

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

*Energy utilization of manure from carnivorous and
wild herbivorous mammals under human care via
anaerobic digestion*

MARÍA CRISTINA MOLINA ARÍZAGA¹

Recibido: 23 de mayo de 2023 • Aceptado: 21 de junio de 2024

Cómo citar: Molina Arízaga, M. C. (2024). Aprovechamiento energético del estiércol de mamíferos carnívoros y herbívoros silvestres bajo el cuidado humano a través de la digestión anaerobia. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 7(1), 31-47. <https://doi.org/10.22206/cac.2024.v7i1.2835>.

Resumen

El objetivo de la investigación fue 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, recursos energéticos, combustible, biomasa, animal salvaje.

¹ Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.
Correo-e: m91molina@gmail.com



Abstract

The objective of the research was to determine the viability of manure from carnivorous and herbivorous mammals as an alternative energy source in the Amaru biopark 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 herbivorous manure substrates, however, laboratory analysis showed that the amount of methane contained in the gas corresponded to 3.41%, which is not sufficient to be considered biogas. In addition, it was observed that the carbon-nitrogen ratio in the manure mixture of carnivorous animals is very poor, which inhibits the production of biogas. In conclusion, under the conditions of the experiment, it is not possible to supply the energy requirements of the Amaru biopark.

Keywords: biogas, energy resources, flues, biomass, wild animals.

1. Introducción

En términos generales, las energías renovables están ganando popularidad a nivel global. Esto se debe a que, en un futuro cercano, la población mundial enfrentará escasez de energía fósil, la cual se está volviendo más costosa y menos rentable. Además, es ampliamente reconocido que los residuos líquidos y sólidos generados por los seres vivos son abundantes y pueden ser aprovechados como fuentes de energía. (Gerena, Ruiz, y Horta 2020). Por otro lado 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). Dentro de estos centros se encuentra el bioparque Amaru, ubicado en el sector de Rayoloma - Monay, perteneciente a la parroquia Paccha, al costado oriental de la ciudad de Cuenca, en la provincia Azuay en Ecuador; este centro alberga 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 produce en calefactores que funcionan con GLP, 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, la producción de estiércol animal en el bioparque Amaru es considerable y su manejo es complejo. La implementación de la digestión anaerobia de este estiércol no solo podría significar un ahorro considerable de recursos para el parque, sino que también podría establecer un modelo para otros bioparques en el país y a nivel internacional. Esta iniciativa no solo proporcionaría energía a bajo costo, sino que también generaría ingresos adicionales y traería beneficios como la creación de empleo, la descentralización energética, la protección del medio ambiente y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. En el contexto actual, donde no se han registrado investigaciones significativas sobre el uso del estiércol de animales carnívoros y herbívoros bajo cuidado humano, el enfoque objetivo de esta investigación es suministrar datos cuantificables sobre las características ideales de las mezclas en los biodigestores. Estas mezclas deben cumplir con criterios específicos para maximizar el rendimiento, convirtiéndose así en alternativas energéticas beneficiosas con un menor impacto ambiental. Este estudio también servirá como punto de partida para investigaciones futuras, tanto a nivel nacional como internacional. El problema central que abordará esta investigación se enfoca en la identificación de la mezcla óptima de estiércol proveniente de mamíferos carnívoros y herbívoros silvestres bajo el cuidado humano. El objetivo es obtener resultados con la máxima eficacia en cuanto a la generación de biogás, con la perspectiva de aplicar este proceso para el aprovechamiento energético en el Bioparque Amaru y posiblemente en otros entornos similares, contribuyendo así a soluciones sostenibles y amigables con el medio ambiente (Molina 2023; Venegas Venegas et al. 2019).

2. Materiales y métodos/metodología

2.1. Determinación de la población

El bioparque Amaru alberga alrededor de 2000 animales distribuidos en tres áreas conocidas como zona alta, zona media y zona baja. Para determinar la cantidad de estiércol generado por el bioparque y realizar estimaciones futuras precisas, se llevó a cabo un proceso ordenado y sistemático con la colaboración del personal del bioparque. Este proceso

incluyó un recorrido estructurado para seleccionar los animales, considerando dos criterios principales: la facilidad de recolección de estiércol en sus cubículos y la posibilidad de aislar a los animales para limpiar sus recintos y recolectar el estiércol.

Una vez definido el grupo de animales, se clasificaron en carnívoros y herbívoros de acuerdo con su dieta predominante, para ello se pesó y clasificó el alimento ingerido por cada grupo durante una semana (Molina 2023).

2.2. Pesaje del estiércol y elaboración de las mezclas

Para determinar la cantidad promedio de estiércol producido por los animales seleccionados, se llevó a cabo 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.

Teniendo en cuenta que cada animal en el experimento produce una cantidad de estiércol diferente, para la preparación de las mezclas se calculó el porcentaje correspondiente a cada animal en relación al total, asegurando que la proporción reflejara la realidad del bioparque. De esta manera, se evitó cualquier sesgo en las estimaciones causado por una mezcla aleatoria. Los porcentajes de peso obtenidos para cada especie se esquematizaron de acuerdo al porcentaje que se muestra en la tabla 2. Se realizaron análisis de laboratorio en las mezclas de ambas familias para determinar el porcentaje de sólidos totales y la relación carbono nitrógeno. Para obtener el porcentaje de sólidos totales, se utilizó el método normalizado INEN 382. Además, se determinó la relación carbono nitrógeno al medir el nitrógeno total y el carbono total de cada mezcla. Para el nitrógeno total, se aplicó el método espectrofotométrico y el método Kjeldahl, mientras que para el carbono se utilizaron los métodos de Walkley Black y oxidación ácida (Molina 2023).

2.3. Diseño experimental

El diseño experimental utilizado fue un diseño centroide simplex (DSC) con un nivel de confianza del 95%. Los datos se aleatorizaron para evitar

Tabla 2

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

Fuente: Elaborado por el investigador

sesgos y se ejecutaron en un solo bloque. El estudio evaluó el estiércol de herbívoros (H) y carnívoros (C) mediante cinco tratamientos, cada uno replicado tres veces, totalizando 15 unidades experimentales (ver Tabla 1). Todas las unidades experimentales fueron evaluadas a los 7 y 15 días. Cada unidad experimental tenía una capacidad de 500 mililitros para los materiales a degradar. 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

Tabla 1*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)
Fuente: Elaborado por el investigador

(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. (Molina 2023).

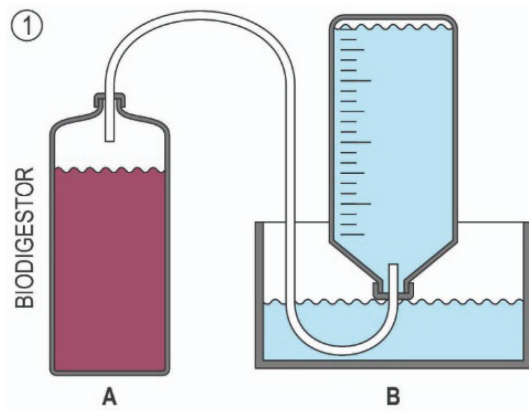
Adicionalmente para conocer si el volumen acumulado de todos los tratamientos tiene una diferencia significativa entre ellos, se aplicó el test paramétrico conocido como t de *student*, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, tomando como hipótesis nula que no hay diferencia significativa entre los tratamientos y como hipótesis alternativa que si hay diferencia significativa entre los tratamientos, el análisis estadístico entre tratamiento se realizó con las siguientes combinaciones: 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 (Molina 2023).

2.4. 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 manguera de salida dentro de una botella graduada cada 20 mL para cada reactor, el esquema de biodigestor se puede observar en la figura 1 (Molina 2023; Proaño Piñeiros y Toro Peralta 2010; Tahir et al. 2015).

Figura 1

Esquema del biodigestor tipo batch



Fuente: Elaborado por el investigador

Para la obtención de biogás, se utilizó materia prima con características similares a las empleadas en los análisis de laboratorio. La mezcla preparada siguió el mismo esquema porcentual, respetando el peso de cada especie. Después de homogeneizar las cinco mezclas en sus respectivos recipientes, se pesaron 150 g para cada uno de los quince biorreactores de 500 mL y se agregaron 300 mL de agua a cada uno. Todos los biodigestores se dejaron con un 10% de espacio libre como cámara de gases. Antes de cerrar los biorreactores, se verificó el pH para asegurar que todas las mezclas estuvieran dentro del rango neutro. Se llevó a cabo un monitoreo diario durante un período de 15 días (Molina 2023).

2.5. Determinación de la producción de biogás y su potencial energético

Después de evaluar diversas metodologías para estimar la producción de biogás en diferentes sustratos, se optó por implementar las fórmulas uno, dos y tres que se detallan a continuación. La selección se basó en la disponibilidad de datos de entrada necesarios para cada una de estas fórmulas.

$$PTB = Etot \times Stot \times Etb \quad (1)$$

$$CEA = \frac{CA \times PCI^I}{1.000.000} \quad (2)$$

$$CcE = \frac{CEA \times 1.000.000}{PCI^2} \quad (3)$$

Así la información utilizada para determinar el potencial teórico de biogás (PTB) correspondió a la cantidad de estiércol en kilogramos (E_{tot}), la proporción de sólidos totales (S_{tot}), 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 calculó el consumo de energía actual CCE en donde CA que es el consumo de GLP del bioparque en un periodo de 15 días, PCI^I Poder calorífico Inferior del GLP obtenido de (LOJAGAS 2017; Molina 2023), para finalmente determinar el consumo de combustible equivalente futuro (CcE) donde PCI² corresponde al Poder calorífico determinado por el análisis del biogás obtenido de la mezcla que mayor volumen generó en la fase experimental (FAO 2019; International M. G. M. 2018; Molina 2023; Wang et al. 2021).

3. Resultados y discusión

3.1. Resultados

Este estudio se enfocó exclusivamente en mamíferos; y después de revisar los 42 recintos del bioparque, se determinó que 20 están ocupados por mamíferos, de los cuales solo 16 son adecuados para recolectar y utilizar el estiércol en la producción de biogás. Estos 16 recintos seleccionados representan el 80% del total de mamíferos en el bioparque. Del grupo total de mamíferos, el 56,25% son carnívoros, con 29 individuos adultos, mientras que el 43,75% restante son herbívoros, con 39 individuos adultos.

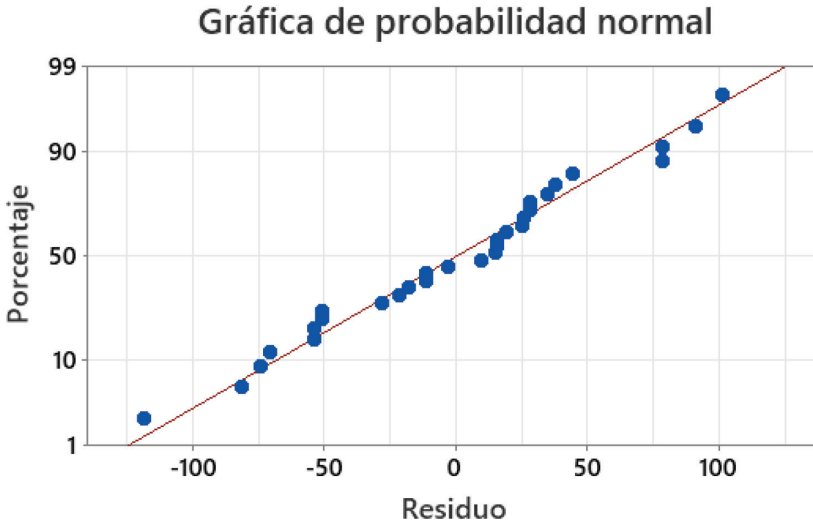
Del grupo de herbívoros, el 57,14% son herbívoros estrictos, es decir, su dieta no incluye ninguna forma de proteína. El 42,85% restante dentro de este grupo consume proteína, la cual está cocida y principalmente proviene de huevos duros y pechuga de pollo. Por otro lado, dentro del

grupo de carnívoros, el 67% son carnívoros estrictos y su dieta se basa en proteína cruda, especialmente carne de res y caballo. El 33% restante de este grupo incluye en su dieta un pequeño porcentaje de carbohidratos y frutas, aunque en proporciones mucho menores que su consumo proteico.

Mediante el pesaje del estiércol se concluyó 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 2; cabe mencionar que el volumen de estiércol que produce el bioparque podría variar dependiendo del número de animales que se mantengan en los recintos.

Al analizar las muestras de estiércol en el laboratorio, se obtuvieron los siguientes resultados: en el caso de los animales carnívoros, el porcentaje promedio de sólidos totales en ambas muestras fue de 19,99%, mientras que para los herbívoros fue de 7,66%. En cuanto a la relación carbono-nitrógeno, se encontró que el estiércol de los carnívoros tiene un bajo contenido de carbono, con una relación de 8:1, mientras que el estiércol de los herbívoros presenta una relación C/N más óptima de 37:1. Además, todas las mezclas mostraron un pH entre 7 y 8. Durante el experimento, se registraron temperaturas mínimas de 10°C y máximas de 25°C.

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 2.

Figura 2*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 3 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, siendo que 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 4, en donde a medida que la concentración de estiércol carnívoro en la mezcla aumenta, la producción de biogás disminuye.

Figura 3

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

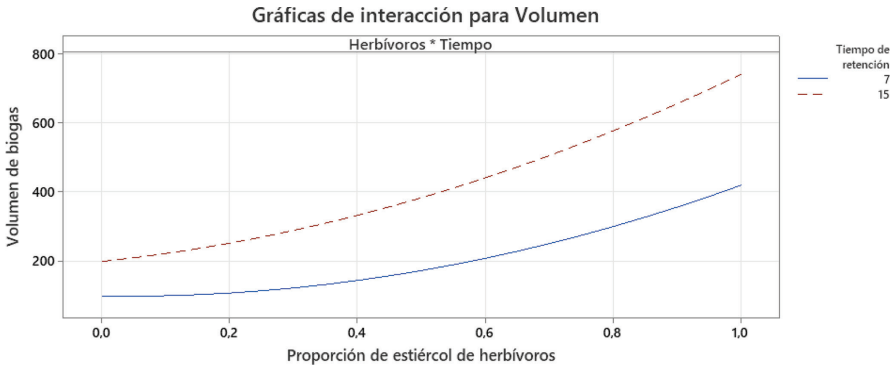
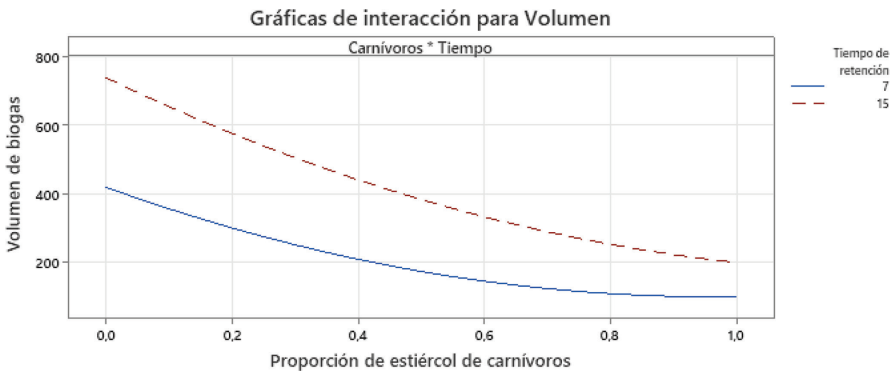


Figura 4

Interacción de las mezclas en relación al volumen y a la proporción del estiércol carnívoro



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).

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, los cuales no se puede decir que tengan una diferencia significativa ($p=0,006$), los resultados reportados para cada tratamiento se describen en la tabla 3.

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 (PTB) para un periodo igual a quince días, determinando que es posible obtener $51,91 \text{ m}^3$ de biogás. Luego de 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 $1155,17 \text{ kJ/m}^3$, determinando que el consumo de combustible equivalente (CcE) para el biogás obtenido es de $24347,15 \text{ m}^3/\text{mes}$ (Molina 2023).

3.2. Discusión

El bioparque Amaru alberga más de 2000 animales, lo que teóricamente generaría un volumen significativo de estiércol. Sin embargo, la cantidad realmente aprovechable es considerablemente menor, ya que las heces

Tabla 3

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: hipótesis nula (H₀: $\mu_1 - \mu_2 = 0$) que no hay diferencia significativa entre los tratamientos, como hipótesis alternativa (H₁: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$).

Fuente: Elaborado por el investigador

solo pueden recolectarse en ciertos recintos, principalmente en los cubiles donde los animales pernoctan. Gran parte de los individuos pasan el día en áreas de exhibición donde depositan naturalmente una cantidad considerable de estiércol. La recolección de este depende de la accesibilidad al recinto y la facilidad para contener a los animales, resultando en un porcentaje aprovechable inferior al ideal. Este fenómeno ha sido descrito por Avcioglu y Türker (2012), quienes señalan que la proporción aprovechable del estiércol varía según la rutina del animal. Por ejemplo, se considera que solo el 50% del estiércol producido por animales que pasan amarrados solo durante la noche es aprovechable. En contraste, para el ganado lechero estabulado se aprovecha aproximadamente el 65%, mientras que para el ganado vacuno es solo el 2%, para las aves de corral el 99%, y para pequeños rumiantes el 13%. Este contexto explica el volumen de estiércol realmente aprovechable en el 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 et al. (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 y Gomero (2020) quienes adicionaron distintos porcentajes de estiércol vacuno a los restos de trucha con alto contenido de nitrógeno.

En relación con los sólidos totales en los dos sustratos utilizados en el experimento, según lo señalado por Núñez et al. (1987), una menor concentración inicial de sólidos totales conlleva a una mayor producción de biogás y a una reducción en el tiempo de retención. Este factor permite entender el comportamiento de los tratamientos evaluados durante la fase experimental, así como las diferencias en rendimiento entre ellos.

Respecto al volumen de biogás generado, excluyendo el contenido de metano, este es considerablemente inferior al requerido por el bioparque. Según los cálculos realizados, el potencial teórico de biogás del tratamiento más efectivo (T1) apenas cubriría un 9% de las necesidades totales del bioparque. Varias consideraciones deben tenerse en cuenta al respecto. Primero, la temperatura se mantuvo sin manipulación durante todo el experimento, promediando un rango psicrófilico donde, en muchos casos, el tiempo de retención debe superar los 100 días para que la digestión anaerobia avance hacia la metanogénesis, especialmente con grandes volúmenes de materia orgánica, aunque en este experimento el volumen de estiércol fue relativamente bajo. No obstante, hubo fluctuaciones de temperatura durante la fase experimental, especialmente por la noche y en las primeras horas de la madrugada, cuando descendió a 10 °C. Estas variaciones abruptas podrían haber desestabilizado el proceso dentro del reactor, interfiriendo con la producción de biogás dentro del tiempo de retención adecuado. La FAO (2019) señala que una desestabilización en el proceso anaeróbico afecta directamente el contenido de metano del biogás, explicando así por qué los análisis mostraron concentraciones de metano inferiores al 4% en el T1. Este resultado también coincide con estudios de Malacatus et al. (2017), quienes encontraron

que el bajo contenido de metano puede atribuirse a la naturaleza específica de la materia orgánica, incluso cuando el tiempo de retención es significativamente mayor que en este experimento (Molina 2023).

4. Conclusiones

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

- Avcioğlu, A. O., y Türker, U. (2012). Status and Potential of Biogas Energy from Animal Wastes in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1557-61. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.006>.
- Ávila-Hernández, M., Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., y 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>.
- FAO. (2019). *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*.
- Garavito, O., y Gomero, L. (2020). Relación entre la producción de biogás y biol a partir de restos de trucha y estiércol vacuno. *South Sustainability*, 1(1), e008-e008. <https://doi.org/10.21142/SS-0101-2020-008>.
- Gerena Salamando, J. A., Ruiz Pineda, J. A., & Horta Losada, I. H. (2020). Energías renovables y su relación con los sistemas de gestión ambiental. Universidad Santiago de Cali

- International M. G. M. (2018). *Guía para la Evaluación de Elegibilidad de Financiación de Proyectos de Eficiencia Energética*. Tipo de Proyecto: Aire Comprimido.
- LOJAGAS. (2017). *Hoja de seguridad gas licuado de petróleo*.
- Malacatus, P., Jalme, M., Pantoja, C., y Cartuche, N. (2017). Análisis comparativo del potencial de Biogás obtenido de la fracción Orgánica de residuos sólidos urbanos. *Figempa*, 4(2), 53-64. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.69>.
- Molina, M. (2023). *Aprovechamiento energético del estiércol de mamíferos carnívoros y herbívoros silvestres bajo el cuidado humano a través de la digestión anaerobia*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.
- Núñez S., F., Urrutia S., F., González Z., E., & Urcelay V., S. (1987). Determinación química en excretas de cerdo sometidas a biodigestión anaeróbica en laboratorio. *Avances en Ciencias Veterinarias*, 2(1). <https://doi.org/10.5354/acv.v2i1.4479>.
- Proaño Piñeiros, J., y Toro Peralta, J. (2010). *Diseño y automatización de un Biodigestor*. Universidad del Azuay.
- Robayo, S. (2020). *Educación ambiental y tráfico ilegal de fauna silvestre*. Tesis de Maestría, U.D.C.A, Bogotá.
- Tahir, M. S., Shahzad, K., Shahid, Z., Sagir, M., Rehan, M., y Nizami, A. (2015). Producing Methane Enriched Biogas Using Solvent Absorption Method. *Chemical Engineering Transactions* 45, 1309-14. <https://doi.org/10.3303/CET1545219>.
- 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), 169-87.
- Wang, Y., Zhang, Y., Li, J., Lin, J. G., Zhang, N., y Cao, W. (2021). Biogas Energy Generated from Livestock Manure in China: Current Situation and Future Trends. *Journal of Environmental Management* 297. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113324>.

