



POSGRADOS

MAESTRÍA EN _____ RECURSOS NATURALES RENOVABLES CON MENCIÓN EN REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

RPC-SO-17-NO.363-2020

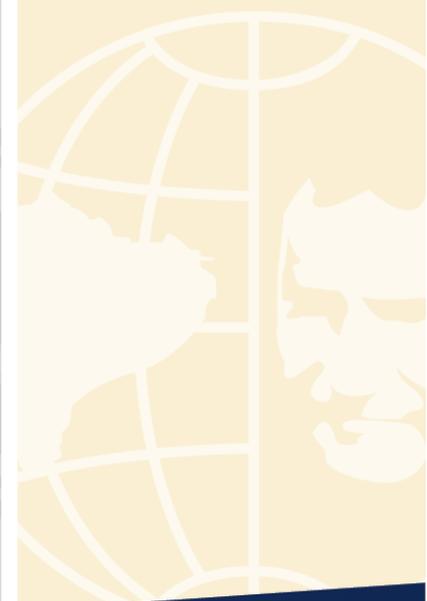
OPCIÓN DE TITULACIÓN:
INFORMES DE INVESTIGACIÓN

TEMA:
APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL
ESTIÉRCOL DE MAMÍFEROS CARNÍVOROS
Y HERBÍVOROS SILVESTRES BAJO EL
CUIDADO HUMANO A TRAVÉS DE LA
DIGESTIÓN ANAEROBIA

AUTOR:
MARÍA CRISTINA MOLINA ARÍZAGA

DIRECTOR:
INÉS PATRICIA MALO CEVALLOS

CUENCA – ECUADOR
2023



Autor:**María Cristina Molina Arízaga**

Ingeniera Ambiental.

Candidata a Magíster en Recursos Naturales Renovables con Mención en Remediación y Restauración por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

mmolina@est.ups.edu.ec

Dirigido por:**Inés Patricia Malo Cevallos**

Doctora en Bioquímica y Farmacia.

Magister en Biotecnología.

Dottorato di Ricerca in Biologia Evoluzionistica ed Ecologia

imalo@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

MARÍA CRISTINA MOLINA ARÍZAGA

Aprovechamiento energético del estiércol de mamíferos carnívoros y herbívoros silvestres bajo el cuidado humano a través de la digestión anaerobia

DEDICATORIA

A mi esposo y mi hija, quienes fueron mi motor e inspiración a cada paso del camino. También agradezco a mis padres, cuyo ejemplo de dedicación me han hecho quien soy hoy. A mis hermanas, cuyo apoyo incondicional fue indispensable para alcanzar este objetivo. Y finalmente, a mis abuelitas y abuelitos, mis ángeles, que siempre me desean lo mejor y han encontrado alegría en mis logros. A ellos vatodo el esfuerzo, dedicación y amor impreso en este trabajo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primero lugar a Dios por respaldarme en cada momento y llevarme de lo bueno a lo mejor y de lo mejor a lo excelente, agradezco además a todos los docentes de quienes aprendí valiosos conocimientos aplicados dentro del presente trabajo y en especial gracias a mi tutora por su apoyo y contribución en mi tesis de maestría. Sus valiosos comentarios, críticas constructivas y aún sus palabras de aliento me ayudaron a completar mi trabajo con éxito. Gracias a los colaboradores del bioparque Amaru por abrirme las puertas de tan especial lugar para el desarrollo de mi experimento.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.....	11
3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	13
3.1 EL BIOGÁS.....	13
3.1.1 COMO SE PRODUCE EL BIOGÁS.....	14
3.1.2 MICROBIOLOGÍA DEL BIOGÁS.....	15
3.2 APLICACIONES DEL BIOGÁS.....	16
3.2.1 COCINAS A BIOGÁS.....	17
3.2.2 CALEFACCIÓN.....	18
3.2.3 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	19
3.3 BIODIGESTORES.....	20
3.3.1 TIPOS DE BIODIGESTORES.....	21
3.3.2 BIODIGESTOR DE GLOBO.....	21
3.3.3 BIODIGESTOR DE DOMO FIJO.....	21
3.3.4 BIODIGESTOR DE DOMO FLOTANTE.....	21
3.3.5 BIODIGESTOR DE TANQUE CSTR.....	22
3.3.6 BIODIGESTOR DE FLUJO CONTINUO.....	22
3.3.7 BIODIGESTOR DISCONTINUO O EN <i>BATCH</i>	22
3.3.8 BIODIGESTOR SEMICONTINUO.....	23
3.4 FACTORES FÍSICO QUÍMICOS RELACIONADOS CON LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	23
3.4.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL SUSTRATO.....	23
3.4.2 COMBINACIÓN DE SUSTRATOS.....	24
3.4.3 TEMPERATURA.....	25
3.4.4 PH.....	26
3.4.5 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES.....	27
3.4.6 INHIBIDORES DEL PROCESO FERMENTATIVO.....	27
3.5 PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS.....	29
3.5.1 TRATAMIENTOS FÍSICOS.....	29

3.5.2	TRATAMIENTOS QUÍMICOS	30
3.5.3	TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS.....	30
3.6	ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	31
4	MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	33
4.1	DESCRIPCIÓN DEL LUGAR.....	33
4.2	LEVANTAMIENTO DE LA LÍNEA BASE.....	34
4.2.1	DETERMINACIÓN DE LA POBLACIÓN	34
4.2.2	PESAJE DEL ESTIÉRCOL.....	35
4.2.3	ELABORACIÓN DE LA MEZCLA DE HERBÍVOROS Y CARNÍVOROS	35
4.2.4	DETERMINACIÓN DE LOS SÓLIDOS TOTALES.....	36
4.3	DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN CARBONO NITRÓGENO...37	
4.4	DISEÑO EXPERIMENTAL	38
4.5	CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE LOS BIODIGESTORES.....	39
4.5.1	MATERIALES.....	40
4.5.2	CONSTRUCCIÓN	40
4.5.3	CARGA DE LOS BIORREACTORES Y EVALUACIÓN DEL CURSO DE LA REACCIÓN	42
4.6	DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO.....	44
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
5.1	LÍNEA BASE DEL EXPERIMENTO	45
5.2	SÓLIDOS TOTALES DE LA MEZCLA DE HERBÍVOROS Y CARNÍVOROS	48
5.3	RELACIÓN CARBONO NITRÓGENO.....	48
5.4	FASE EXPERIMENTAL.....	49
5.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	54
5.6	ANÁLISIS DEL VOLUMEN DE BIOGÁS GENERADO	56
5.7	CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE LA MEZCLA IDEAL 58	
5.8	DISCUSIÓN	61
5.9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
	REFERENCIAS	65
	ANEXOS	72

APROVECHAMIENTO
ENERGÉTICO DEL
ESTIÉRCOL DE
MAMÍFEROS
CARNÍVOROS Y
HERBÍVOROS
SILVESTRES BAJO EL
CUIDADO HUMANO A
TRAVÉS DE LA
DIGESTIÓN ANAEROBIA

AUTOR:

MARÍA CRISTINA MOLINA ARÍZAGA

RESUMEN

Se realizó una investigación para determinar la viabilidad del estiércol de mamíferos carnívoros y herbívoros como fuente de energía alternativa en el bioparque Amaru mediante la digestión anaerobia. Se evaluaron todos los mamíferos del parque y sus recintos para seleccionar aquellos de los que se podría recolectar estiércol para el experimento. A partir de la cantidad de estiércol producido por semana, se formuló una serie de mezclas de estiércol que incluían diferentes proporciones de animales herbívoros y carnívoros. Se encontró que la producción de biogás fue mayor a partir de sustratos de estiércol herbívoro, sin embargo, los análisis de laboratorio mostraron que la cantidad de metano contenida en el gas correspondía al 3,41%, lo que no es suficiente para ser considerado biogás. Además, se observó que la relación carbono nitrógeno en la mezcla de estiércol de los animales carnívoros es muy pobre, lo que inhibe la producción de biogás. En conclusión, bajo las condiciones del experimento, no es posible suplir los requerimientos energéticos del bioparque Amaru.

Palabras clave: biogás, carnívoros, herbívoros, digestión anaerobia.

ABSTRACT

An investigation was conducted to determine the viability of carnivorous and herbivorous mammal manure as an alternative energy source in the Bioparque Amaru through anaerobic digestion. All mammals in the park and their enclosures were evaluated to select those from which manure could be collected for the experiment. Based on the amount of manure produced per week, a series of manure mixtures were formulated that included different proportions of herbivorous and carnivorous animals. It was found that biogas production was higher from herbivore manure substrates. However, laboratory analysis showed that the amount of methane contained in the gas was only 3,41%, which is not sufficient to be considered biogas. Additionally, it was observed that the carbon to nitrogen ratio in the mixture of carnivorous animal manure was very poor, inhibiting biogas production. In conclusion, under the conditions of the experiment, it is not possible to meet the energy requirements of the Bioparque Amaru

Key words: biogas, carnívoro, herbívoro, digestión anaeróbica.

1. INTRODUCCIÓN

En general, las energías renovables se están tornando populares en todas partes del mundo, esto debido a que en pocos años la población mundial se enfrentará a la privación de energía fósil que cada vez es más costosa y menos rentable, y por otro lado es mundialmente conocido que los residuos líquidos y sólidos provenientes de los seres vivos son abundantes y energéticamente aprovechables, a pesar de ello, sin el manejo correcto, estos pueden provocar impactos ambientales negativos (Gerena et al., 2020). Países como Estados Unidos y Canadá cuentan con legislaciones específicas en cuanto al manejo y disposición de excretas animales, no obstante, en países como Argentina, México, Chile, Colombia y Ecuador, la regulación y vigilancia gubernamental acerca del manejo y uso de los excrementos animales provenientes de actividades pecuarias u otras como bioparques, es superficial y sin especificaciones (Pinos-Rodríguez et al., 2012).

Por otro lado el biogás es un combustible renovable que se obtiene a partir de la descomposición de la materia orgánica tal como lo son las excretas de los animales, esto en un proceso anóxico (en ausencia de oxígeno) pudiendo emplearse como combustible alternativo a los de origen fósil, para su producción es necesaria la digestión anaeróbica, misma que puede desarrollarse en sistemas denominados biodigestores, los cuales se definen como una cámara hermética en que se dispone la materia orgánica en condiciones anóxicas, para que se pueda llevar a cabo la fermentación. Esta última consiste en la descomposición bioquímica de la biomasa (Ávila-Hernández et al., 2018).

2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad alrededor del mundo existe un sin número de centros dedicados al manejo, rehabilitación y conservación de animales silvestres que, como consecuencia del tráfico y/o cautiverio ilegal no pueden ser liberados en sus hábitats naturales esto debido a sus lesiones tanto físicas como psicológicas (Robayo, 2020). De acuerdo con el informe de tráfico ilegal del Ministerio del Ambiente del Ecuador, en el 2014 se decomisaron un total de 2056 especímenes, entre los cuales se encontraban mamíferos, invertebrados, reptiles, anfibios, peces y además plantas, siendo el grupo con el mayor número de decomisos el de las aves, el cual representó un 32% del total, y como fue dicho anteriormente un alto porcentaje de estos animales no puede ser reincorporado a su hábitat siendo su única oportunidad el ser trasladados a bioparques, zoológicos y santuarios de vida silvestre, de los cuales el país contaba con un total de 37 en el 2019; número que ha disminuido, ya que algunos por la escases de visitantes y la situación económica se vieron obligados a cerrar sus centros durante la pandemia motivo a la emergencia sanitaria por el COVID 19, (Ministerio de Medio Ambiente, 2014). El caso del Bioparque Amaru no fue la excepción, y durante el periodo de cuarentena recibió cerca de 200 animales; por lo cual al momento el Amaru cuenta con un total de 2000 animales, distribuido en 42 recintos de los cuales 10 requieren calefacción debido a que los animales que en ellos habitan que provienen de zonas más cálidas; esta calefacción se hace en base a GLP, el cual es trasladado por tuberías hasta llegar a los distintos hábitats, representando un gasto importante para el parque. Al momento el bioparque requiere de un total de 450 kg de GLP cada 15 días en promedio, lo cual equivale aproximadamente a 585 m³; por otro lado su producción de estiércol de animal es alta y su manejo complejo, en consecuencia el aprovechamiento energético mediante la digestión anaerobia de este estiércol supondría un ahorro importante de recursos al bioparque, además que esta iniciativa servirá como modelo a los demás bioparques del país, tomando en cuenta que su uso proporciona energía a bajo costo, además de ingresos económicos

adicionales, sin dejar de lado ventajas tales como la generación de nuevas fuentes de empleo, la descentralización energética, la protección del medio ambiente y naturalmente la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y ya que las investigaciones sobre el uso del estiércol de animales carnívoros y herbívoros bajo el cuidado humano es escueta, el enfoque objetivo de esta investigación es proporcionar datos cuantificables acerca de las características que deben presentar las mezclas contenidas en los biodigestores para que dichos sistemas presenten un máximo potencial en su rendimiento convirtiéndose así en alternativas energéticas beneficiosas que generen un menor impacto ambiental y a su vez sirvan como punto de partida para diversas investigaciones futuras enfocadas en su implementación dentro del país, siendo así que el problema en el que se centrara este estudio es la identificación de la mezcla de estiércol obtenida de mamíferos carnívoros y herbívoros silvestres bajo el cuidado humano idónea para la obtención de los resultados con la mayor eficacia en relación a la generación de biogás y su posterior aplicación para el aprovechamiento energético en el Bioparque Amaru (Venegas Venegas et al., 2019).

3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 EL BIOGÁS

Cuando la materia orgánica se descompone en un ambiente carente de oxígeno libre, producen gas, este gas está compuesto en un 55 a 70% de metano (CH_4) y un 30% a 45% de dióxido de carbono (CO_2); así como también contiene una baja cantidad de otros gases como amoníaco (NH_3), dióxido de azufre (H_2S), nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O_2), dicha mezcla recibe el nombre de biogás, cuyo poder calorífico ronda entre las 5000 kcal m^{-3} . (Abbasi et al., 2011; Sun et al., 2015). El biogás posee características específicas, mismas que se describen en la tabla 1.

Tabla 1

Características específicas del biogás

Características	
Composición general ¹	CH_4 55-70%, CO_2 30-45%, trazas de otros gases
Contenido energético ¹	6,0 – 6,5 Kw h m^{-3}
Equivalente de combustible ¹	0,60 – 0,65 L petróleo/ m^3 de biogás
Límite de explosión ¹	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición ¹	650 – 750 °C
Presión crítica ¹	-82,5°C
Densidad normal ¹	1,2 kg m^{-3}
Olor	Con presencia de azufre a huevo podrido, en su ausencia olor imperceptible.
Masa molar ¹	16,043 kg kmol^{-1}
Valor calorífico ²	7 Kwh/ m^3 – 21,5 MJ/ m^3 – 5140 kcal/ m^3

Nota. ¹ Siempre y cuando el contenido de CH_4 sea el indicado en la composición general; ² Con una composición del biogás de CH_4 (65%)- CO_2 (35%), información basada en (Deublein & Steinhauser, 2011; FAO, 2011; INTA, 2011).

La energía que sea capaz de producir el biogás dependerá de su volumen y de la proporción de metano que contenga, tomando en cuenta que el poder calorífico del metano es de 9,96 kWh/m³. De acuerdo con la literatura 1 m³ con un 70% de metano equivaldría a 0,8 litros de gasolina, a 6,8 kWh de electricidad, a 0,3 kg de carbón, a 1,2 litros de alcohol combustible, a 0,6 m³ de gas natural, y a 0,71 litros de fuel-oil (Ávila-Hernández et al., 2018; Ponce, 2016).

3.1.1 COMO SE PRODUCE EL BIOGÁS

La digestión anaerobia se produce como resultado de la fermentación bacteriana de desechos orgánicos en ambientes privados de oxígeno; dicha fermentación se produce en cuatro etapas.

En una primera etapa se produce la hidrólisis, las macromoléculas de proteínas grandes, grasas y polímeros carbohidratados son descompuestos por enzimas extracelulares en aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga y azúcares.

En una segunda etapa se produce la acidogénesis, así los productos resultantes de la etapa anterior son fermentados formando ácidos grasos volátiles (ácido láctico, propiónico, butírico y valérico).

En la tercera etapa también conocida como acetogénesis, las bacterias consumen los productos hasta entonces fermentados generando ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno.

Finalmente, en la cuarta etapa las bacterias metanogénicas consumen el acetato, hidrógeno y una parte del dióxido de carbono para posteriormente producir metano. La producción de metano se puede dar por tres vías: acetotrófica, hidrogenotrófica y metilotrófica mismas que se detallan a continuación.

Tabla 2

Vías bioquímicas para la producción de metano

Vías	Reacción
Vía acetotrófica	$4CH_3COOH = 4CO_2 + 4CH_4$
Vía hidrogenotrófica	$CO_2 + 4H_2 = CH_4 + 2H_2O$
Vía metilotrófica	$4CH_3OH + 6H_2 = 3CH_4 + 2H_2O$

Nota: Tabla elaborada por el investigador basada en Abbasi y colaboradores (2011)

3.1.2 MICROBIOLOGÍA DEL BIOGÁS

La generación de biogás involucra tres grupos fisiológicos de bacterias encargadas de la conversión anaeróbica de la materia orgánica, el primer grupo de bacterias son las hidrolíticas y fermentadoras encargadas de convertir materiales orgánicos complejos (hidratos de carbono, proteínas y lípidos) en ácidos grasos, alcoholes, dióxido de carbono, hidrógeno y amoníaco, la importancia de este grupo de bacterias no sólo se debe a que producen el alimento para las bacterias posteriores, sino que, además eliminan cualquier traza de oxígeno disuelto en el sistema. El segundo grupo de bacterias denominadas acetogénicas convierten los productos del primer grupo en hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético. El tercer grupo compuesto por bacterias anaeróbicas estrictas se divide en dos sub grupos de bacterias, aquellas formadoras de metano a través del hidrógeno y dióxido de carbono denominadas hidrogenotróficas, y las otras que forman metano por proceso de descarboxilación de acetato denominadas acetoclásticas, en la tabla 3 se enumeran algunas de las principales bacterias involucradas en el proceso según su naturaleza (Abbasi et al., 2011; FAO, 2011).

Tabla 3*Bacterias involucradas en las cuatro fases de fermentación*

Fases	Bacterias
HIDRÓLISIS	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bacteroides</i> • <i>Lactobacillus</i> • <i>Propioni-bacterium</i> • <i>Sphingomonas</i> • <i>Sporobacterium</i> • <i>Megasphaera</i> • <i>Bifidobacterium</i>
ACIDOGÉNESIS	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Clostridium,</i> • <i>Paenibacillus</i> • <i>Ruminococcus</i> • <i>Cytophaga-Flavobacterium-Bacteroides</i>
ACETOGÉNESIS	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Acetobakterium</i>
METANOGENÉNESIS	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Methanobacterium</i> • <i>Methanospirillum hungatii</i> • <i>Methanosarcina</i>

Nota: Tabla elaborada por el investigador basada en Abbasi y colaboradores (2011)

3.2 APLICACIONES DEL BIOGÁS

Por sus características físico-químicas el biogás es considerado un combustible ecológico y una alternativa renovable frente a los combustibles fósiles, esto debido a que permite reciclar el dióxido de carbono (CO₂) que se genera durante su combustión, en otras palabras, faculta la captura de carbono; el sustento se centra en que los vegetales captan en sus hojas el CO₂ del aire y mediante la energía solar y la clorofila realizan la fotosíntesis, produciendo monosacáridos y posteriormente polisacáridos para su crecimiento, los animales (herbívoros) consumen dichas plantas, y a su vez dependiendo de la cadena trófica a la que pertenezcan serán

depredados (carnívoros), ambas familias de animales al final de su digestión excretan estiércol que en condiciones anóxicas producirá biogás; este al ser empleado en cocinas, lámparas, motores, calefacción entre otras, liberará CO₂ y vapor de agua cerrando el ciclo; además los bioabonos provenientes del producto digerido son útiles para reconstruir o acondicionar suelos proporcionándoles nutrientes (M. Á. Barrena Gurbillón et al., 2019).

3.2.1 COCINAS A BIOGÁS

El biogás ha demostrado ser útil en remplazo del GLP al momento de cocer alimentos, ya que este no tizna ni humea; arde con llama azul y ha sido probado en diversos experimentos y en distintos lugares demostrando su efectividad; el consumo de biogás varían en función de la abertura de las perillas pero de acuerdo con un experimento desarrollado en función de los principales productos cocidos en las zonas rurales del Perú, se determinó que con una presión de 4,5 cm de agua o $4,356 \times 10^{-3}$ las dos hornillas funcionaron 7 horas a su máxima capacidad produciendo una llama de 50 cm, concluyendo que con uso moderado el tiempo de funcionamiento se extendería considerablemente; con ese conocimiento se realizaron varios ensayos en distintas regiones de la Amazonía del Perú, empezando en la comunidad de Santo Tomás, en donde se utilizó biogás en una cocina de 2 quemadores; el combustible fue generado durante 42 días y permitió el funcionamiento de las hornillas durante 5 horas diarias, tiempo suficiente para la cocción de alimentos, el mismo principio se aplicó en Tocache, en donde se adaptó una cocina industrial eliminando el niple que controla el ingreso de GLP, eso debido a que la presión de operación del biodigestor instalado es notablemente inferior ($9,6805 \times 10^{-3}$ ATM de biogás contra 2,5 ATM de GLP), se probó la cocina durante 2 horas, tiempo en el cual se consumió un aproximado de 2000 L de gas, de modo similar en Pomachoas, la producción de biogás con un tiempo de retención de 40 días, el cual funciona a 10 cm de presión de agua o a $9,6805 \times 10^{-3}$ tal como sucede en Tocache (M. A. Barrena Gurbillón et al., 2019; M. Á. Barrena Gurbillón et al., 2019).

Asimismo se pueden evidenciar los impactos positivos de la aplicación de biogás en la cocción para la mejora de la calidad de vida humana en investigaciones como la

aplicada en la comunidad rural de Cabaiguán, Cuba donde la implementación de un sistema de distribución de biogás benefició a 31 viviendas cuyo consumo diario promedio de este combustible fue de 1,5-1,7 m³/día permitiendo así la eliminación del uso de leña dentro de la cocción, lo que a su vez significó una erradicación del humo generado en la combustión de la leña permitiendo así por lo tanto la existencia de condiciones de trabajo y vivienda seguras con medidas sanitarias adecuadas para la prevención del desarrollo de enfermedades de las vías respiratorias.

De la misma forma, el impacto económico fue significativo, puesto que tanto la búsqueda, recolección y traslado de leña representaban un porcentaje elevado del salario de los miembros de la comunidad siendo así que la eliminación de este rubro contribuyó positivamente a la economía de los habitantes de Cabaiguán, Finalmente se concluyó dentro de los beneficios con el impacto ambiental, puesto que dentro de los resultados de este experimento se identificó que el consumo diario de este combustible permite eliminar la tala de hasta 24 hectáreas de bosque por año y evitar la emisión de porcentajes de metano de 59,8 t anualmente (López-Savran & Suárez-Hernández, 2018).

3.2.2 CALEFACCIÓN

Como ya se explicó con anterioridad, uno de los principales objetivos de esta investigación es proporcionar combustibles que se puedan aplicar de forma permanente como generadores de calefacción para los diversos hábitat que requieran de dichos equipos para afrontar las temperaturas de la Ciudad de Cuenca, siendo así como se ha demostrado en diversos estudios que este gas proveniente de la descomposición de materia orgánica puede emplearse para la generación de calor que al ser unido a redes de calefacción puede llegar a suplir recursos de mayor costo, por ende siendo así una vez más una de las tecnologías más accesibles desde el enfoque económico (Gazzo & Librandi, 2010).

Es así cómo se pueden tomar diversas referencias en cuanto a la efectividad de su aplicación, como lo es el ejemplo de Chiclayo, Perú donde los investigadores motivados por la necesidad de procesos que permitieran el tratamiento o en este caso, el aprovechamiento de aguas residuales decidieron emplear el biogás

obtenido de dichos recursos para la creación de sistemas de calefacción para las áreas de maternidad correspondientes para el ganado porcino de la fábrica “Rico Cerdo” misma empresa que proporciono la materia prima para la creación del biogás.

La creación de biodigestores en dicha investigación tenía como objetivo fundamental proporcionar energía a calefactores que cubrirían dos áreas de maternidad porcina con un total de 87 jaulas en un promedio de 11 horas diarias, los biodigestores utilizados fueron alimentados con un caudal máximo de $51,78 \text{ m}^3$ /día del cual se obtuvo posterior al filtrado de sulfuro de hidrógeno una cantidad total de $287,78 \text{ m}^3$ /día formado un 80% por metano y un 20% de CO_2 que energéticamente se traduciría a un valor mensual de 2760 kg GLP que fue exitosamente utilizado para cubrir el 100% de los requerimientos energéticos de las áreas de maternidad, siendo tan eficiente que incluso se reportó un excedente de $5\,719 \text{ m}^3$ /mes de metano y $690,72 \text{ m}^3$ /mes de CO_2 ; es importante acotar que ya que el poder calorífico neto o inferior del GLP comercial del Ecuador es de $8330,76 \text{ kcal/m}^3$ lo que equivale, al momento de buscar su reemplazo con biogás, el volumen que se requiera de biogás deberá ser mayor, esto considerando que su poder calorífico inferior es de 5140 kcal/m^3 , además esto será así siempre y cuando se cuente con una concentración de al menos el 60% de metano, en caso de concentraciones inferiores de metano este valor varía (INTA, 2011; LOJAGAS, 2017; Periche & Fernando, 2016).

3.2.3 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Finalmente, dentro de las principales aplicaciones del Biogás, es necesario mencionar su función dentro de motores de conducción, puesto que estos complejos sistemas capaces de convertir la energía química de los combustibles en movimiento, son utilizados de forma masiva alrededor del mundo, ya sea en el mundo de la industria, como también de forma cotidiana en los medios de transporte tradicionales.

Es así como lo explica Vanero en su manual del biogás, es posible su aplicación en el ámbito motriz, siempre y cuando este cumpla con una calidad similar a la del gas natural, por lo cual su aplicación es factible en motores de combustión interna que

funcionen a partir de gasolina o diésel, este combustible a pesar de tener desventajas en relación a los costos representados en el almacenamiento del gas, conversión de los motores, peso de los cilindros colocados posterior a la conversión del motor y el abastecimiento reducido debido a su baja distribución, podría llegar a solventar los problemas económicos y ambientales que representa el uso energía no sustentable, como lo son los combustibles fósiles (Arango Gómez et al., 2014; FAO, 2011).

Por consiguiente, se puede tomar como referencia varias investigaciones en las que se ha implementado el uso de biodigestores con el fin de reemplazar los combustibles convencionales con biogás, como lo es por ejemplo la investigación presentada en la Universidad Federal de Rio Grande Do Sul, dentro de la cual basados en un sistema de compresión de tres niveles de 10, 40 y 90 bar de presión se logró la obtención de biogás con un porcentaje de metano del 87% que fue implementado en dos fogones industriales y en los motores de biogás que se construyeron en la planta, demostrando así su efectividad para la sustitución de otros combustibles para motores de combustión así como también el este proceso de compresión solventaría algunas de las problemáticas antes mencionadas como el envasado y transporte del mismo, siendo así que podría llegar a contribuir a la activación de matrices energéticas con mayor efectividad y sostenibilidad (Souza & Schaeffern, 2013).

3.3 BIODIGESTORES

Los digestores biológicos o biodigestores son sistemas ecológicos diseñados para optimizar el proceso de producción de energía natural o biogás donde se aprovecha la fermentación anaerobia de las bacterias que se encuentran dentro de los desechos orgánicos optimizando la producción de este biogás, convirtiéndose así en una de las tecnologías naturales de la actualidad que permite la obtención de energía limpia y renovable pero que a diferencia de otras energías renovables se caracteriza también por ser accesible con bajos costos de producción (Arrieta, 2016; Castro, 2021; Rivas et al., 2010).

3.3.1 TIPOS DE BIODIGESTORES

Los biodigestores, como se mencionó antes, son fuentes de energía limpia que se utilizan para alimentar diversas maquinarias y equipos cuya aplicación abarca diferentes ramas industriales presentando incluso diversos usos dentro del medio doméstico, por lo cual su estructura y diseño puede ser bastante variado en relación a tamaño y estructura dependiendo de la materia prima disponible y cantidad de combustible requerido para la obtención de energía necesaria. Siendo así que la clasificación más común de biodigestores es la siguiente (Posada, 2021).

3.3.2 BIODIGESTOR DE GLOBO

El biodigestor de globo presenta una estructura de forma tubular que se encuentra formado principalmente de plástico que se encuentra completamente sellado donde se almacena el gas, presentando la válvula de salida del mismo en su parte superior, este tipo de biodigestor por su conformación se considera accesible desde el enfoque económico, así como su traslado y mantenimiento no representan un desafío, sin embargo, dentro de sus desventajas se debe considerar que tiene una vida útil corta (Corona, 2007; Posada, 2021).

3.3.3 BIODIGESTOR DE DOMO FIJO

El biodigestor de Domo fijo a diferencia del anterior, consiste en una estructura sólida y fija construido esencialmente con materiales de concreto o ladrillo, a esta se suma un tanque de condensación en el cual se da la mezcla del gas cuando esta llega a una presión determinada, este diseño se recomienda principalmente por sus costos accesibles así como también por las ventajas que ofrece su diseño en cuanto a la estabilización de las temperaturas, sin embargo, presenta frecuentes problemas de permeabilidad de los gases en la estructura de ladrillo (Corona, 2007; Posada, 2021).

3.3.4 BIODIGESTOR DE DOMO FLOTANTE

El biodigestor de domo flotante o tambor flotante consta de una estructura subterránea y un recipiente superficial móvil en el cual se almacena el gas, por lo cual con esta estructura el gas producido se almacena en el recipiente o tambor cuya altura será proporcional a la cantidad de gas que se almacene en él, por lo cual

adicional a su utilidad para evaluar la producción de gas, esta construcción de presión constante es de fácil manejo y construcción, sin embargo para este diseño es importante considerar los altos costos y su vida útil relativamente más corta en relación al diseño de domo fijo presentado anteriormente (Cardozo, 2019; Corona, 2007; Posada, 2021).

3.3.5 BIODIGESTOR DE TANQUE CSTR

Dentro de los tipos de biodigestores más comunes se tiene al biodigestor de tanque CSTR que como lo dice su nombre, está conformado por un tanque que se agita de forma homogénea presentado una importante ventaja sobre todo para la aplicación donde la retención de sólidos es igual al tiempo de retención hidráulico (Corona, 2007; Posada, 2021).

3.3.6 BIODIGESTOR DE FLUJO CONTINUO

En esta clase de biodigestores como su nombre lo indica, el flujo de materia orgánica es constante, por lo tanto, ese tipo de biodigestor requiere dentro de su estructura un biodigestor y un tanque de post digestión, así cuando se adicione sustrato, el tanque de post digestión recibirá la misma cantidad de materia orgánica, esto con el propósito de mantener constante el nivel del biodigestor, este tipo de biodigestores son adecuados para granjas (Cardozo, 2019; FAO, 2019).

3.3.7 BIODIGESTOR DISCONTINUO O EN *BATCH*

Esta clase de biodigestor trabaja generalmente con un biorreactor que se llena con estiércol y cosustratos, al inicio del proceso de digestión es sellando dicho biorreactor de forma hermética. Debido a su diseño la producción de biogás irá incrementando de manera paulatina hasta alcanzar su punto máximo para luego ir reduciéndose conforme las bacterias digieran la materia orgánica, entonces es cuando el biorreactor se abrirá para ser vaciado y llenado nuevamente. Este tipo de biodigestore es ideal para trabajo de laboratorio, cuando se desea evaluar si un tipo de sustrato es apto o no para producir biogás, no requieren de grandes volúmenes de materia orgánica y por su tamaño versátil son de fácil operación, lo que además permite la manipulación de diferentes variables (Cardozo, 2019; FAO, 2019; Jiménez, 2012).

3.3.8 BIODIGESTOR SEMICONTINUO

Este tipo de biodigestores son alimentados diariamente con cargas relativamente pequeñas en comparación con su capacidad de carga total; su estructura se caracteriza por tener una cámara de carga y una cámara de descarga cuyo efluente es igual al de la cámara de ingreso para mantener su volumen constante, debido a esto la producción de biogás es casi permanente, debido a su suministro constante de nuevos nutrientes para las comunidades bacterianas, por lo antes descrito este tipo de biodigestores son más empleados en el sector rural para su uso doméstico cuando se trata de digestores pequeños (FAO, 2019; Proaño Piñeiros & Toro Peralta, 2010).

3.4 FACTORES FÍSICO QUÍMICOS RELACIONADOS CON LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Como ya se mencionó anteriormente, estos sistemas ecológicos funcionan a partir de la degradación de desechos orgánicos que son generalmente obtenidos de excretas de origen humano o animal de industrias, o en este caso en particular, de las excretas provenientes de los animales tanto carnívoros como herbívoros del zoológico Amaru, siendo así que a partir de estos desechos se da la obtención de metano que como se explicará a continuación, es uno de los parámetros fundamentales para conocer la efectividad de los biodigestores, puesto que la producción de metano es clave para la utilización de este gas como energía (Rivas et al., 2010).

3.4.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL SUSTRATO

Para comprender como se puede llevar a cabo la construcción y más aún la optimización de los biodigestores, es necesario conocer los factores físico químicos relacionados con su producción, dentro de los cuales es necesario destacar a la composición química del sustrato, puesto que, gracias a los diversos estudios se ha podido identificar que la mayor obtención de sustratos necesarios para el funcionamiento de un biodigestor se obtienen a partir de materia orgánica húmeda

y excretas debido a que esta materia no contiene contaminantes, organismos patógenos o metales pesados que podrían representar un riesgo a futuro (Rivas et al., 2010).

Respecto de su composición química, existen dos elementos clave para la vida de los microorganismos, esto son el carbono y nitrógeno, mismos que son indispensables para la formación de ambientes propicios para el crecimiento de las bacterias productoras de biogás; en caso del carbono, este es utilizado como fuente de energía, mientras que nitrógeno ayuda a la formación de las estructura celulares, siendo la relación óptima entre 20:1 a 30:1 (Magaña R. et al., 2006; Rivas et al., 2010).

En general los diferentes tipos de materiales orgánicos presentan relaciones carbono nitrógeno variadas, que van desde el 13:1 en caso del estiércol porcino hasta el 25:1 en caso de el estiércol bovino, este contraste se debe a distintos factores, tales como la dieta del animal, tipo de digestión e incluso pueden variar en función del tiempo de recolección del sustrato, ya que por ejemplo el estiércol de vaca expuesto por tiempo prolongado a la digestión aerobia puede presentar una relación carbono nitrógeno muy pobre (FAO, 2011; INTA, 2011).

3.4.2 COMBINACIÓN DE SUSTRATOS

Diversos estudios adicionan también a los factores químicos de la producción de biogás el análisis de la necesidad de combinar diversos sustratos con el fin de potenciar los resultados mediante un balance de la proporción de los nutrientes obtenidos a partir de su descomposición, puesto que, la relación carbono-nitrógeno varía según la masa orgánica utilizada (Noacco et al., 2021).

En general, se considera que una mezcla de estiércol herbívoro y carnívoro puede producir biogás de alta calidad. La razón es que el estiércol herbívoro es rico en carbohidratos y fibra, mientras que el estiércol carnívoro es rico en proteínas y grasas. La combinación de estos dos tipos de estiércol puede proporcionar una fuente equilibrada de nutrientes para las bacterias que producen biogás en el digester anaeróbico. Siendo así que dentro de esta investigación al implementarse materia orgánica obtenida tanto de animales carnívoros como herbívoros se pretende analizar esta variable para la obtención de resultados más eficaces para la aplicación

del biogás como combustible para calefacción como se explicará más adelante en esta investigación (Noacco et al., 2021; Rivas et al., 2010).

3.4.3 TEMPERATURA

En cuanto a los factores físicos es de suma relevancia comenzar con el análisis de la temperatura, ya que a pesar de que el proceso de biodigestión anaerobia se puede llevar a cabo en un amplio rango de temperaturas que puede variar desde 5 °C hasta los 60 °C, se ha demostrado que ciertas bacterias tienen un mayor grado de sensibilidad frente a las temperaturas que otras, enfocándonos dentro de esto en las bacterias metanogénicas, indispensables, como lo dice su nombre, para la producción de metano dentro del proceso de biodigestión (Sallo, 2014).

Esto se debe a que las bacterias metanogénicas presentan una velocidad de crecimiento menor requiriendo de temperaturas cálidas para potenciar la degradación de los residuos orgánicos, siendo así que ante temperaturas un poco más elevadas de lo regular se puede mantener su funcionamiento de forma estable, sin embargo, en temperaturas bajas las bacterias metanogénicas retardan la producción de metano, mientras que las bacterias acidificantes no se ven afectadas por lo cual existe una acumulación de ácidos que podría llegar a deteriorar el biodigestor (Sallo, 2014).

Así se puede diferenciar la temperatura de acuerdo con el tipo de bacterias que predominan en cada una de las etapas en tres rangos, mismos que se explican en la tabla 4, resaltando la temperatura de trabajo óptima para cada uno de los rangos posibles de operación. Es importante mencionar que el régimen mesofílico de operación es el más utilizado, siendo de los tres el que presenta mayor estabilidad (FAO, 2011; INTA, 2011; Sallo, 2014).

Tabla 4

Rangos de temperatura por especie de bacteria.

Bacterias	Psicrófilas	Mesófilas	Termófilas
Rango de temperatura (°C)	<20	20-45	>45
Sensibilidad (°C/h ₀)	±2	±1	±0,5
Rango mínimo (°C)	4-10	15-20	25-45
Rango óptimo (°C)	15-18	25-35	50-60
Rango máximo (°C)	20-25	35-45	75-80
Tiempo de fermentación (días)	>100	30-60	10-15

Nota: h₀= Hora, °C= grados centígrados. Tabla elaborada por el investigador basada en FAO, 2011; INTA, 2011.

3.4.4 PH

Otro de los factores físicos a considerar como un parámetro representativo es el pH, puesto que, este ejerce una gran influencia en la estabilidad durante la producción del biogás, debido principalmente a su relación con el mantenimiento de las colonias bacterianas, además, la alcalinidad trabaja como amortiguador previniendo los cambios rápidos en el pH (Linares et al., 2017).

Por otro lado, cada uno de los diferentes microorganismos presentes en un biodigestor representan un rango diferente en relación a este parámetro, por ejemplo una actividad enzimática aceptable de bacterias productoras de ácidos ocurre arriba de 5,0 pH, pero una actividad enzimática aceptable de bacterias productoras de etanol no ocurre por debajo de 6,2 pH y finalmente la mayoría de las bacterias anaeróbicas, incluyendo las bacterias metanogénicas, trabajan apropiadamente dentro del rango de 6,8 a 7,2 (FAO, 2011).

Por lo tanto, el pH en un digestor anaeróbico inicialmente descenderá con la producción de ácidos volátiles, posteriormente, como las bacterias productoras de metano consumen los ácidos volátiles y la alcalinidad es producida, el pH del digestor incrementará para luego estabilizarse; en consecuencia se ha unificado los valores de referencia para definir un rango en el que se puedan considerar como seguros a los valores de pH para el ecosistema microbiano, encontrándose este

rango entre 6,5 y 7,5. Por lo tanto, si el pH varía ya sea a valores ácidos o alcalinos, se afectan las colonias dentro del biodigestor y, por lo tanto, la cantidad de metano producida se ve afectada en valores ácidos y la producción de bacterias acidogénicas disminuirá en pH alcalino (FAO, 2011; Sallo, 2014).

En caso de que las materias primas posean un pH fuera del rango ideal ($\text{pH} < 6$ o $\text{pH} > 9$) para la operación del digestor, este puede ser ajustando con la adición de un ácido como por ejemplo el vinagre o una base, preferentemente, soda cáustica o hidróxido de sodio, con la finalidad de acercar el sustrato al pH 7 (Linares et al., 2017).

3.4.5 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES

De igual forma, dentro de los factores relacionados con el desarrollo de biodigestores, es importante considerar los niveles de sólidos totales, puesto que, la materia obtenida a partir de los restos residuales, así como toda la materia en general, se encuentra conformada por una fracción líquida de agua y una sólida, que en el caso de la aplicación como materia prima para los biodigestores toma una gran relevancia, ya que el porcentaje de su aplicación es proporcional a los resultados que se pueden obtener, debido a que los sólidos, o mejor dicho, su exceso, son limitantes para el movimiento y, por lo tanto, funcionamiento, de las bacterias productoras de metano, por consiguiente, gracias a diversos estudios se ha podido llegar a valores de referencia que manifiestan que los valores de sólidos totales óptimos para el mantenimiento de biodigestores se encuentran entre un 8 a 12% cuando estos son continuos, y, 40 a 60% de sólidos totales en los biodigestores discontinuos (FAO, 2011).

3.4.6 INHIBIDORES DEL PROCESO FERMENTATIVO

Así como existen factores que favorecen la producción del biogás, de igual manera existen una serie de elementos que en determinadas concentraciones pueden inhibir e incluso interrumpir el proceso fermentativo, estos elementos pueden elevar la inactividad de los microorganismos anaerobios, dicha inactividad se traduce en una reducción en la producción del biogás ya que estas sustancias por su naturaleza tóxica alteran la cinética de degradación de la materia orgánica. La

magnitud del efecto está en relación con la naturaleza, así como la concentración de la sustancia inhibitoria (FAO, 2011; Villagómez & Borges, 2002).

Los principales compuestos tóxicos que afectan el proceso fermentativo son: metales pesados, metales alcalinos y alcalinotérreos, sulfatos y amonio; de estos los sistemas anaerobios son particularmente vulnerables a altas concentraciones de metales pesados siendo capaces de detener por completo la producción de biogás, sin embargo es importante señalar que dichos metales causarán fallas en el sistema anaerobio siempre y cuando se encuentre en forma de iones libres, por lo que, una manera de combatirlos es mediante su precipitación como sales de sulfato o sales de carbonato, esto con excepción del hierro y el cromo (Villagómez & Borges, 2002). En la tabla 5 se presentan valores de concentraciones de ciertos inhibidores comunes.

Tabla 5

Concentraciones de compuestos inhibitorios del proceso fermentativo

Sustancia	Concentración inhibitoria (mg/L)
Sodio (Na)	8000 mg/L
Potasio (K)	12000 mg/L
Calcio (Ca)	8000 mg/L
Magnesio (Mg)	3000 mg/L
Cobre (Cu)	200 mg/L (total) - 0,5 mg/L (soluble)
Cromo Hexavalente (Cr VI)	50-70 mg/L (total) - 3 mg/L (soluble)
Cromo (Cr III)	200-260 mg/L (total)
Níquel (Ni)	180-420 mg/L (total) - 2 mg/L (soluble)
Zinc (Zn)	30 mg/L (total) - 1 mg/L (soluble)
Nitrato (NO ₃)	0,05 mg/mL
ABS (Detergente sintético)	20-40 mg/L
Sulfato (SO ₄)	5000 ppm
Cloruro de sodio (NaCl)	40000 ppm

Nota: Tabla elaborada por el investigador basada en FAO (2011); Villagómez & Borges (2002)

3.5 PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS

Después de analizar toda la teoría relacionada con el diseño e implementación para la obtención de biogás, se debe considerar que este producto inicial generado por la digestión anaerobia antes mencionada, no está formado únicamente por el CO_2 en una proporción considerablemente baja y metano que son indispensables para su aplicación energética, sino que, este biogás posee otros gases contaminantes como ácido sulfhídrico, óxidos de nitrógeno, nitrógeno gaseoso e hidrógeno, dado que algunos de estos gases mencionados son nocivos a la exposición humana así como para el ambiente en general, se vio la necesidad de implementar sistemas de purificación del gas (Varnero et al., 2012).

Existen varios estudios en los que se ejemplifican los diversos métodos efectivos para llevar a cabo el proceso de purificación del gas, teniendo en cuenta que, al igual que con los materiales y estructura, la implementación de estos métodos se debe tanto a los recursos como disponibilidad y diseño del biodigestor, a pesar de todas estas opciones, se deben considerar características generales indispensables para que estos procesos de purificación del biogás puedan ser viables, siendo el primer paso para la purificación, el retiro de partículas sólidas y líquidas arrastradas por la presión generada por la corriente de gas. Una vez llevado a cabo este proceso se puede continuar con la extracción de los compuestos gaseosos contaminantes, especialmente del ácido sulfhídrico (H_2S), puesto que entre los gases contaminantes mencionados este destaca por su capacidad corrosiva y toxicidad para los humanos (Posada, 2021; Varnero et al., 2012).

3.5.1 TRATAMIENTOS FÍSICOS

Una vez comprendida la necesidad de la purificación del biogás tanto desde el punto de vista energético como también de la bioseguridad que representa, es importante conocer los diversos procesos físicos que se deben llevar a cabo para la purificación, destacándose la absorción sobre todo de ácido sulfhídrico basándose en las propiedades selectivas de absorción mediante procesos como las soluciones de aminas, cuyo grupo amino conjugado a los gases contaminados forma compuestos de hidrógeno carbonato, amoniaco y azufre. Por otro lado, para compuestos más

accesibles económicamente, se incorporan diversos compuestos entre los cuales se destaca el hidróxido de hierro, óxido de hierro, carbón activo y gel de sílice, siendo estos últimos los implementados dentro de esta investigación como se verá más adelante en el análisis de resultados (Posada, 2021; ROJAS, 2022)

De la misma manera dentro de los procesos físicos que se deben considerar se encuentra el tratamiento mediante filtrado, puesto que, mediante la utilización de filtros de membrana se puede llegar a separar los componentes de gas y esto se debe a que, dependiendo del tipo de membrana utilizada, se obtiene una permeabilidad específica hacia los gases contaminantes que se movilizan gracias a la fuerza motriz generada por las diferencias de presión dentro del biodigestor, permitiendo así que se pueda llevar a cabo una separación de los compuestos contaminados de forma eficaz, pero no accesible debido a los altos costos que implica la aplicación de las membranas (Varnero et al., 2012)

3.5.2 TRATAMIENTOS QUÍMICOS

A diferencia de los procesos físicos, los procesos químicos se implementan mediante sistemas de absorción química realizados mediante lavados a presión contracorriente del agua o también a través de reactivos alcalinos cuya función es reaccionar con los gases de composición ácida mediante soluciones como absorbedor que se presenta pobre en amoníaco, de sorbedor o generador con una función opuesta a la del absorbedor con una concentración elevada de amoníaco y un condensador entre otros que a pesar de su gran efectividad, son de un acceso limitado debido al alto costo y complejidad de proceso que representa su implementación (Posada, 2021; Sanchez, 2021).

3.5.3 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS

Una vez explicado los procesos físicos y químicos generales aplicados a la purificación del biogás, es importante comprender opciones alternativas para este dentro de lo cual se encuentran los tratamientos biológicos también llamados biofiltración, cuya aplicación se centra en la exposición a medios biológicamente activos como por ejemplo de bacterias de sulfuro oxidantes, siendo así que los principales procesos biológicos que se manejan en la actualidad son procedimientos

de oxidación que como ventaja adicional presentan costos y una complejidad de implementación mucho menor a los procedimientos antes mencionados (Brunet-Ramos et al., 2021).

3.6 ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Una estimación de la productividad de biogás es un punto de partida para conocer la viabilidad de un sustrato, entendiendo al cálculo de la productividad como la cantidad de gas generado en una unidad de tiempo y, en relación a la materia contenida por el reactor, hoy en día existen numerosas tablas y datos que expresan la cantidad de biogás que se puede obtener a partir de diferentes sustratos, esta información se logra a partir de bioensayos de gasificación en *batch*, sin embargo aunque dichos datos son válidos para el cálculo de estimaciones, hay que ser cautelosos al aplicarlos ya que la calidad de la materia prima puede variar enormemente (Abdeshahian et al., 2016; FAO, 2019).

Por lo descrito previamente es aconsejable evaluar el sustrato de interés a escala del laboratorio, previo a estimar su productividad, con esta información, se pueden aplicar una serie de metodologías para determinar la viabilidad una materia prima, cada metodología considera distintos parámetros, pero en general es requerido el volumen de biogás producido por unidad de tiempo (Abdeshahian et al., 2016; FAO, 2019).

Una metodología ampliamente utilizada por su simplicidad es la de Sogari (2003), quien propuso la formulación para estimar el potencia de producción de biogás con sustratos de origen animal y vegetal. De acuerdo con la autora la expresión matemática que permite calcular la productividad máxima (P_{max}) es la siguiente:

$$P_{max} = \frac{V_{CH_4}}{V_R * T} \quad (1)$$

Donde V_{CH_4} corresponde al volumen de metano generado; V_R corresponde al volumen de materia dispuesta en el reactor y T es el tiempo considerado.

Dado que la producción metanoica está limitada principalmente por la naturaleza de la materia orgánica dispuesta en el digester, la expresión matemática que

permite estimar la máxima producción (M_{max}) de gas metano para un producto determinado es:

$$M_{max} = \frac{V_{CH_4}}{S_{org.tot}} \quad (2)$$

Donde V_{CH_4} corresponde al volumen de metano generado y $S_{org.tot}$ corresponde a la cantidad total de materia orgánica introducida en el proceso (Sogari, 2003).

Pese a que esta metodología es simple, para una evaluación más certera del potencial de un sustrato es importante considerar o bien los sólidos volátiles o los sólidos totales dentro de las estimaciones, ya que si se toman solo los valores de la materia prima, ya sea fresca o húmeda se pueden cometer errores, mientras que si se consideran los sólidos, la humedad del material orgánico queda desestimada y el valor puede asemejarse más a la realidad, una ecuación que permite determinar el potencial teórico del biogás se describe a continuación:

$$PTB = E_{tot} \times S_{tot} \times E_{tb} \quad (3)$$

Donde E_{tot} cantidad de estiércol en kilogramos, S_{tot} es la proporción de sólidos totales del estiércol animal, y E_{tb} es la cantidad de biogás estimada producida por kg de sólidos totales (FAO, 2019; Wang et al., 2021).

Si bien es cierto no existe un procedimiento general para la evaluación de un combustible cuando de la sustitución del mismo se trata, dentro de las metodologías para evaluar la posibilidad de su sustitución se encuentra la metodología descrita por la International M. G. M., 2018; en donde tomando en cuenta el poder calorífico inferior tanto del combustible a reemplazar como su remplazo, más su consumo en un tiempo determinado, es posible determinar la cantidad de combustible equivalente para suplir las necesidades energéticas a futuro, esto se consigue con las fórmulas descritas a continuación

$$CEA = CA \times PCI^1 / 1.000.000 \quad (4)$$

$$CcE = CEA \times 1.000.000 / PCI^2 \quad (5)$$

Donde CEA es el consumo de energía actual, CA es el consumo de combustible actual en unidades de volumen sobre tiempo, PCI^1 Poder calorífico Inferior del

combustible actual, por otra parte, CcE es el consumo de combustible equivalente futuro, y PCI^2 Poder calorífico Inferior del combustible futuro.

Si se analiza previamente las características químicas y físicas del combustible actual y futuro y su impacto sobre el área donde se desea implementar así como su disponibilidad, costos de operación y mantenimiento, es posible evaluar si el planteamiento es posible o no (International M. G. M., 2018).

4 MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1 DESCRIPCIÓN DEL LUGAR

El estudio de la producción de biogás se desarrolló en el Bioparque Amaru Cuenca, el cual posee una superficie de 8 hectáreas (anexo 1).

El bioparque se encuentra ubicado en el sector de Rayoloma - Monay, perteneciente a la parroquia Paccha, al costado oriental de la ciudad de Cuenca, Cantón Cuenca, Provincia Azuay-Ecuador.

Localización:

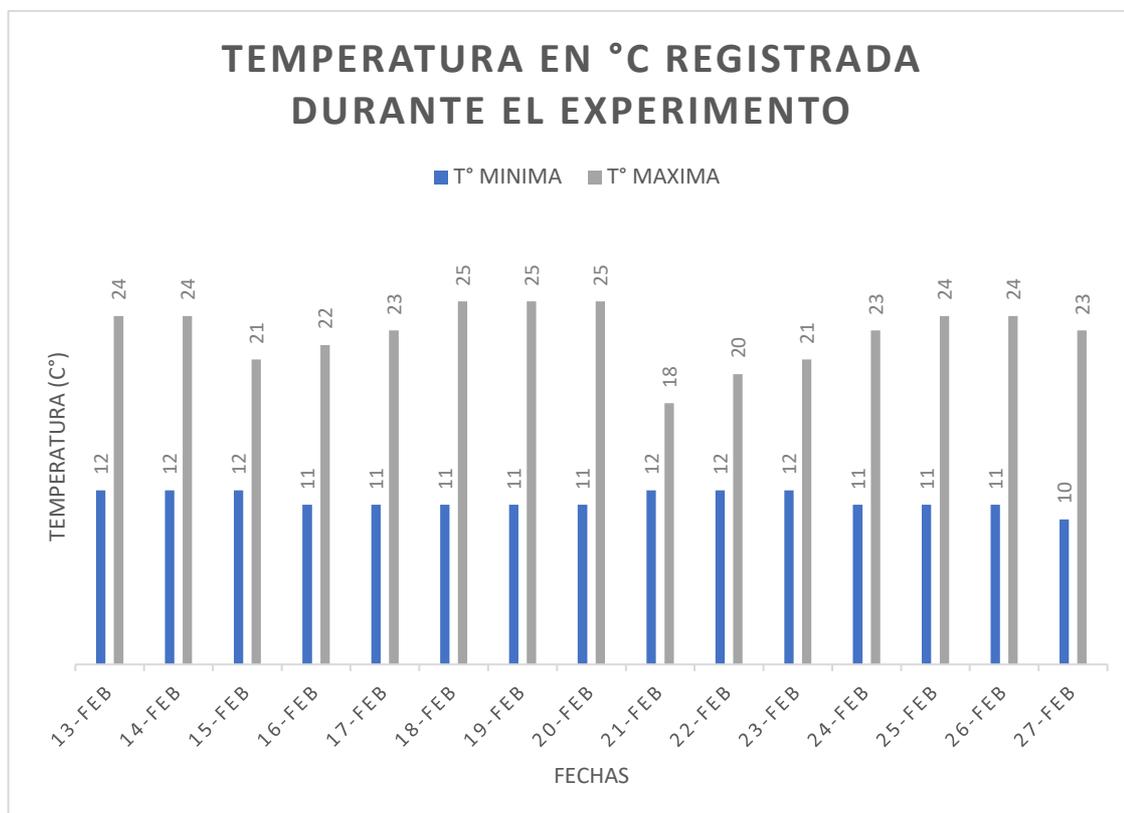
ESTE	727480 m
NORTE	9679669 m
ALTURA	2613 m

Fuente:(*Google Maps*, 2022)

La temperatura de la ciudad, registrada durante el periodo experimental se puede observar en la figura 1, la temperatura mínima y máxima registrada durante el experimento fue de 10 °C y 25 °C respectivamente.

Figura 1

Temperatura registrada durante el periodo en el que se desarrolló el experimento



Nota: Figura elaborada por el investigados basada en INAMHI, (s. f.)

4.2 LEVANTAMIENTO DE LA LÍNEA BASE

4.2.1 DETERMINACIÓN DE LA POBLACIÓN

El bioparque Amaru cuenta con aproximadamente 2000 animales distribuidos en 3 zonas, denominadas zona alta, zona media y zona baja. Para determinar la cantidad de estiércol que produce el bioparque para las respectivas estimaciones a futuro, fue necesario definir qué animales mamíferos formarían parte del experimento, para ello se desarrolló un recorrido ordenado y sistemático, apoyado con personal del bioparque, esto con el fin de seleccionar a los animales tomando en cuenta dos criterios:

- Factibilidad de recolección del estiércol en el cubil
- Factibilidad de aislamiento del animal para limpieza de recinto y recolección del estiércol

Una vez definido el grupo de animales, estos se clasificaron en carnívoros y herbívoros de acuerdo con el alimento que más consumen dentro de su dieta, para ellos se pesó y clasificó el alimento ingerido por cada grupo durante una semana.

4.2.2 PESAJE DEL ESTIÉRCOL

Con el fin de conocer la cantidad promedio de estiércol producido por los animales seleccionados, se realizó el pesaje del estiércol recogido tanto en los cubiles como en los recintos de los animales que así lo permiten, por un periodo de una semana, teniendo presente que algunos recintos reciben asistencia (limpieza profunda) una vez por semana y otros dos veces por semana, ver anexo 2.

4.2.3 ELABORACIÓN DE LA MEZCLA DE HERBÍVOROS Y CARNÍVOROS

Tomando en cuenta que cada animal considerado dentro del experimento produce una cantidad de estiércol diferente, para preparar la mezcla compuesta de los animales perteneciente a la familia de los herbívoros así como a los pertenecientes a la familia de los carnívoros, se calculó el porcentaje que le correspondía de un 100% absoluto a cada animal, buscando que la proporción obedeciera a la realidad del bioparque, así las estimaciones no serían sesgadas por una mezcla al azar, por lo que para cada familia se respetó el porcentaje calculado, siendo así, los porcentajes en relación de pesos obtenidos por cada especie se esquematizaron para determinar su utilización en relación a estos parámetros tal y como se puede observar en la tabla 7.

Una vez determinado el peso que le correspondía a cada especie para la formulación de la mezcla, se procedió a recolectar en fundas herméticas una porción de estiércol de todas las familias de animales consideradas para el experimento).

Las muestras compuestas de cada familia se almacenaron en un refrigerador portátil para evitar su descomposición, una vez en el laboratorio, se pesó y posteriormente se homogenizó cada mezcla obteniendo una muestra representativa de cada familia (herbívoros y carnívoros) para proceder con los respectivos análisis de su composición, más específicamente la determinación de sólidos totales y la relación carbono nitrógeno (anexo 3).

4.2.4 DETERMINACIÓN DE LOS SÓLIDOS TOTALES

Para la determinación de sólidos totales se preparó cuatro muestras compuestas, dos correspondientes a la mezcla de los carnívoros y otras pertenecientes a la mezcla de herbívoros, estas mezclas de estiércol fueron analizadas en el laboratorio de Ciencias de la Vida de la Universidad Politécnica Salesiana para conocer la proporción de sólidos totales (ST), estos se determinaron aplicando el método normalizado INEN 382, las condiciones ambientales no son críticas para la realización de este análisis, y su desarrollo se describe a continuación.

Equipos y materiales:

- Cápsulas de evaporación adecuadas al volumen de la muestra
- Estufa
- Desecador con sílice azul como indicador colorimétrico de humedad
- Balanza analítica
- Agitador magnético
- Placa calefactora
- Probetas de diferentes volúmenes

Procedimiento:

Preparación de la cápsula de evaporación:

- Encender la estufa a 103-105 °C.
- Introducir una cápsula limpia durante una hora.
- Llevar la cápsula al desecador hasta que se vaya a emplear.
- Pesarla inmediatamente antes de usar y registrar el dato (Peso A).

Determinación de sólidos totales:

- Esperar que la muestra se encuentre a temperatura ambiente.
- Seleccionar el volumen de muestra de acuerdo con el aspecto de la misma.
- Mezclar bien la muestra y depositar el volumen seleccionado en la cápsula de evaporación previamente tarada.

- Colocar la cápsula en una placa calefactora y evaporar la muestra hasta casi sequedad, pero evitando ebullición y salpicaduras.
- Llevar la muestra evaporada a la estufa a 103-105 °C por 1 hora.
- Enfriar la cápsula en el desecador.
- Pesar rápidamente para evitar cambios en el peso por exposición al aire y/o degradación del residuo y registrar los datos.
- Repetir el calentamiento sólo por 1 hora, hasta que la diferencia con la pesada previa sea <4% ó < 0.5 mg seleccionando el valor que resulte menor, con lo cual se considera se obtuvo peso constante.
- El peso finalmente obtenido es Peso m1.

Cálculos y presentación de resultados

Con la aplicación de la metodología descrita previamente se obtienen los datos de entrada de la fórmula que permitió conocer los sólidos totales contenidos en ambas muestras.

$$ST = \frac{m_1 - m}{m_2 - m} \times 100 \quad (6)$$

Donde:

m= Peso cápsula vacía

m2= Peso cápsula + muestra

m1= Peso cápsula + muestra después de la mufla

Para el peso m1, se empleó el promedio de los dos valores que cumplan el requisito de peso constante antes enunciado, el procedimiento se realizó por duplicado en cada muestra para disminuir el error.

4.3 DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN CARBONO NITRÓGENO

Para la determinación de la relación carbono nitrógeno (C/N) de las mezclas compuestas de estiércol carnívoro y herbívoro, se analizaron cuatro muestras, las

cuales fueron pesadas y homogenizadas en el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana, posteriormente dos de estas muestras se enviaron al laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Cuenca en donde mediante el método de espectrofotométrico y método Kjeldahl se determinó el nitrógeno total realizando los respectivos cálculos; por otro lado, el carbono total fue determinado en un laboratorio particular de la ciudad de Riobamba, en donde se utilizó de manera simultánea los métodos de Walkley Black y oxidación ácida, mediante los cuales se determinó el carbono total de las muestras, con estos valores se procedió a calcular la relación C/N del estiércol carnívoro y herbívoro respectivamente.

4.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental de mezcla se llevó a cabo con un diseño centroide simplex (DSC), que consiste en una línea que valorar todo el universo de posibilidades de mezcla de los dos sustratos evaluados, con un grado de confianza del 95%, se corrieron los datos en orden aleatorio para eliminar el sesgo, todo en un solo bloque, para evaluar el estiércol de herbívoros (H) y estiércoles carnívoros (C), mediante cinco tratamientos, cada uno con tres repeticiones; en total 15 unidades experimentales (ver Tabla 6), todas las unidades experimentales serán evaluadas en 2 rangos de tiempo, a los 7 y 15 días. Las unidades experimentales tenían una capacidad de llenado de materiales a degradar de 500 mililitros, cada tratamiento con porcentajes diferentes de estiércol herbívoro y carnívoro, del total de carga los valores variaron entre los siguientes porcentajes: herbívoro (100%), herbívoro-carnívoro (75%-25%), herbívoro-carnívoro (50%-50%), herbívoro-carnívoro (25%-75%), y carnívoro (100%), mientras que la cantidad de agua permaneció constante en una proporción 2:1. Para la obtención de los resultados estadísticos este diseño se llevó a cabo dentro de un *software* de ingeniería.

Tabla 6

Mezclas de cada tratamiento dentro del experimento

Tratamientos	T1	T2	T3	T4	T5
Porcentajes	H (100)	HC (75/25)	HC (50-50)	HC (25-75)	C (100)

Nota: T= tratamiento, H = herbívoro, C= carnívoro, CH (mezcla herbívoro carnívoro)

Tabla elaborada por el investigador de acuerdo con el diseño experimental

Adicionalmente para conocer si el volumen acumulado de todos los tratamientos tiene una diferencia significativa entre ellos, se aplicó el test paramétrico conocido como t de student, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, tomando como hipótesis nula ($H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$) que no hay diferencia significativa entre los tratamientos y como hipótesis alternativa ($H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$) que si hay diferencia significativa entre los tratamientos, el análisis estadístico entre tratamiento se realizó de la siguiente manera T1-T2, T1-T3, T1-T4, T1-T5, T2-T3, T2-T4, T2-T5, T3-T4, T3-T5, T4-T5; para la obtención de los resultados estadísticos este diseño se llevó a cabo dentro de un *software* de ingeniería.

4.5 CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE LOS BIODIGESTORES

Para la construcción de los biodigestores se utilizó un modelo tipo *batch* o discontinuo, en donde se consideraba la carga total al inicio del proceso y su descarga una vez la producción de biogás ha cesado, por lo mencionado este sistema es ideal para utilizarlo a nivel de laboratorio ya que permite evaluar parámetros de generación de gas y comportamiento de los residuos orgánicos, además su construcción y carga son sencillos de realizar, y para la determinación del volumen (mL) de biogás se utilizó el método de desplazamiento de agua, colocando una manera de salida dentro de una muestra graduada para cada reactor (Proaño Piñeiros & Toro Peralta, 2010; Tahir et al., 2015).

4.5.1 MATERIALES

Para la construcción del biodigestor se utilizó los siguientes materiales:

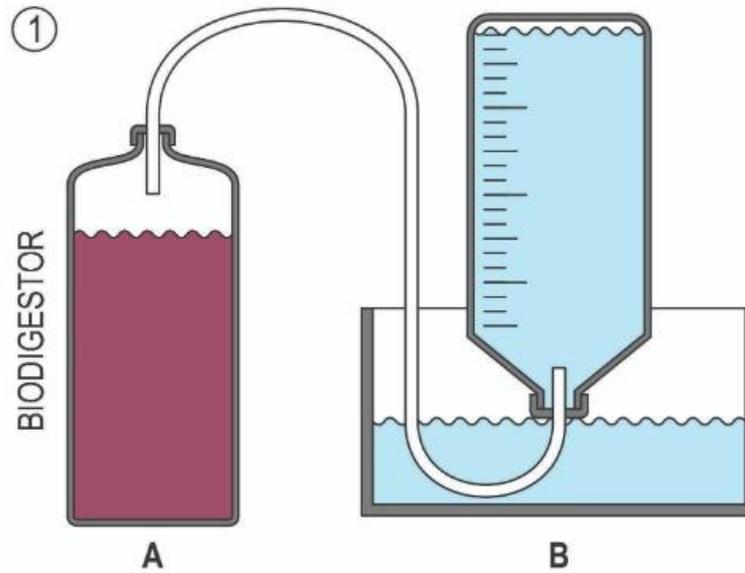
- Botella de plástico de boca ancha, con una capacidad de 0,5 litros
- Botella de plástico de boca angosta, con una capacidad de 0,5 litros
- Bolsa de muestreo Tedlar, con una capacidad de 1 litro
- Funda de suero vacía, con una capacidad de 1 litro
- Manguera para venoclisis
- Tina plástica
- Cubeta de plástico

4.5.2 CONSTRUCCIÓN

Para la construcción de cada biodigestor en primer lugar se realizó las perforaciones en las tapas de las botellas de boca ancha para el ingreso de las mangueras, una vez instaladas las mangueras, se procedió a pegar cada una con silicón buscando la hermeticidad. Posteriormente se procedió a graduar cada 20 mL hasta completar los 300 mL todas las botellas de boca angosta, a continuación, dentro del recipiente plástico se colocó la bandeja plástica y se perforó dicha bandeja con el fin de contener las botellas sobre el nivel del agua; en el figura 2 se presenta un diagrama esquemático del biodigestor tipo *batch* utilizado, en ella se puede observar como la botella A contiene la materia orgánica a degradar, mientras la botella B se encuentra llena de agua, en la figura 3 se puede distinguir que a medida que en la botella A se genera biogás, este se desplaza a través de la manguera e ingresa en la botella B, desplazando el agua, así el volumen de biogás generado es directamente proporcional al volumen de agua que se desplaza, y con ello es posible cuantificar la producción del mismo.

Figura 2

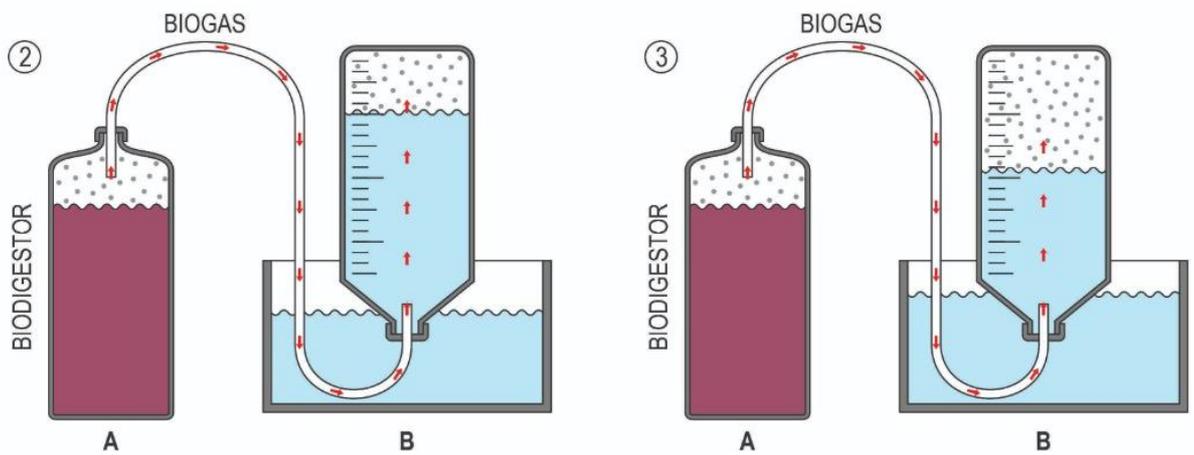
Esquema del biodigestor tipo *batch*.



Nota: Figura elaborada por el investigador.

Figura 3

Esquema del funcionamiento y cuantificación del biogás



Nota: Figura elaborada por el investigador.

4.5.3 CARGA DE LOS BIORREACTORES Y EVALUACIÓN DEL CURSO DE LA REACCIÓN

Para la obtención del biogás la materia prima utilizada en los biorreactores fue de similares características a la manejada para los análisis de laboratorio, la mezcla preparada siguió el mismo esquema porcentual respetando el peso por especie.

Se construyó un total de veinte biorreactores, quince para determinar el volumen de metano por tratamiento y cinco para determinar la concentración de metano, para ello se recolectó estiércol fresco de todos los animales considerados para el estudio y posterior a ello se pesó cada muestra con la finalidad de preparar dos recipientes de 3,5 kg, cada uno con la mezcla compuesta de carnívoros y herbívoros respectiva de acuerdo con el peso descrito en la tabla 7; una vez homogenizadas las mezclas se procedió a preparar las tres mezclas faltantes: herbívoro-carnívoro (75%-25%), herbívoro-carnívoro (50%-50%), herbívoro-carnívoro (25%-75%).

Tabla 7

Porcentajes y pesos de estiércol de animales herbívoros y carnívoros para la preparación de la mezcla

Carnívoros	Porcentaje (%)	kg
Mapache	15,25	0,53
Cuchucho	6,36	0,22
Jaguar	8,47	0,30
Ocelote	4,24	0,15
Tigrillo Margay	2,12	0,07
Leones	46,61	1,63
Pumas	6,36	0,22
Lobo de páramo	8,47	0,30
Tigrillo	2,12	0,07
Total	100	3,5
Herbívoros	Porcentaje (%)	kg
Llamas	39,77	1,39
Yamala	3,41	0,12
Osos	5,68	0,20
Mono Capuchino	1,14	0,04
Mono Chorongo	3,41	0,12
Pecaríes	3,41	0,12
Caballos	43,18	1,51
Total	100	3,5

Nota: Pesos correspondientes a la mezcla para el llenado de los reactores de acuerdo con el porcentaje levantado en la línea base. Tabla elaborada por el investigador de acuerdo con la información recolectada en campo.

Con las cinco mezclas homogenizadas en sus respectivos recipientes, se procedió a pesar 150 g para cada uno de los quince biorreactores de 500 mL y 200 g para los cinco reactores de 750 mL. Una vez llenados los biorreactores con estiércol se midió y agregó 300 mL de agua a cada uno de los quince biorreactores de 500 mL y 400 mL de agua a los cinco reactores de 750 mL cumpliendo con la relación 2:1 agua/biomasa, todos los biodigestores quedaron con un 10% de espacio libre con el propósito de que funcionara como cámara de gases.

Previo a cerrar los biorreactores se midió el pH para constatar que todas las mezclas estuviesen dentro del rango ideal descrito en el marco teórico.

Una vez cerrados todos los biorreactores, los quince primeros se colocaron alrededor de la tina que contenía las quince botellas graduadas y llenas de agua para medir el volumen de gas generado por biorreactor, mientras tanto las cinco botellas restantes se conectaron a una funda de suero vacía hasta determinar la mezcla ideal, y una vez conocida la mezcla ideal, esta fue conectada a una funda Tedlar estimando el día pico de producción de biogás para la recolección de la muestra respectiva. Se determinó un monitoreo de, al menos una vez por día durante un periodo comprendido por 15 días.

En las tablas de la ocho a la doce se describe el contenido de estiércol relativo a cada especie, en cada una de las mezclas preparadas por tratamiento, en el anexo 4 se presenta un registro fotográfico de la fase experimental.

4.6 DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO

Posterior al análisis de varias metodologías para la estimación de la producción de biogás aplicadas a distintos sustratos, se decidió aplicar las fórmulas tres, cuatro y cinco descritas en el marco teórico, usando como criterio de decisión la disponibilidad de información de los datos de entrada para ambas fórmulas.

Así la información utilizada para determinar el potencial teórico de biogás correspondió a la cantidad de estiércol en kilogramos (E_{tot}), la proporción de sólidos totales ($Stot$), y la cantidad de biogás producida por kg de sólidos totales (E_{tb}), por otra parte, para evaluar la sustitución del GLP por biogás se utilizó CA es el consumo de GLP del bioparque en un periodo de 15 días, PCI^1 Poder calorífico Inferior del GLP obtenido de LOJAGAS, 2017, por otra parte, y PCI^2 Poder calorífico del biogás de una muestra de biogás de la mezcla que mayor volumen generó en la fase experimental.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 LÍNEA BASE DEL EXPERIMENTO

El bioparque Amaru cuenta con aproximadamente 8 hectáreas, lugar en donde alberga alrededor de 2000 animales repartidos entre especies de reptiles, anfibios, aves y mamíferos. Ya que el presente trabajo sólo consideró los mamíferos, luego de realizar el recorrido, se determinó que de los 42 recintos del bioparque, 20 corresponden a mamíferos y de estos únicamente 16 recintos son aptos para la recolección y el aprovechamiento del estiércol para la producción de biogás, estos recintos se encuentra distribuidos a lo largo de bioparque, nueve se ubican en la zona alta, uno en la zona media y cinco en la zona baja, la distribución espacial de los recintos dentro del bioparque se puede apreciar en el anexo 5.

Los 16 recintos seleccionados representan un 80% de la población total de mamíferos del bioparque, de esta población un 56,25% corresponde a carnívoros, grupo compuesto por 29 individuo adultos, y un 43,75% corresponde a herbívoros, grupo compuesto por 39 individuos adultos.

Del grupo de los herbívoros un 57,14% son herbívoros exclusivos, es decir su dieta no incluye ningún tipo de proteína, y el 42,85% restante dentro de su dieta consume proteína, sin embargo, cabe mencionar que la proteína que consumen es previamente cocida y está integrada básicamente por huevos duros y pechuga de pollo, por otra parte del grupo de carnívoros, el 67% son carnívoros exclusivos, y su dieta se centra en proteína cruda, especialmente carne de res y caballo, el 33% restante fuera de la proteína cruda, tienen incluido un pequeño porcentaje de carbohidratos y frutas a su dieta, esto en una proporción mucho menor al su consumo proteico, el desglose de su alimentación con sus respectivos pesos por semana se desglosan en la tabla 8.

Tabla 8

Caracterización de la dieta de los carnívoros y herbívoros

Especie	Número de individuos			Consumo de Alimento kg	Tipo de alimento			Grupo al que pertenece	
	Ma	He	Total		P	Ch	Fruta/ pasto	He	C
Mapache	1	2	3	30	x		x		x
Cuchucho	3	2	5	45	x		x		x
Jaguar	1	1	2	150	x				x
Ocelote	1	1	2	12,5	x				x
Tigrillo Margay	2		2	12,5	x				x
Leones	3	5	8	270	x				x
Pumas	3	1	4	270	x				x
Lobo de páramo	1	1	2	60	x				x
Tigrillo	1		1	4,95	x				x
Llamas	2	1	3	84		x		x	
Yamala	1		1	21		x	x	x	
Osos	5	3	8	108	x	x	x	x	
Mono Capuchino	5	1	6	90	x	x	x	x	
Mono Chorongo	3	4	7	105	x	x	x	x	
Pecaríes	6	4	10	126		x	x	x	
Caballos	1	3	4	84		x	x	x	

Nota: He= hembra, Ma=Macho, P= Proteína, Ch=carbohidrato, H = herbívoro, C= carnívoro. Tabla elaborada por el investigador de acuerdo con la información recolectada en campo.

Mediante el pesaje del estiércol se determinó que la población de carnívoros tiene una producción promedio de 23,6 kg de estiércol por semana, de esto valor, la especie con mayor producción corresponde a los leones con un total de 11 kg por semana, peso que representa un 46,61% del total, el peso y porcentaje de aporte de todos los carnívoros parte del experimento se describen en la tabla 9 con respecto a la población de herbívoros, su producción es de 50,5 kg de estiércol por semana, y la mayor aportación la realizan las llamas y los caballos con 35 y 38 kg por semana respectivamente, pesos que representan un 39,77%

y 43,18% de total de estiércol herbívoro contabilizado, el peso y porcentaje de aporte de todos herbívoros parte del experimento se describen en la tabla 10, el volumen de estiércol que produce el bioparque podría variar dependiendo del número de animales que se mantengan en los recintos.

Tabla 9

Porcentajes y pesos de estiércol de animales carnívoros

Carnívoros	Porcentaje (%)	Peso (kg)
Mapache	15,25	3,6
Cuchucho	6,36	1,5
Jaguar	8,47	2
Ocelote	4,24	1
Tigrillo Margay	2,12	0,5
Leones	46,61	11
Pumas	6,36	1,5
Lobo de páramo	8,47	2
Tigrillo	2,12	0,5
Total	100	23,6

Nota: Tabla elaborada por el investigador en base a la información levantada.

Tabla 10

Porcentajes y pesos de estiércol de animales herbívoros

Herbívoros	Porcentaje (%)	Peso (kg)
Llamas	39,77	35
Yamala	3,41	3
Osos	5,68	5
Mono Capuchino	1,14	1
Mono Chorongo	3,41	3
Pecaríes	3,41	3
Caballos	43,18	38
Total	100	88

Nota: Tabla elaborada por el investigador en base a la información levantada.

5.2 SÓLIDOS TOTALES DE LA MEZCLA DE HERBÍVOROS Y CARNÍVOROS

Al analizar las muestras de estiércol en el laboratorio se obtuvieron los siguientes resultados; en el caso de los carnívoros el porcentaje de sólidos totales promediado de ambas muestras analizadas es de 19,99%, mientras que para los herbívoros es de 7,66%; el cálculo realizado para la obtención de estos valores se presenta a continuación.

Muestra 1 Herbívoros

$$ST = \frac{43.7450 - 43.5924}{(43.5924 + 2.0679) - 43.5924} \times 100 = 7.60\%$$

Muestra 2 Herbívoros

$$ST = \frac{21.70182 - 21.5482}{(21.5482 + 2.0063) - 21.5482} \times 100 = 7.73\%$$

Muestra 3 Carnívoros

$$ST = \frac{21.9489 - 21.5481}{(21.5481 + 2.0009) - 21.5489} \times 100 = 20.04\%$$

Muestra 4 Carnívoros

$$ST = \frac{21.9489 - 21.5846}{(21.5846 + 2.0089) - 21.5846} \times 100 = 19.93\%$$

5.3 RELACIÓN CARBONO NITRÓGENO

Los análisis de laboratorio efectuados sobre las muestras de estiércol arrojaron como resultado que la mezcla de estiércol de animales carnívoros presenta un contenido bajo de carbono, mientras que la relación C/N del estiércol de animales herbívoros es mucho más óptima, por ende tomando en cuenta este parámetro es de esperarse un rendimiento inferior del estiércol carnívoro frente al herbívoro, considerando que una relación C/N por debajo del 8:1 inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, además de que las bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, sin embargo en casos en que el contenido de carbono es mayor a 35, el desarrollo

bacteriano es ligeramente más lento aunque la producción de metano ocurrirá de forma más prolongada, en la tabla 11 se presentan los resultados del análisis de laboratorio de cada sustrato, los resultados de laboratorio se encuentra en el anexo 6.

Tabla 11

Relación C/N del estiércol de animales herbívoros y carnívoros

<i>Estiércol</i>	<i>Carbono total mg/kg</i>	<i>Nitrógeno total mg/kg</i>	<i>Relación C/N</i>
<i>Herbívoros</i>	<i>111 409,88</i>	<i>3016,64</i>	<i>37/1</i>
<i>Carnívoros</i>	<i>176 528,14</i>	<i>18715,76</i>	<i>9/1</i>

Nota: Tabla elaborada por el investigador de acuerdo con los análisis de laboratorio

5.4 FASE EXPERIMENTAL

Mediante la aplicación del diseño experimental, se determinó el uso de 15 unidades experimentales las cuales pertenecían a cinco tratamientos, cada uno con tres repeticiones, a continuación, se presentan las condiciones de experimentación de cada tratamiento, incluyendo el valor de pH registrado al inicio del experimento, cabe mencionar que ningún tratamiento mostró un pH ácido, por el contrario, todos mostraron un pH entre 7 y 8, y se pudo observar que a medida que la mezcla incorporaba mayor cantidad de estiércol carnívoro, el pH se torna ligeramente más básico.

Tabla 12

Tratamiento 1 – Porcentaje referencial de herbívoros por especie

Herbívoro 100%		
pH 7		
Herbívoros	Porcentaje (%)	Peso (g)
Llamas	39,77	258,52
Yamala	3,41	22,16
Osos	5,68	36,93
Mono Capuchino	1,14	7,39
Mono Chorongo	3,41	22,16
Pecaríes	3,41	22,16
Caballos	43,18	280,68
Suma	100	650,0

Tabla 13

Tratamiento 2 - Porcentaje referencial de herbívoros y carnívoros por especie en una relación 75/25

Herbívoro-Carnívoro 75/25		
pH 7		
Carnívoro	Porcentaje (%)	Peso(g)
Mapache	3,81	24,79
Cuchucho	1,59	10,33
Jaguar	2,12	13,77
Ocelote	1,06	6,89
Tigrillo Margay	0,53	3,44
Leones	11,65	75,74
Pumas	1,59	10,33
Lobo de páramo	2,12	13,77
Tigrillo	0,53	3,44
Sub total	25	162,50
Herbívoro	Porcentaje (%)	Peso(g)
Llamas	29,83	193,89
Yamala	2,56	16,62
Osos	4,26	27,70
Mono Capuchino	0,85	5,54
Mono Chorongó	2,56	16,62
Pecaríes	2,56	16,62
Caballos	32,39	210,51
Sub total	75	487,50
Total	100	650,0

Tabla 14

Tratamiento 3 - Porcentaje referencial de herbívoros y carnívoros por especie en una relación 50/50

Herbívoro-Carnívoro 50/50		
pH 7,5		
Carnívoro	Porcentaje (%)	Peso(g)
Mapache	7,63	49,58
Cuchucho	3,18	20,66
Jaguar	4,24	27,54
Ocelote	2,12	13,77
Tigrillo Margay	1,06	6,89
Leones	23,31	151,48
Pumas	3,18	20,66
Lobo de páramo	4,24	27,54
Tigrillo	1,06	6,89
Sub total	50	325,0
Herbívoro	Porcentaje (%)	Peso(g)
Llamas	19,89	129,26
Yamala	1,70	11,08
Osos	2,84	18,47
Mono Capuchino	0,57	3,69
Mono Chorongó	1,70	11,08
Pecaríes	1,70	11,08
Caballos	21,59	140,34
Sub total	50	325,0
Total	100	650,0

Tabla 15

Tratamiento 4 - Excremento de animal: estiércol de los herbívoros carnívoros en una relación 25/75

Herbívoro-Carnívoro 25/75		
pH 8		
Carnívoro	Porcentaje (%)	Peso(g)
Mapache	11,44	74,36
Cuchucho	4,77	30,99
Jaguar	6,36	41,31
Ocelote	3,18	20,66
Tigrillo Margay	1,59	10,33
Leones	34,96	227,22
Pumas	4,77	30,99
Lobo de páramo	6,36	41,31
Tigrillo	1,59	10,33
Sub total	75	487,50
Herbívoro	Porcentaje (%)	Peso(kg)
Llamas	9,94	64,63
Yamala	0,85	5,54
Osos	1,42	9,23
Mono Capuchino	0,28	1,85
Mono Chorongo	0,85	5,54
Pecaríes	0,85	5,54
Caballos	10,80	70,17
Sub total	25	162,50
Total	100	650,0

Tabla 16Tratamiento 5 - *Porcentaje referencial de carnívoros por especie*

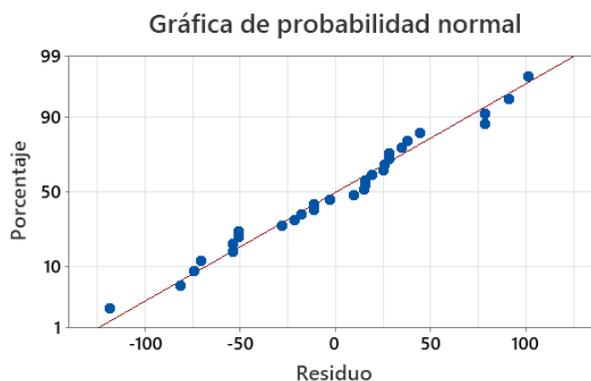
Carnívoro 100%		
pH 8		
Carnívoro	Porcentaje (%)	Peso (g)
Mapache	15,25	99,15
Cuchucho	6,36	41,31
Jaguar	8,47	55,08
Ocelote	4,24	27,54
Tigrillo Margay	2,12	13,77
Leones	46,61	302,97
Pumas	6,36	41,31
Lobo de páramo	8,47	55,08
Tigrillo	2,12	13,77
Suma	100	650,0

5.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Al procesar los datos recopilados durante el experimento, el análisis estadístico arrojó como resultado en primer lugar un R del 92,97, por lo que es posible decir que el ajuste de los datos al modelo es adecuado, además de que los datos recopilados tienen una distribución normal, como se puede observar en la figura 5.

Figura 5

Gráfica de la probabilidad normal de los datos del experimento.



Siguiendo con el análisis de la respuesta de los datos se obtuvo un $p < 0.001$, lo que señala que la relación entre el volumen y los dos tipos de estiércol es

estadísticamente significativa; luego de analizar la respuesta de los datos al modelo se procedió a ejecutar un análisis de regresión múltiple al modelo, con el fin de estudiar la interacción de los datos, esto permitió determinar que hay una interacción muy leve entre el tiempo de retención y la proporción de estiércol herbívoros, se puede observar en la figura 6 como las líneas de tiempo se hace positiva a medida que la proporción de la mezcla tiende hacia el 100 herbívoro, y además se aprecia como el tiempo de retención más corto y el más extenso no se cruzan lo que nos indica que el volumen de biogás no varía en función del tiempo, sino en función de la proporción del estiércol de los herbívoros y carnívoros, es decir, la producción de biogás de los carnívoros no mejora con el pasar de los días, es decir, lo que favorece la producción de biogás está en función de la concentración de estiércol herbívoro en la mezcla, esto se confirma en la figura 7, en donde a medida que la concentración de estiércol carnívoro en la mezcla aumenta, la producción de biogás disminuye.

Figura 6

Gráfica de la interacción de las mezclas en relación al volumen y a la proporción del estiércol herbívoro

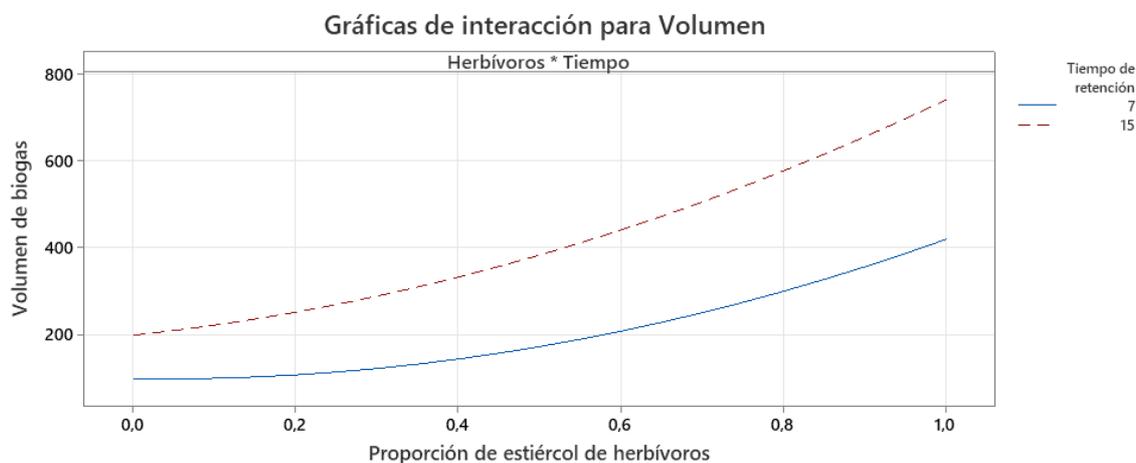
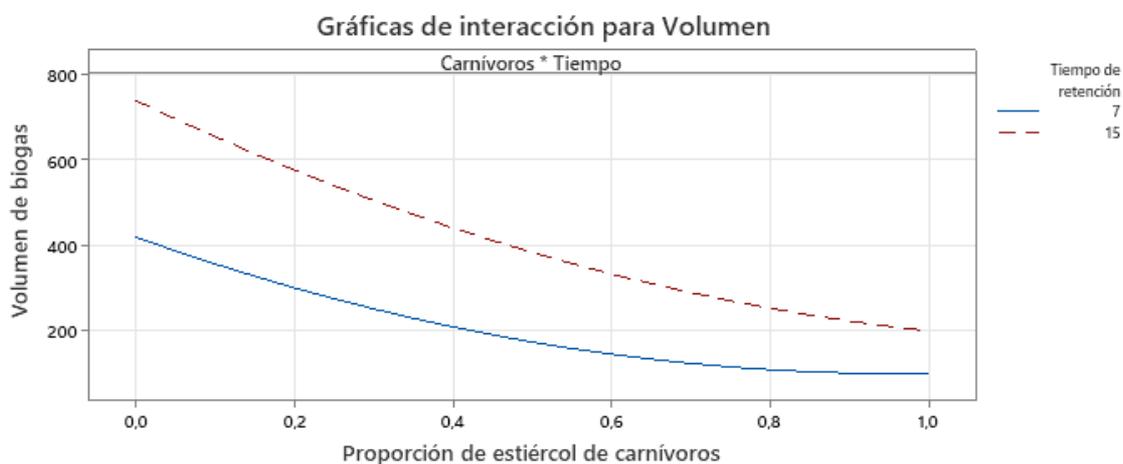


Figura 7

Gráfica de la interacción de las mezclas en relación al volumen y a la proporción del estiércol herbívoro



5.6 ANÁLISIS DEL VOLUMEN DE BIOGÁS GENERADO

Continuando con el análisis estadístico, se evaluó los resultados obtenidos mediante la observación de los biodigestores, en donde se pudo apreciar que el estiércol herbívoro produjo la mayor cantidad de biogás, siendo que para la mezcla herbívoro (100) el volumen promedio registrado, para el tiempo máximo de retención (15 días) fue de 763 mL, al cual le siguió la mezcla herbívoro-carnívoro (75-25) con un volumen promedio de 483 mL, luego se encuentra la mezcla de herbívoro-carnívoro (50-50) con un volumen promedio de 410 mL, le sigue la mezcla de herbívoro-carnívoro (25-75) con un registro promedio de 295 mL, y finalmente la mezcla carnívoro (100).

Los valores medios registrados cada tercer día para todos los tratamientos se presentan en la tabla 17.

Tabla 17*Volumen promedio para todos los tratamientos de la experimentación*

día	Tratamientos				
	T1 H (100) vol (ml)	T2 HC (75/25) vol (ml)	T3 HC (50-50) vol (ml)	T4 HC (25-75) vol (ml)	T5 C (100) vol (ml)
1	96,7	23,3	43,3	20,0	8,3
2	226,7	106,7	120,0	36,7	25,0
3	340,0	176,7	136,7	51,7	46,7
4	353,3	186,7	156,7	86,7	56,7
5	400,0	193,3	203,3	103,3	61,7
6	426,7	206,7	240,0	116,7	75,0
7	446,7	213,3	203,3	133,3	86,7
8	470,0	263,3	233,3	160,0	91,7
9	496,7	295,0	256,7	176,7	110,0
10	520,0	323,3	283,3	198,3	119,0
11	613,3	353,3	303,3	218,3	133,3
12	633,3	373,3	326,7	233,3	143,3
13	680,0	403,3	350,0	256,7	155,0
14	721,7	430,0	371,7	273,3	166,7
15	763,3	483,3	410,0	295,0	181,7

Nota: Tabla elaborada por el investigador con los datos recopilados durante la fase experimental.

De acuerdo con las observaciones realizadas durante la fase experimental, el tratamiento que procesó solamente estiércol de animales carnívoros, casi no generó burbujas, lo que refleja la falta de generación de biogás, por otro lado, el biodigestor con estiércol de animales herbívoros comenzó a producir biogás a las 24 horas de haber iniciado el experimento, e incrementó la cantidad de burbujas visibles hasta llegar al día 15, donde dejaron de ser constantes, por lo que se puede suponer que su tiempo de retención estaba llegando al máximo, los demás tratamientos mostraron variaciones similares en cuanto a la producción de burbujas, a medida que el contenido de estiércol carnívoro aumentaba en la mezcla, la producción de burbujas disminuía.

Los volúmenes acumulados de las tres repeticiones a los 15 días para cada tratamiento fueron analizados aplicando la prueba de t de student con un nivel de significancia del $\alpha = 0,05$, la prueba mostró que existen diferencias significativas entre los valores de volumen de biogás entre todos los tratamientos, con excepción del T1 y T2, lo cuales no se puede decir que tengan una diferencia significativa ($p=0,006$), los resultados reportados para cada tratamiento se describen en la tabla 18.

Tabla 18

Evaluación de todos los resultados

Tratamientos	α	p	Hipótesis aceptada
T1-T2	0,05	0,06	H_0
T1-T3	0,05	0,039	H_1
T1-T4	0,05	0,023	H_1
T1-T5	0,05	0,015	H_1
T2-T3	0,05	0,004	H_1
T2-T4	0,05	0,001	H_1
T2-T5	0,05	0,000	H_1
T3-T4	0,05	0,002	H_1
T3-T5	0,05	0,000	H_1
T4-T5	0,05	0,003	H_1

Nota: Para todos los tratamientos se usó como hipótesis nula ($H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$) que no hay diferencia significativa entre los tratamientos, como hipótesis alternativa ($H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$).

5.7 CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE LA MEZCLA IDEAL

Una vez definido que la mezcla más eficiente para producir biogás corresponde al tratamiento 1 de herbívoro (100), se procedió a estimar la producción de biogás para un periodo igual a quince días, se realizaron los cálculos correspondientes previo a la obtención de los datos requeridos para la aplicación de la fórmula 3, estos datos y su obtención se exponen en la tabla 19, mediante

los cálculos de determinó que en es posible obtener 51,91 m³ de biogás, la fórmula aplicada se describe a continuación.

$$PTB = Etot \times Stot \times Etb$$

$$PTB = 101 \text{ kg} \times 7,74 \times 0,066 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$PTB = 51,91 \text{ m}^3$$

Tabla 19

Cálculos y conversiones para la determinación del potencial teórico de biogás

Datos considerados				
		Cálculo	Resultado	Unidad
Producción de biogás del tratamiento 1 ¹		-	763	mL
		-	0,000763	m3
Gramos de materia orgánica dispuestos en el biodigestor ¹		-	0,15	kg
Porcentaje de sólidos totales del tratamiento 1 ¹		-	7,66	
Proporción de sólidos totales del tratamiento 1		0,15*7,66	0,01149	kg
Cálculos finales				
	Abreviatura	Operación	Resultado	Unidad
Proporción de sólidos totales	Stot	101*7,66	7,74	kg
Kilogramos de estiércol herbívoro en 15 días	Etot	50,5*2	101	kg
Cantidad de biogás producida por kg de sólidos totales	Etb	0,0007623/0,01149	0,066	m ³ /kg
Potencial teórico de biogás	Ptb	101*7,74*0,066	51,91	m ³

Nota: ¹ los datos presentados corresponden a los resultados de laboratorio, así como a los datos levantados durante el experimento.

Una vez realizados los análisis de laboratorio de la muestra de biogás correspondiente al tratamiento 1 se pudo determinar que su contenido de metano es de 3,41 de Moles, y su poder calorífico inferior fue de 1155,17 kJ/m³,

con esta información registrada en el anexo 7, se procedió a aplicar las fórmulas cuatro y cinco para determinar el consumo de combustible equivalente, los cálculos se describen a continuación, y en la tabla 20 se detallan las conversiones y los datos usados dentro de las fórmulas.

$$CEA = 1170 \times 34855,90 / 1.000.000$$

$$CEA = 40,781403 \frac{kg \text{ kJ}}{mes \text{ m}^3}$$

$$CcE = 40,781403 \times 1.000.000 / 1155,17$$

$$CcE = 35303,37 \frac{kJ}{m^3}$$

Tabla 20

Cálculos y conversiones para la determinación del consumo de combustible equivalente.

Datos considerados				
		Cálculo	Resultado	Unidad
Consumo de GLP ¹		(585*30) /15	1170	m ³ /mes
Cálculos finales				
	Abreviatura	Operación	Resultado	Unidad
Poder calorífico inferior del GLP	PCI ¹		34855,90	kJ/m ³
Poder calorífico inferior del biogás ¹	PCI ²		1155,17	kJ/m ³
Consumo de GLP	CEA	(1170*34855,90) /1000000	40,781403	kg kJ / mes m ³
Consumo de biogás equivalente	CcE	(40,781403*1000000) /1155,17	35303,37	kg/mes
			24347,15	m ³ /mes

Nota: ¹ los datos presentados corresponden a los resultados de laboratorio, así como a los datos levantados durante el experimento.

5.8 DISCUSIÓN

El bioparque Amaru cuenta con más de 2000 animales, lo que teóricamente generaría un volumen importante de estiércol, sin embargo, la cantidad de estiércol aprovechable es por mucho inferior, ya que las heces solo se pueden recolectar en ciertos recintos y especialmente en los cubiles, lugar en donde los animales pernoctan, sin embargo la gran parte de los individuos pasan el día en las áreas de exhibición en donde naturalmente depositan una gran cantidad de estiércol, que, dependiendo de la facilidad de acceso al recinto así como de la facilidad de contención de los animales, este podrá ser recolectado o no, por lo que el porcentaje aprovechable resulta inferior al deseado, no sin ser esperado, este particular fue descrito por Avcioğlu & Türker, 2012, quienes resaltan que el porcentaje aprovechable del total de estiércol generado por el animal varía en función de la rutina del individuo, si el animal pasa amarrado solo la noche se considera aprovechable un 50 del total del estiércol que produce, en el caso de los animales que pasan en establo, se considera un 65 para el ganado lechero, un 2 para el ganado vacuno, un 99 para las aves de corral y un 13 para pequeños rumiantes, lo antes descrito explica el volumen de estiércol aprovechable del bioparque.

Con respecto a la composición química del sustrato, la relación carbono-nitrógeno del tratamiento T5 que solo contuvo estiércol carnívoro fue de 9:1, lo que se considera muy baja y por ende la capacidad de producir biogás se reduce, este resultado es consistente con el efecto de una relación carbono nitrógeno baja reportada por Ávila-Hernández y colaboradores (2018), por otra parte los tratamientos T2, T3 y T4 debido a que contaban con la adición de estiércol herbívoro con una relación carbono nitrógeno de 37:1, esta adición evidentemente mejoró la relación carbono nitrógeno probando una mejoría en la producción de biogás en comparación con T5, este efecto positivo es similar al registrado por Garavito & Gomero, 2020 quienes adicionaron distintos porcentajes de estiércol vacuno a los restos de trucha con alto contenido de nitrógeno.

En cuanto a los sólidos totales presentes en los dos sustratos manipulados durante el experimento, dado que como lo reporta Núñez et al., 1987 a menor concentración inicial de sólidos totales, mayor producción de biogás, además de que se reduce el tiempo de retención, este aspecto permite comprender el comportamiento de los tratamientos evaluados durante la fase experimental, y el diferente rendimiento entre tratamientos.

Respecto del volumen generado de biogás, sin tomar en cuenta el contenido de metano, se puede decir que es un volumen muy inferior al requerido por el bioparque, ya que de acuerdo con los cálculos realizados el potencial teórico del biogás del tratamiento más efectivo (T1) solo cubriría un 9% del requerimiento total del bioparque, al respecto hay que considerar varios aspectos, empezando por la temperatura, que durante todo el experimento no se manipuló y en promedio se mantuvo en un rango psicrófilico, en donde el tiempo de retención debe sobrepasar en muchos casos los 100 días para que la digestión anaerobia llegue a la metanogénesis, especialmente cuando se manipulan volúmenes grandes de materia orgánica, lo que no es el caso del experimento ya que el volumen de estiércol fue relativamente pequeño, más sin embargo durante la fase experimental si se presentaron fluctuaciones en la temperatura, especialmente en la noche y horas de la madrugada en donde la misma descendió a 10 °C, estas variaciones bruscas de temperatura dentro del reactor pudieron desestabilizar el proceso, e interferir con la producción de biogás por encima de tiempo de retención, tal como lo indica FAO (2019), ya que en el caso de tener una desestabilización en el proceso anaeróbico, el contenido de metano del biogás se ve directamente afectado, lo que explica que los análisis de concentración de metano del T1 fuesen inferiores al 4, valor que además concuerdan con los ensayos realizados por Malacatus y colaboradores (2017), en donde además se concluyó que el bajo contenido de metano también se debe a la naturaleza de la materia orgánica, experimento en donde la concentración de metano no mejoró pese a tener un tiempo de retención muy superior al de este experimento.

5.9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La cantidad de animales que alberga el bioparque Amaru hace presumir que su volumen de estiércol permitiría la producción de biogás como fuente de energía alternativa, sin embargo, la cantidad de estiércol que se produce por parte de los animales considerando dentro del experimento es inferior a la deseada, siendo de 50,5 kg/semana para herbívoros y de 23,6 kg para los carnívoros.

El tratamiento 5 fue el que produjo el menor volumen de gas, dicha mezcla poseía únicamente estiércol de animales carnívoros, los cuales para el caso del bioparque en su mayoría son carnívoros exclusivos, y pese a tener un porcentaje de sólidos totales trabajable, la relación carbono nitrógeno de apenas 9:1 resulta muy pobre y por ende poco ideal para la generación de biogás, al inhibir la producción del mismo.

La mezcla que produjo un mayor volumen de gas durante la experimentación corresponde al tratamiento 1, con una media de 763 mL de volumen acumulado durante el periodo evaluado, sin embargo, debido al bajo porcentaje de metano (3,41) reportado de los análisis de laboratorio, el gas obtenido no puede ser considerado biogás por lo que no es posible calcular su potencial energético, además este particular indica que el proceso de digestión anaerobia llegó únicamente hasta la etapa de acidogénesis.

Bajo las condiciones del presente trabajo se concluye que no es posible suplir los requerimientos energéticos del bioparque Amaru, tanto por el volumen de materia orgánica disponible, así como el porcentaje de metano contenido dentro del gas producido por el mismo.

Para futuras investigaciones que tomen los resultados reportados en el presente trabajo, se sugiere evaluar otro tipo de biodigestores, e incluso la posibilidad de inocular microorganismos que potencien la generación de biogás y que mejoren el porcentaje de metano para que pueda ser aprovechado como una energía alternativa.

La temperatura a la cual se realizó el experimento, no permite la producción de biogás ya que se corre el riesgo de que, debido a las fluctuaciones, el proceso de digestión anaerobia se desestabilice o interrumpa, por lo que se recomienda

evitar la intemperie y mantener los biodigestores en un ambiente cerrado y que conserve el calor, sobre todo en la noche y horas de la madrugada para lo cual se sugiere probar con diseños que guarden el calor del biodigestor.

Respecto del estiércol de animales carnívoros no se descarta la posibilidad de utilizarlo en proporciones pequeñas dentro de mezclas que posean al menos uno 90 de estiércol de animales herbívoros, además se recomienda para futuras investigaciones una relación agua materia orgánica que disminuya el contenido de sólidos totales para evaluar si esto mejora el rendimiento de este sustrato.

REFERENCIAS

- Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2011). *Biogas Energy*. Springer Science & Business Media.
- Abdeshahian, P., Lim, J. S., Ho, W. S., Hashim, H., & Lee, C. T. (2016). Potential of biogas production from farm animal waste in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *60*, 714-723. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.117>
- Arango Gómez, J. E., Sierra Vargas, F. E., & Silva Leal, V. (2014). Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogás. *Tecnura*, *18*(39), 152-164.
- Arrieta, W. (2016). *DISEÑO DE UN BIODIGESTOR DOMÉSTICO PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL ESTIÉRCOL DE GANADO*. 251.
- Avcioglu, A. O., & Türker, U. (2012). Status and potential of biogas energy from animal wastes in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(3), 1557-1561. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.006>
- Ávila-Hernández, M., Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., & Jiménez-Morales, M. F. (2018). Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago. *Revista Tecnología en Marcha*, *31*(2), 159. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i2.3633>
- Barrena Gurbillón, M. A., Cubas Alarcón, F., Gosgot Angeles, W., Ordinola Ramírez, C. M., Rascón Barrios, J., & Huanes Mariños, M. (2019). Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa,

Chachapoyas, Amazonas, Perú. *Arnaldoa*, 26(2), 725-734.

<https://doi.org/10.22497/arnaldoa.262.26214>

- Barrena Gurbillón, M. Á., Maicelo, J. L., Gamarra Torres, O. A., Oliva, M., Leiva, S. T., Taramona Ruíz, L. A., Huanes, M. Á., & Ordinola, C. M. (2019). *Biogás: Producción y aplicaciones*. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas - UNTRM. <http://repositorio.ulcb.edu.pe/xmlui/handle/ULCB/59>
- Brunet-Ramos, S. de la C., Jiménez-Hernández, J., Pedraza-Garciga, J., López-González, L. M., Brunet-Ramos, S. de la C., Jiménez-Hernández, J., Pedraza-Garciga, J., & López-González, L. M. (2021). Consorcios de microalgas-bacterias para la purificación biológica de biogás. *Tecnología Química*, 41(2), 277-295.
- Cardozo, J. (2019). *PROPUESTA DE BIODIGESTOR ANAEROBIO DE FLUJO CONTINUO PARA EL TRATAMIENTO DE ESTIÉRCOL BOVINO Y AGUAS RESIDUALES*. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/12/tratamiento-estiercol-bovino.pdf>
- Castro, E. (2021). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN A PARTIR DEL BIOGÁS PRODUCIDO POR EL ESTIÉRCOL DE CAVIA PORCELLUS EN EL "CENTRO AGROPECUARIO ECOLÓGICO CASAYA" EN LIMÓN DE PORCUYA – HUARMACA* [Universidad Seor de Sipán]. <https://orcid.org/0000-0003-3782-3839>
- Corona, I. (2007). *Biodigestores* [Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/10722/Biodigestores.pdf?sequence=1>
- Deublein, D., & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. John Wiley & Sons.
- FAO. (2011). *Manual de Biogás*. <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

FAO. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores: Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG) - Colección Documentos Técnicos N° 12*. FAO.

<https://www.fao.org/publications/card/es/c/CA5082ES/>

Garavito, O., & Gomero, L. (2020). Relación entre la producción de biogás y biol a partir de restos de trucha y estiércol vacuno. *South Sustainability*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.21142/SS-0101-2020-008>

Gazzo, R. M., & Librandi, V. G. (2010). *Tratamiento de desechos y aprovechamiento*. 8.

Google Maps. (2022). Google Maps.

[https://www.google.com/maps/place/Amaru+ZoolC3B3gico+Bioparque/@-](https://www.google.com/maps/place/Amaru+ZoolC3B3gico+Bioparque/@-2.8951829,-78.9595637,16.92z/data=!4m5!3m4!1s0x91cd19c35eb45559:0xeaba4154b64349cc!8m2!3d-2.8952283!4d-78.9570356)

[2.8951829,-](https://www.google.com/maps/place/Amaru+ZoolC3B3gico+Bioparque/@-2.8951829,-78.9595637,16.92z/data=!4m5!3m4!1s0x91cd19c35eb45559:0xeaba4154b64349cc!8m2!3d-2.8952283!4d-78.9570356)

[78.9595637,16.92z/data=!4m5!3m4!1s0x91cd19c35eb45559:0xeaba4154b643](https://www.google.com/maps/place/Amaru+ZoolC3B3gico+Bioparque/@-2.8951829,-78.9595637,16.92z/data=!4m5!3m4!1s0x91cd19c35eb45559:0xeaba4154b64349cc!8m2!3d-2.8952283!4d-78.9570356)

[49cc!8m2!3d-2.8952283!4d-78.9570356](https://www.google.com/maps/place/Amaru+ZoolC3B3gico+Bioparque/@-2.8951829,-78.9595637,16.92z/data=!4m5!3m4!1s0x91cd19c35eb45559:0xeaba4154b64349cc!8m2!3d-2.8952283!4d-78.9570356)

INAMHI. (s. f.). *Red de Estaciones Automáticas | INAMHI*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Recuperado 13 de marzo de 2023, de <http://186.42.174.236/InamhiEmas/>

INTA. (2011). *Manual para la producción de biogas*. Instituto de Ingeniería Rural.

[https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf)

[manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_la_produccion_de_biogs_del_iir.pdf)

International M. G. M. (2018). *Guía para la Evaluación de Elegibilidad de Financiación de Proyectos de Eficiencia Energética. Tipo de Proyecto: Aire Comprimido*.

<https://cafscioteqa.azurewebsites.net/handle/123456789/1296>

Jiménez, D. (2012). *Evaluación de los Parámetros de un Biodigestor Anaerobio tipo Continuo*. Universidad Veracruzana.

- Linares, A., Lopez, M., & Caballero, P. (2017). *Diseño y control de un biorreactor tipo batch para la generacion de biogas*. 4(13 11-18).
https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias/vol4num13/Revista_de_Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias_V4_N13_2.pdf
- LOJAGAS. (2017). *HOJA DE SEGURIDAD GAS LICUADO DE PETROLEO*.
<http://lojagas.com/nueva/wp-content/uploads/2017/08/G-99.-HOJA-DE-SEGURIDAD-GAS-LICUADO-DE-PETROLEO.pdf>
- López-Savran, A., & Suárez-Hernández, J. (2018). Experiencia de suministro de biogás en una comunidad rural, en Cuba*. *Pastos y Forrajes*, 41(1), 73-79.
- Magaña R., J. L., Torres, E., Martínez G., M. T., & Hernández Cantero, R. (2006). Producción de Biogás a Nivel Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras. *Acta Universitaria*, 16(2), 27-37. <https://doi.org/10.15174/au.2006.185>
- Malacatus, P., Jalme, M., Pantoja, C., & Nathaly. (2017). *Análisis comparativo del potencial de Biogás obtenido de la fracción Orgánica de residuos sólidos urbanos*. Vol 2(2).
<https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/download/69/49/201>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2014). *Informe del tráfico ilegal de especies*.
- Noacco, A., Malcervelli, D., Sánchez, S., Hachman, V., Robertazzi, M., Guebel, C., Ghirardosi, S., Lozano, M., Vásquez, F., Vázquez, F., Mazzeo, C., Salvatierra, P., & Mujica, M. del C. (2021). *Generación de biogás como respuesta a la problemática energética aplicable a poblaciones con vulneración ambiental*.

Facultad de Ciencias Veterinarias.

<http://www.fvet.uba.ar/archivos/cega/biodigestores.pdf>

Núñez, F., Urrutia, F., González, E., & Urcelay, S. (1987). *Determinación química en excretas de cerdo sometidas a biodigestión anaeróbica en laboratorio. Vol.2(1).*

Periche, P., & Fernando, P. (2016). *PROPUESTA DE APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS OBTENIDO A PARTIR DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN LA EMPRESA RICO CERDO F&G S.A.C., PARA SU USO COMO BIOCOMBUSTIBLE EN LOS SISTEMAS DE CALEFACCIÓN DE LAS ÁREAS DE MATERNIDAD.*

https://tesis.usat.edu.pe/bitstream/20.500.12423/656/1/TL_Paiva_Periche_PercyFernando.pdf

Ponce, E. (2016). Métodos sencillos en obtención de biogás rural y su conversión en electricidad. *Idesia (Arica), ahead*, 0-0. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292016005000011>

Posada, A. (2021). *Prefactibilidad técnica, económica y social para la producción de biogás a partir de residuos agropecuarios y macroalgas para la Comunidad Mapuche José Painecura* [Universidad de Chile].

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184522>

Proaño Piñeiros, J., & Toro Peralta, J. (2010). *Diseño y automatización de un Biodigestor*. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/297>

Rivas, O., Faith, M., & Guillén, R. (2010). Biodigestores: Factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Marzo 2010, 23(1)*, 39-46.

Robayo, S. (2020). *Educación ambiental y tráfico ilegal de fauna silvestre* [Tesis de Maestría]. U.D.C.A.

- ROJAS, S. (2022). *ESTUDIO DE PARÁMETROS CINÉTICOS RELACIONADOS A LA PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS CON HIDRÓXIDO DE SODIO* [UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA].
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/5363/rojas-arquic3b1igo-silvia-doralid.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sallo, P. (2014). *PRODUCCIÓN DE BIOGAS A PARTIR DE DESECHOS SÓLIDOS ORGÁNICOS QUE SE GENERAN EN EL MERCADO CENTRAL DEL CANTÓN ARENILLAS*. [UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA].
<http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/2798/3/CD0000-12-TRABAJO20COMPLETO.pdf>
- Sanchez, S. (2021). *Purificación del biogás para su uso en motores. 2*.
<https://renia.cujae.edu.cu/index.php/renia/article/view/15/14>
- Sogari, N. (2003). Cálculo de la producción de metanogenerado por distintos restos orgánicos. *Universidad Nacional Del Nordeste Argentina*.
<https://pdf4pro.com/fullscreen/c-225-lculo-de-la-producci-243-n-de-metano-generado-por-403637.html>
- Souza, J., & Schaeffern, L. (2013). Sistema de Compresión de Biogas y Biometano. *Información tecnológica*, 24(6), 3-4. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600002>
- Sun, Q., Li, H., Yan, J., Liu, L., Yu, Z., & Yu, X. (2015). Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 521-532.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.029>

- Tahir, M. S., Shahzad, K., Shahid, Z., Sagir, M., Rehan, M., & Nizami, A. (2015).
Producing Methane Enriched Biogas using Solvent Absorption Method.
Chemical Engineering Transactions, 45, 1309-1314.
<https://doi.org/10.3303/CET1545219>
- Varnero, M. T., Carú, M., Galleguillos, K., & Achondo, P. (2012). Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. *Información tecnológica*, 23(2), 31-40. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000200005>
- Venegas Venegas, J. A., Raj Aryal, D., Pinto Ruíz, R., Venegas Venegas, J. A., Raj Aryal, D., & Pinto Ruíz, R. (2019). Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas. *Análisis económico*, 34(85), 169-187.
- Villagómez, G. F., & Borges, E. V. (2002). *Inhibidores del proceso anaerobio: Compuestos utilizados en porcicultura*. 6(3), 67-71.
- Wang, Y., Zhang, Y., Li, J., Lin, J.-G., Zhang, N., & Cao, W. (2021). Biogas energy generated from livestock manure in China: Current situation and future trends. *Journal of Environmental Management*, 297. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113324>

ANEXOS

ANEXO 1

Área del Bioparque Amaru

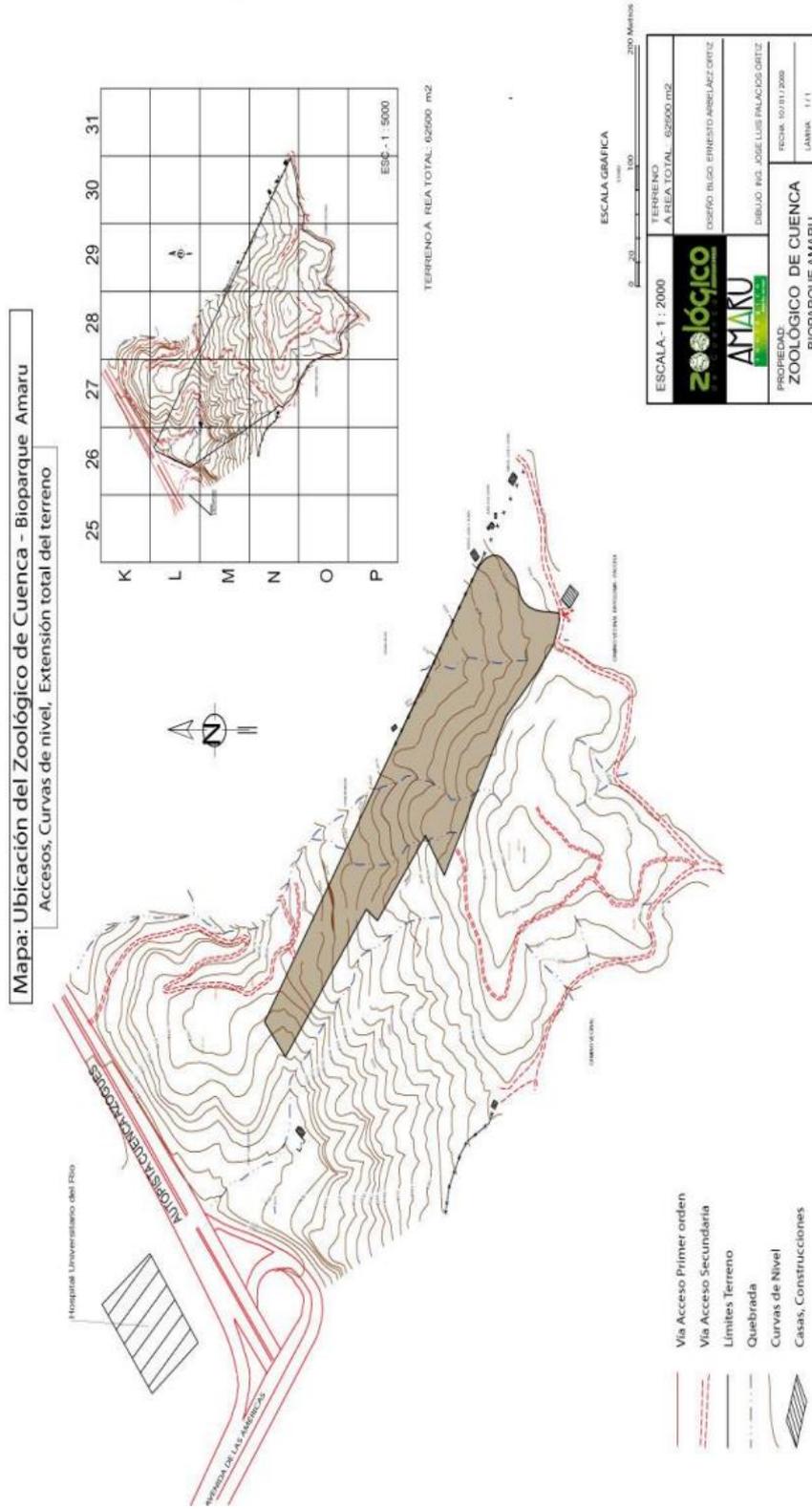


Ilustración 1 Mapa del Bioparque Amaru

ANEXO 2

Pesaje del estiércol.



Ilustración 2 Pesaje del estiércol en las instalaciones del bioparque

ANEXO 3

Recolección de las muestras para los análisis de laboratorio.



Ilustración 3 Recolección de heces para la preparación de las mezclas

ANEXO 4

Registro fotográfico del experimento



Ilustración 4 Preparación de las mezclas previo al llenado de los biodigestores



Ilustración 5 Determinación del pH previo a cerrar los biorreactores



Ilustración 6 Botellas graduadas previo a conectar la manguera de los reactores



Ilustración 7 Biorreactores sellados y funcionando



Ilustración 8 Registro de los datos del volumen de biogás generado



Ilustración 9 Recolección de biogás en la funda Tedlar para determinar la concentración de metano

ANEXO 5

Mapa de la distribución espacial de los recintos dentro del bioparque

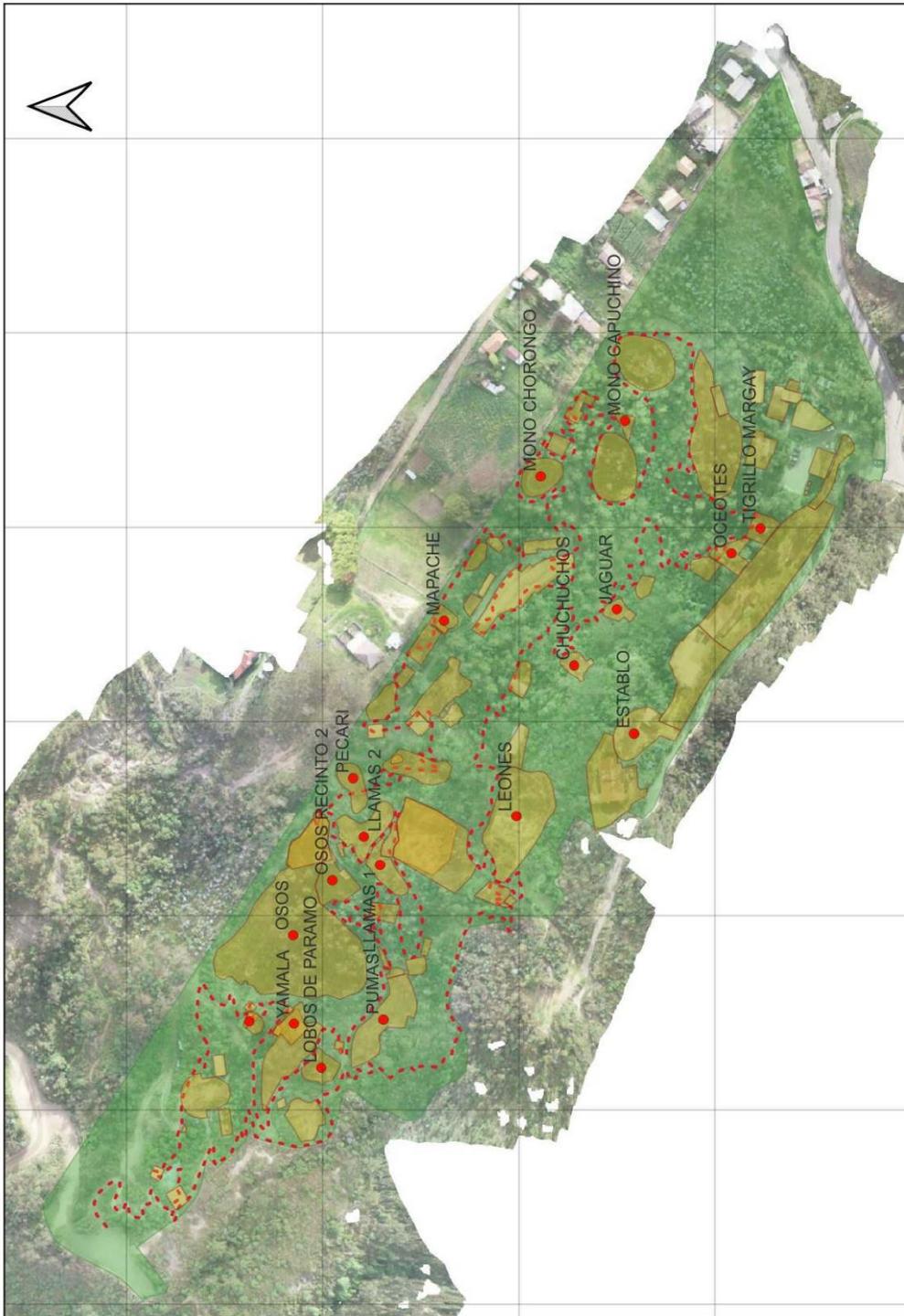


Ilustración 10 Ubicación de los recintos parte del experimento dentro del Bioparque

ANEXO 6

Análisis de laboratorio para la determinación de la relación carbono nitrógeno

UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERIA
LABORATORIO DE INGENIERIA SANITARIA

RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO	
Muestra procedencia:	Bioparque Amaru.- Ciudad de Cuenca.- Provincia del Azuay
Tipo de muestra:	Mezcla de estiércol animal
Fecha de toma:	16 de noviembre de 2022
Fecha de análisis:	16 de noviembre de 2022
Análisis solicitado por:	Ing. María Cristina Molina - Maestría de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Politécnica Salesiana

PARAMETROS	HERVIBOROS	CARNIVOROS	UNIDAD	OBSERVACIONES
N. NITRATOS	3,460	9,405	mg/kg	como Nitrógeno
N. NITRITOS	1,175	2,350	mg/kg	como Nitrógeno
NITROGENO AMONIACAL	510,00	5001,00	mg/kg	como Nitrógeno
NITROGENO ORGANICO	996,00	4351,00	mg/kg	como Nitrógeno
NITROGENO KJELDAHL	1506,00	9352,00	mg/kg	como Nitrógeno
NITRÓGENO TOTAL	3016,64	18715,76	mg/kg	como Nitrógeno

Responsable



Dra. Guillermina Pauta C.
DIRECTORA DE LABORATORIO

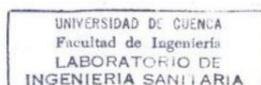


Ilustración 11 Resultados del análisis de laboratorio para la determinación del nitrógeno total



INFORME DE ANÁLISIS

Fecha: 15 de marzo del 2023
Análisis solicitado por: Ing. María Cristina Molina
Tipo de muestras: Excremento de animales
Localidad: Bio-parque Amaru. Ciudad de Cuenca

Muestra 1: Mezcla de excremento de animales carnívoros

Muestra 2: Mezcla de excremento de animales Herbívoros

DETERMINACIÓN DE CARBONO ORGÁNICO TOTAL

Muestra	Unidades	Métodos de análisis	Resultados
Muestra 1	mg/Kg	Oxidación Ácida. Walkley -Black	176 528.14
Muestra 2	mg/Kg	Oxidación Ácida. Walkley -Black	111 409.88

Observaciones:

Atentamente.

GINA
ELIZABETH
ÁLVAREZ
REYES

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

Avenida 9 de Octubre # 12 y Madrid
Contáctanos: ☎0998580374 ☎032 942 322
Saqmic Laboratorio
Riobamba - Ecuador

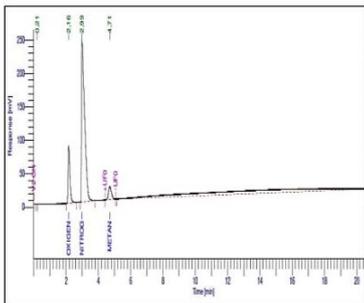
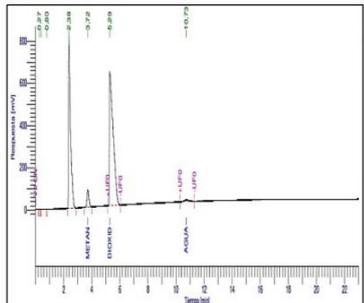
Ilustración 12 Análisis de laboratorio para la determinación de carbono total

ANEXO 7

	INFORME DE RESULTADOS	Página:	1 de 1
		FPT-7.8-03-04	

INFORME No. I-LAI-023-02-01

Orden de Trabajo No. DQ-OT0053-2023

INFORMACION CLIENTE				
Cliente / Empresa:	Ing. Maria Cristina Molina		Persona de contacto:	Ing. Maria Cristina Molina
Dirección / Telf.:	Cuenca, Quinta chica alta / 959718568		E-mail:	m91molina@gmail.com
PARÁMETROS DE LA MUESTRA				
Identificación:	M-I-LAI-023-02-01		Fecha de muestreo:	13/3/2023
Tipo de muestra:	Biogás H 100		Plan de muestreo:	No especificado por el cliente
Tipo de contenedor:	Bolsa tcdlar		Fecha inicio del ensayo:	16/3/2023
Fecha de recepción:	16/3/2023		Fecha entrega informe:	23/3/2023
CONDICIONES DE TRABAJO				
Temperatura y %HR ambiente:	19,5 °C	45,0 %	Norma de referencia:	ASTM D 1945: Cromatografía
Temperatura y Presión de muestra:	66,0 °F	0,7 psi	Procedimiento interno:	PE-7.2-01
	18,9 °C	4895,3 Pa		PE-7.2-02
RESULTADOS				
COMPOSICIÓN	COMPONENTE		% Moles	Desv. Std
	Oxígeno		7,87	N/A
	Nitrógeno		36,42	N/A
	Metano		3,41	0,024
	Dióxido de carbono		51,39	0,389
Agua		0,91	0,004	
PROPIEDADES	Densidad relativa		1,25	
	Peso molecular promedio [g/mol]		36,14	
	Densidad de la muestra (g/L)		1,52	
	Poder calorífico superior [kJ/m ³]		1300,08	
	Poder calorífico inferior [kJ/m ³]		1155,17	
Factor de compresibilidad (z)		1,0000		
CROMATOGRAMA			MUESTRA	
				
Columna 13 X 45/60 (Cuantificación de nitrógeno y oxígeno)		Columna Porapak Q 80/100 (Cuantificación de hidrocarburos)		
DECLARATORIAS	* Dato proporcionado por el cliente. Los ensayos fueron realizados dentro de las instalaciones del laboratorio LAI. Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados. El laboratorio no se responsabiliza por la toma ni almacenamiento de la muestra antes de llegar a las instalaciones de la Institución. El muestreo es responsabilidad del cliente y los resultados aplican a la muestra como se recibió. El laboratorio no emite opiniones o interpretaciones sobre los resultados encontrados. Queda prohibida la reproducción parcial o total del presente informe sin previa autorización.			
OBSERVACIONES	No existieron desviaciones durante la ejecución del ensayo. No se pudo calcular la desviación estándar de la concentración de nitrógeno y oxígeno ya que la cantidad de muestra era muy pequeña y solo permitió una inyección en el equipo para la cuantificación de estos componentes; no obstante, para la cuantificación de los otros componentes, si se realizaron inyecciones por duplicado, de lo cual se obtuvo la desviación estándar respectiva.			
Elaborado por:	GABRIELA VANESSA PEREZ GUIRACOCCHA <small> Avenida 2023-03-23 15:31:51 Dirección: QUITO, ECUADOR Teléfono: 022976300 ext. 4334 4332 Correo: a.instrumental@epn.edu.ec Web: www.epn.edu.ec </small>		Revisado y aprobado por: ANDRES GABRIEL CHICO PROANO <small> Digitally signed by ANDRES GABRIEL CHICO PROANO Date: 2023.03.23 15:31:51 05707 </small>	
Ing. Gabriela Pérez ANALISTAS DE LABORATORIO		Ing. Andrés Chico, MSc. COORDINADOR DEL LABORATORIO		