*. Santiago de Chile.
- Molina, M., Ochoa, C., & Ortega, E. (2020). *Comparación de dos medias. Pruebas de la t de Student*. Madrid.
- Morocho, M. (2012). <http://dspace.esPOCH.edu.ec/>. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2111/1/17T1105.pdf>
- Narvárez, R. (2019). *Balance Energético 2017*.
- Nogués, F. S., Garcia Galindo, D., & Rezeau, A. (2012). *Energía de la Biomasa (Volumen III)*. Barcelona.
- Olade. (2021). [olade.org](http://www.olade.org). Obtenido de http://www.olade.org/wp-content/uploads/2021/01/Generacion-electrica-mundial-y-para-America-Latina-y-el-Caribe-ALC_01-12-2020.pdf
- Pantoja, R. (2014). *Evaluación de diferentes dosis de abonos orgánicos de origen animal en el comportamiento agronómico, del cultivo de brócoli en la zona de Huaca, Provincia del Carchi*. El Ángel.

- Parra, R. (11 de Diciembre de 2015). *scielo.org.co*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v10n2/v10n2a14.pdf>
- Pérez, J. (01 de Enero de 2013). *jllopez.com*. Obtenido de <https://jllopez.com/2013/01/28/test-isd-least-significant-difference/>
- Petroecuador. (2018). *eppetroecuador.ec/*. Obtenido de <https://www.eppetroecuador.ec/?p=6875>
- Pinos, J., García, J., Peña, L., Rendón, J., González, C., & Tristán, F. (2012). Impactos y regulaciones ambientales del estiércol generado por los sistemas ganaderos de algunos países de América. *Scielo*.
- PNUMA, P. d. (2020). *unep.org*. Obtenido de <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34438/EGR20ESS.pdf>
- Ramirez, A. (2014). *Estiercol Porquino (porquinaza)*. Obtenido de <https://prezi.com/yq7i8s7ydw28/porquinaza/>
- Restrepo, L., & González, J. (2007). *De Pearson a Spearman*. Medellín.
- Robles, C., & Omar, R. (2018). Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. *Espacios*, 4-5.
- Saenz, C. (2016). *Utilización agroindustrial del nopal*. Roma : Organización de las naciones unidas para la agricultura y ganadería .
- Salud, O. M. (2019). *who.int*. Obtenido de <https://www.who.int/airpollution/infographics/es/>
- Sánchez, G. C. (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*. Manizales Colombia: Universidad de Manizales. Obtenido de http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2771/Ramirez_Sanchez_Gloria_pdf.2016%20%282%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sánchez, N., & Vargas, J. (2015). *Guía práctica para el manejo de los residuos orgánicos utilizando composteras rotatorias y lombricompost*. Costa Rica.

Tay León, M. M. (2017). *RENDIMIENTO DE BIOGÁS Y BIOFERTILIZANTE EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE ESTIÉRCOL DE ANIMALES Y RASTROJOS EN LAMBAYEQUE*. Lambayeque.

Toledo, M. (2016). *Análisis elemental CHNSO: preparación de muestras*. Mexico.

Tupiza, S., & Velasquez, D. (2013). *Diseño e implementacion de un biodigestor para el funcionamiento de un motor térmico*. Quito.

UNAM. (2008). *FUNDAMENTOS Y TECNICAS DE ANÁLISIS DE ALIMENTOS*.

Vivanco, E., Yaya, R., & Chamy, R. (2006). *Manual técnico sobre tecnologías biológicas anaerobias aplicadas al tratamiento de aguas y residuos industriales*.

WLPGA. (Diciembre de 2020). *wlpga.org*. Obtenido de <https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2020/12/Annual-Report-2020.pdf>