

Artículo Científico / Scientific Article

Análisis de la biodigestión para la obtención de metano (CH₄) a partir de residuos orgánicos generados en la hacienda la Estrella, Ecuador.

Analysis of biodigestion to obtain methane (CH₄) from organic waste generated at hacienda la Estrella, Ecuador.

Roberto Johan Barragán Monrroy¹ , María Fernanda Reinoso Triana¹ , Carolina TayHing Cajas¹  y Carla Maria Sabando Cedeño¹ 

¹Universidad Técnica Estatal de Quevedo;

Dirección para recibir correspondencia: roberto.barragan2014@uteq.edu.ec

Recibido: 09/04/2024

Revisión: 18/10/2024

Aceptado: 10/11/2024

Resumen

Las emisiones de metano en la ganadería son generadas principalmente por la descomposición del estiércol almacenado o tratado, y aunque este en pequeñas cantidades no es tóxico, una exposición a largo plazo puede generar efectos negativos. La investigación aborda la necesidad de optimizar el proceso de conversión de estiércol bovino en biogás para reducir y aprovechar las emisiones de metano como fuente de energía limpia. El objetivo principal fue realizar un análisis de las deyecciones bovinas de la hacienda ganadera La Estrella para generar biogás utilizando un biodigestor piloto tipo batch. Se empleó un tanque de 208 l y se ocupó el 75% de su capacidad (156 l de estiércol + agua), se adaptó un higrómetro digital para medir la variación de temperatura y humedad interna, se monitorizó el metano con un equipo de gases GD, se calculó la cantidad de energía liberada, y se realizaron análisis en laboratorio del pH, sólidos totales, volátiles y fijos con el propósito de evaluar el comportamiento de las variables durante el tiempo de retención (1 mes). Los resultados mostraron una temperatura promedio de 40.6°C, humedad del 96.1%, concentración de metano de 23696 ppm, pH de 7.01 y contenidos de ST 15%, STV 5.81% y STF 9.66%, mismos que indicaron un correcto funcionamiento del biodigestor en cuanto a la calidad de producción de biogás. Se concluye que la investigación cumplió con los requisitos para el proceso anaeróbico y la obtención de metano.

Palabras claves: digestión anaerobia, biodigestor, metano, biogás, estiércol, vacuno.

Abstract

Methane emissions from livestock farming are generated mainly by the decomposition of stored or treated manure, and although small quantities of methane are not toxic, long-term exposure due to livestock farming practices can have negative effects. The research addresses the need to optimize the process of converting bovine manure into biogas to reduce these emissions and take advantage of methane as a clean energy source. The main objective was to perform an analysis of bovine manure from the La Estrella cattle farm to generate biogas using a batch-type pilot biodigester. A 208-l tank was used and 75% of its capacity was occupied (156 l of manure + water), a digital hygrometer was adapted to measure the variation in temperature and internal humidity, methane was monitored with a GD gas equipment, the amount of energy released was calculated, and laboratory analyses of pH, total, volatile and fixed solids were performed in order to evaluate the behavior of the variables during the retention time (1 month). The results showed an average temperature of 40.6 ° C, humidity of 96.1%, methane concentration of 23,696 ppm, pH of 7.01 and contents of ST 15%, STV 5.81% and STF 9.66%, which indicated a correct operation of the biodigester in terms of the quality of biogas production. From the above, it is concluded that the research met the requirements for the anaerobic process and the obtaining of methane.

Key words: anaerobic digestion, biodigester, methane, biogas, manure, cattle.



© 2024 Roberto J. Barragán M., María F. Reinoso T., Carolina. TayHing C., y Carla M. Sabando C.

1

Agua, Saneamiento & Ambiente, es editada por la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Esta obra está protegida bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-Compartir Igual 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Introducción

La creciente problemática a nivel mundial de los residuos orgánicos y las emisiones de gases constituye uno de los desafíos más urgentes que se enfrentan en la actualidad. La gestión deficiente de los residuos sólidos orgánicos es uno de los principales generadores de gases de efecto invernadero, incluido el metano (CH_4), lo que conduce a la contaminación del suelo y las fuentes de agua. Además, deteriora la calidad del aire, exacerbando así estos impactos negativos en el entorno y contribuyendo al cambio climático (Hernández, 2022). Por ello, es fundamental implementar sistemas eficaces de gestión de residuos, que permitan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, preservar la calidad de los recursos naturales y proteger la biodiversidad.

En todos los países existen fuentes de energías renovables, cuyo potencial no se ha aprovechado completamente, un claro ejemplo de este tipo de energías y que cada vez se extiende un poco más es el biogás, que se posiciona como una energía limpia y que, además, contribuye al ahorro de costes de producción, siendo utilizada como una herramienta en la lucha contra la problemática ambiental actual (Gutierrez, 2022). Una alternativa esencial para mejorar la gestión de los desechos mediante el uso del biogás es la valorización energética de los residuos. Esta práctica se ha convertido en un área de investigación y desarrollo de suma relevancia, ya que posibilita la captura y utilización del biogás como fuente de combustible y/o electricidad (Varnero, 2011; Zelaya, 2017).

La digestión anaeróbica al ser solución sostenible para gestionar los residuos orgánicos que ocurre naturalmente en ausencia de oxígeno ofrece múltiples ventajas. No solo permite la generación de energía renovable y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también produce subproductos valiosos y fomenta una gestión más sostenible de los residuos. Esto se logra utilizando un biodigestor, el cual produce biogás, compuesto principalmente por metano, vapor de agua y compuestos orgánicos y al utilizar biogás como fuente de energía renovable resulta eficaz y económicamente beneficioso, además de contribuir positivamente al medio ambiente (Lucas et al., 2012; Palau & Carmen, 2016; Sánchez, 2017).

El proceso de obtención de biogás ha demostrado una alta eficiencia durante su ejecución, ya sea a corto o largo plazo. En este sentido, el sistema de supervisión de los parámetros debe enfocarse en el comportamiento de las variables que intervienen en el proceso anaeróbico, para una correcta identificación de los tiempos requeridos para la generación de biogás. (Gómez et al., 2021). En la ciudad de Querétaro, México, se aprovecharon las excretas animales en un rancho ganadero mediante la implementación de un biodigestor automatizado, los resultados mostraron que el uso de sensores para la medición de la temperatura, presión y metano (28 - 31°C; 1.20 kPa, 546 ppm), respectivamente, fueron viables para la identificación de los parámetros que intervienen en la generación de biogás (Ramírez et al., 2017). Por otra parte, Roldán et al., (2021) utilizó un biodigestor de tipo salchicha tubular de plástico de polietileno, sometido a un corto tiempo de retención del que se obtuvo que, a partir de los 5.81 m³ de biogás obtenidos en su investigación, el porcentaje de gas metano fue de aproximadamente 70%, lo que correspondió a 4.067 m³ y generó 18,301.5 kcal de energía, en el noroccidente de la provincia de Pichincha, Ecuador.

En Ecuador, los biodigestores de gran tamaño son escasos ya que predominan los biodigestores de pequeña escala en áreas rurales. A pesar de que el país posee un gran potencial ganadero, especialmente en el cantón Baba, que alberga más de dos mil hectáreas dedicadas a la ganadería (Almache, 2009; Soria & Carvajal, 2013), la ausencia de proyectos e investigaciones enfocados en esta problemática es evidente. Esto se agrava por la escasa difusión del uso del biogás como tecnología en el territorio ecuatoriano en la actualidad (Durazno, 2018).

La problemática de las emisiones de gases de efecto invernadero, como el metano (CH_4), generado por el estiércol bovino, ha sido ampliamente abordada a través de la digestión anaeróbica, la cual ha demostrado su eficacia en la producción de biogás en múltiples estudios. No obstante, en Ecuador, el uso de biodigestores a gran escala es limitado, especialmente en áreas rurales como el cantón Baba, donde la ganadería es una actividad predominante. La presente investigación busca aportar datos específicos sobre la eficiencia de un biodigestor piloto en la hacienda La Estrella, caracterizando las condiciones locales y optimizando el proceso de biodigestión para generar

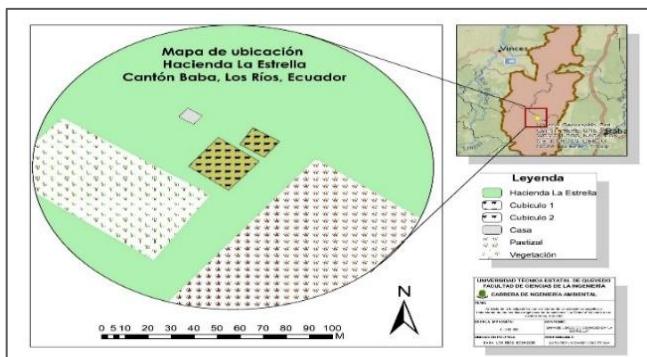
energía renovable de manera sostenible, contribuyendo así a la implementación de tecnologías de aprovechamiento energético en la región, algo que ha sido poco explorado en el contexto ecuatoriano.

El presente estudio se realizó con el objetivo de analizar las deyecciones bovinas de la hacienda ganadera La Estrella para generar biogás, además, con la información obtenida se busca establecer un precedente sobre la implementación de un sistema de valorización energética y tratamiento de los residuos orgánicos utilizando un biodigestor a escala piloto, dando mayor relevancia y promoción a la utilización de energías alternativas sostenibles.

Área de localización

La hacienda La Estrella se encuentra ubicada entre los límites territoriales de la cabecera cantonal y la parroquia Isla de Bejucal, en el recinto Arenillas del cantón Baba, como se muestra en la figura 1; el lugar abarca una extensión total de 267 hectáreas y cuenta con dos cubículos designados a la crianza de 277 cabezas de ganado de todas las edades. Sus coordenadas geográficas son: UTM WGS 1984; X: 647652,40 – Y: 9806322,80.

Figura 1. Mapa de la hacienda la Estrella



Materiales y método

Para el desarrollo de la investigación, se aplicaron distintos métodos que permitieron abordar de manera integral el estudio sobre el manejo de residuos orgánicos en la hacienda La Estrella.

Se llevó a cabo un enfoque diagnóstico, que permitió un análisis detallado del estado actual de estos residuos, además, se empleó un enfoque exploratorio, que involucró revisiones preliminares para fundamentar la metodología de investigación,

especialmente en lo relacionado con la tecnología de tratamiento de residuos orgánicos a través de la biodigestión. Los métodos estadísticos descriptivo, paramétrico y no paramétrico fueron fundamentales para analizar la variación de los parámetros medidos en el proceso de biodigestión, asegurando la fiabilidad de los resultados obtenidos. Se utilizaron pruebas de normalidad, test de Kruskal-Wallis, y Anova para evaluar la existencia de diferencias estadísticas significativas entre los distintos datos.

Diseño experimental

El estudio se realizó bajo un diseño experimental completamente al azar utilizando un biodigestor piloto de tipo batch. Se establecieron mediciones en diferentes momentos del tiempo de retención del sustrato, con la finalidad de evaluar la evolución de los parámetros fisicoquímicos y la producción de biogás. Se determinó la cantidad de estiércol a utilizar y la relación estiércol/agua basada en referencias previas sobre digestión anaeróbica. El biodigestor fue construido con un tanque de 208 litros, del cual se ocupó el 75% de su capacidad con la mezcla de estiércol y agua. Se implementaron sensores de temperatura y humedad para el monitoreo continuo de las condiciones internas del sistema. La producción de biogás se midió utilizando un analizador de gases GD calibrado previamente.

Caracterizar la generación de residuos en la hacienda La Estrella

La caracterización de las deyecciones en la hacienda permitió conocer la cantidad de materia orgánica generada. El registro se realizó usando un formato diseñado para la cuantificación diaria, este proceso se desarrolló durante un mes, desde el 9 de octubre hasta el 5 de noviembre del 2023. Para realizar el cálculo de la generación de estiércol que se produce diariamente, se tomó en cuenta el número de vacas de la hacienda, adicionalmente se tomó el valor promedio de generación de estiércol de vaca/día, para esto se utilizó la ecuación 1:

$$ET_g = EP_c * \#C_g \quad (1)$$

Donde:

ET_g = La cantidad promedio de estiércol generado en la hacienda en un día (kg/d).

EP_c = Cantidad promedio de estiércol generada por una vaca al día (kg/d).

$\#C_g$ = Número de bovinos actuales en la hacienda.

Construcción del biodigestor

En cuanto al biodigestor a escala piloto, este es un sistema experimental o prototipo diseñado para simular y evaluar el funcionamiento de un biodigestor a pequeña escala antes de su implementación a gran escala (Nuhu et al., 2021). Para su construcción se utilizaron diferentes materiales, los pasos a seguir fueron:

- Adaptación de un tanque
- Instalación de llave de paso en la campana de almacenamiento del biodigestor
- Instalación de llave en la parte inferior y céntrica del biodigestor
- Instalación de termómetro digital y manómetro

Por otra parte, las deyecciones fueron recolectadas en baldes plásticos y pesados en una balanza, luego se introdujeron en el biodigestor y se añadió agua de tal manera que se cumpla con la relación estiércol + agua, esta se utilizó en dependencia del tipo de deyección utilizado, en este caso en estado fresco (Tabla 1).

Tabla 1. Relación estiércol + agua

Nº	Tipo de deyección	Relación
1	Bovino fresco	1:1
2	Bovino seco	1:2
3	Porcino	1:2
4	Aves	1:1
5	Equino	1:2
6	Desechos humanos	1:1
7	Desechos vegetales	1:0.5 – 1:2

Fuente: Salazar & Arias (2016)

Determinación del volumen, densidad y sustrato

Se realizaron cálculos para la determinación del volumen (2), densidad (3) y cantidad de sustrato (4), según las ecuaciones 2, 3 y 4 mostradas a continuación:

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

Donde:

V = Volumen del estiércol (m^3)

π = Valor de pi

r = Radio del balde (m)

h = Altura que ocupa el estiércol en el recipiente (m)

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3)$$

Donde:

ρ = Densidad (kg/m^3)

M = Masa del estiércol (kg)

$$V = \text{Volumen} \text{ (m}^3\text{)}$$

$$Vs = Cc * 0,75 \quad (4)$$

Donde:

Vs = Volumen del sustrato (l)

Cc = Capacidad del recipiente (l)

Monitoreo de metano (CH_4)

Se llevaron a cabo mediciones de gas metano (CH_4) utilizando un equipo de gases CGD02A previamente calibrado, estas se realizaron semanalmente desde el 14 de diciembre del 2023 hasta el 4 de enero del 2024, y se obtuvieron directamente de la llave del biodigestor ubicada en la campana de almacenamiento.

La primera medición se llevó a cabo el día 14, puesto que luego de los primeros siete días de operabilidad del tanque se realizó un proceso de purga: “abrir la llave por unos segundos para liberar aire que impida la consecuente formación de metano”. La distancia de medición fue de 5 cm, conforme a las especificaciones del equipo. Los datos se obtuvieron en unidades de ppm.

Valoración energética

Se tomó como base la cantidad total de las deyecciones y mediante regla de tres se obtuvo el volumen en metros cúbicos de biogás por cada kilogramo de materia orgánica, también se obtuvo el volumen de metano contenido en el total del biogás. Además, se calculó la energía liberada por el biogás y CH_4 y el porcentaje que representó cada uno en la composición final.

El volumen total de biogás producido se determinó a partir de la cantidad de estiércol introducido en el biodigestor, utilizando la relación de generación de biogás por kilogramo de estiércol. Para este estudio, se empleó la concentración de metano medida con el equipo CGD02A y, mediante cálculos basados en la regla de tres, se estimó el volumen de biogás generado por cada kilogramo de estiércol añadido. La fórmula utilizada para estimar el volumen de biogás producido por kg de estiércol fue:

$$\text{Volumen de biogas (m}^3\text{)} = \frac{\text{Volumen total del biogas}}{\text{Cantidad de estiércol}} \quad (5)$$

Este enfoque permitió obtener la cantidad de biogás producido por kilogramo de materia orgánica,

facilitando así la evaluación de la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica.

Monitoreo de parámetros fisicoquímicos

Se realizó un monitoreo de varios parámetros fisicoquímicos como la temperatura y humedad, cuya medición se realizó en tres momentos distintos del día (6 a. m., 12 p. m. y 6 p. m.) durante 38 días, desde el 1 de diciembre de 2023 hasta el 7 de enero de 2024. Por otro lado, se midió en laboratorio de química de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, el pH, sólidos totales, volátiles y fijos, una vez por semana en el mismo período de tiempo que se registraron los datos de las variables mencionadas anteriormente.

Análisis estadístico

Los parámetros: temperatura, humedad, pH, metano, sólidos totales, volátiles y fijos; se procesaron con análisis estadísticos usando el software InfoStat. Se realizaron pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov (Toledo et al., 2014). Después de la prueba de normalidad, se seleccionó entre análisis paramétricos y no paramétricos. La elección entre Kruskal-Wallis y ANOVA dependió de los supuestos para ANOVA paramétrico. Si los datos no eran normalmente distribuidos, se optó por Kruskal-Wallis para comparar grupos independientes (Amat, 2016).

Construcción del biodigestor

En la figura 2 se muestra el modelo construido. Se construyó un biodigestor de tipo batch, para lo cual se utilizó un tanque de 208 l, en este se adaptaron tres llaves de paso; una en la parte superior, conectada a una manguera para la salida del biogás; otra en la zona central superior, funcionando como indicador de la altura del contenido en el tanque; y una tercera en la parte inferior, destinada a la extracción del biol.

Para la alimentación del biodigestor con la mezcla orgánica se añadió un tubo de entrada, adicionalmente, se instaló un higrómetro digital para el control diario de la temperatura, así como un manómetro para el seguimiento semanal de la presión generada por el biogás en la cúpula del tanque.

Por último, en la parte superior del tanque se instaló una manivela que cuenta con aspas diseñadas para agitar y mezclar la materia orgánica contenida en el tanque de manera efectiva.

Figura 2. Modelo de biodigestor tipo batch.



Resultados

Caracterización de las deyecciones

Los datos obtenidos se encuentran detallados en la tabla 2, expresados en kilogramos. Se muestra que un solo ejemplar de ganado en la hacienda La Estrella produce, en promedio, 47.53 kg de estiércol al día.

Tabla 2. Registro de caracterización diaria de estiércol bovino

Sem.	1	2	3	4
Lunes	11.60	10.56	8.62	11.37
Martes	10.56	11.48	10.90	13.69
Miércoles	11.50	13.62	12.57	11.98
Jueves	9.67	11.78	12.56	11.29
Viernes	12.46	10.98	11.69	13.50
Sábado	11.88	9.48	12.76	11.86
Domingo	12.38	12.02	13.99	15.24
Total	80.77	79.92	83.09	88.89
Prom.	11.54	11.42	11.87	12.70
D.E.	1.26	1.29	1.72	5.75

Este valor se utilizó como base para calcular la generación diaria promedio de estiércol para el conjunto completo de ganado en la hacienda misma que cuenta con 277 vacas. Utilizando la ecuación 1, se obtuvo que la cantidad total de deyecciones que es generada por todo el ganado de la hacienda La Estrella es de 13,165.81 kg/día.

Recolección de materia orgánica

La cantidad de estiércol recolectada fue de 65.5 kg en estado fresco. Esta materia prima se obtuvo mediante una cuidadosa recolección manual, seleccionando estiércol que no contenía tierra, montes u otros objetos ajenos a su contenido. El proceso de recolección se llevó a cabo durante tres días. En el primer día, se recolectaron 19.7 kg; en el segundo día, 21.77 kg; y en el tercer día, 24.03 kg, sumando un total de 65.5 kg. Mismo que fue mezclado con base en la relación 1:1 (estiércol más agua) e introducido en el tanque.

Determinación del volumen, densidad y sustrato

Se determinó el volumen de estiércol presente en el tanque, mismo que fue de 0.18 m³.

$$V = \pi * (0.29m)^2 * 0.69m = 0.18 m^3$$

La densidad del estiércol presente en el biodigestor piloto corresponde a 363.88 kg/m³, lo cual es un indicador de la presencia de una mayor cantidad de biogás, ya que la densidad más alta sugiere que hay una considerable cantidad de materia orgánica presente, y, en consecuencia, condiciones adecuadas para el desarrollo de los microorganismos anaerobios.

$$\rho = \frac{65.5 \text{ kg}}{0.18 \text{ m}^3} = 363.88 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

En base al cálculo se requirieron 156 litros de sustrato para alimentar el biodigestor. Esta cantidad se dividió equitativamente, añadiendo 78 litros de estiércol y 78 litros de agua al biodigestor, según la relación 1:1 estiércol + agua. Una vez completado este proceso, la mezcla de estiércol y agua se introdujo en el biodigestor, dando inicio al proceso de biodigestión dentro del tanque.

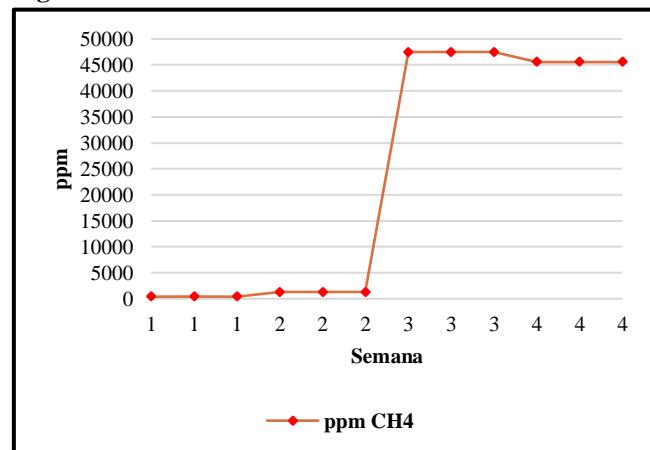
$$Vs = 208 l * 0.75 = 156 l$$

Monitoreo de metano (CH₄)

En la figura 3 se representa el comportamiento de las concentraciones de metano, mismas que aumentaron gradualmente durante las diferentes semanas, con valores que oscilaron entre los 400 ppm

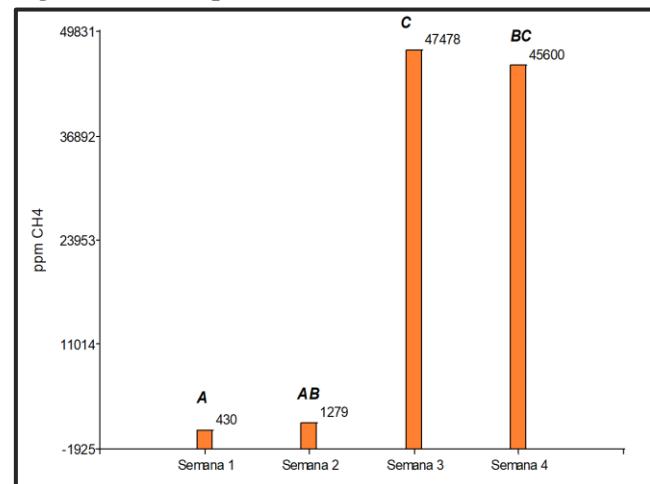
hasta casi 50,000 ppm. Al concluir la primera semana de operación del tanque, se registró un total de 430 ppm de CH₄, y al finalizar el pico máximo de CH₄ fue de 47,478 ppm.

Figura 3. Medición semanal de CH₄



El valor del test de Kruskal-Wallis ($H = 10.38$) con un p -valor de 0.0156 indicó que existen diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de CH₄ entre las diferentes semanas, la figura 4 muestra que las concentraciones de CH₄ en la semana 3 son significativamente diferentes a las de las otras semanas y se observa una tendencia creciente en las concentraciones de CH₄ desde la semana 1 hasta la semana 3, con una disminución en la semana 4.

Figura 4. Niveles promedios de CH₄



Valoración energética

En la tabla 3 se puede observar que el volumen total de biogás que se generó para el biodigestor fue de 0.21288 m³, mientras que el CH₄ ocupó 0.14901 m³ de este volumen. Además, se obtuvo una energía total de biogás de 1,000.51 kcal/ m³, mientras que el metano ocupó 670.56 kcal/ m³ de esta energía, que representa el 67% del contenido total.

Tabla 3. Valoración energética del biogás

Gas	Volumen (m ³)	Energía (kcal/ m ³)	%
Biogás	0.21288	1000.51	100%
Metano	0.14901	670.56	67%

Utilizando la cantidad de estiércol recolectado (65.5 kg) y el volumen total de biogás generado (0.21288 m³), se obtiene que la producción específica de biogás y metano es de:

$$\text{Volumen de biogas (m}^3\text{)} = \frac{0.21288\text{m}^3}{65.5\text{kg}} = 0.00325\text{m}^3/\text{kg}.$$

$$\text{Volumen de CH}_4 = \frac{0.14901\text{m}^3}{65.5\text{kg}} = 0.00227\text{m}^3/\text{kg}.$$

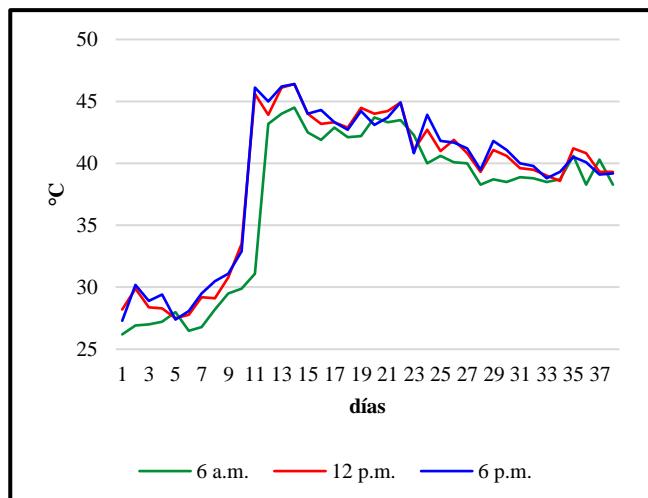
Así, la producción de metano se puede expresar como 39.21 ml de CH₄ por gramo de SV añadidos. Por lo tanto, la producción de metano es de 39.21 m³ de CH₄ por ton de SV añadidos.

La presente investigación aporta nuevos datos científicos sobre la eficiencia de un biodigestor a escala piloto, evaluando el potencial de generación de metano a partir de estiércol bovino bajo las condiciones específicas de la hacienda La Estrella, en el cantón Baba, Ecuador. Al caracterizar la producción de biogás y metano por kilogramo de sólidos volátiles, este estudio ofrece un enfoque replicable y adaptado al contexto ecuatoriano, que puede mejorar el aprovechamiento energético de los residuos ganaderos y contribuir al desarrollo de tecnologías sostenibles en el país.

Temperatura

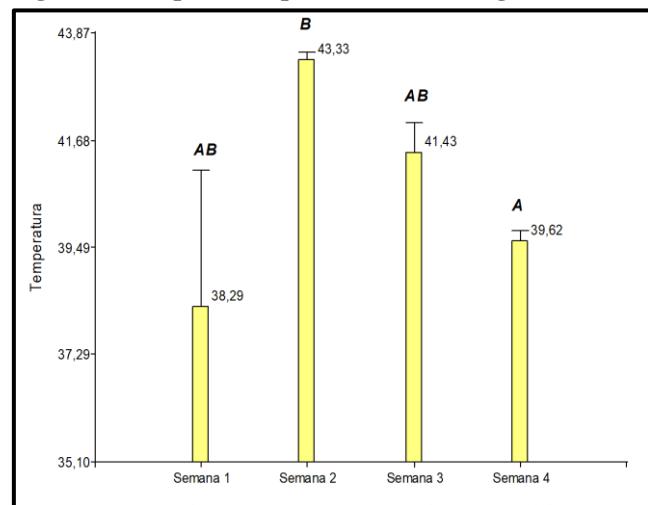
Tal como se muestra en la figura 5, la temperatura interna del biodigestor se mantuvo constante en los tres horarios durante los primeros diez días. Sin embargo, a partir del día 11, se registró un aumento significativo en esta variable, alcanzando picos de hasta 45°C en todos los horarios de medición.

Figura 5. Temperatura interna del biodigestor



Por consiguiente, en la figura 6 se representa la temperatura promedio del biodigestor. El valor del test de Kruskal-Wallis ($H = 11.10$) con un p-valor de 0.0112 indica que existieron diferencias significativas en las temperaturas, principalmente en las semanas 2, donde se registró el promedio más alto y en la semana 4, como se muestra en la figura 6. Esto pudo verse influenciado por la temperatura promedio de la zona donde se ubicó el digestor, la cual fue de 26.5°C, la cual se mantuvo en rangos estables de acuerdo con las condiciones climatológicas del cantón Baba, contribuyendo al proceso de biodigestión.

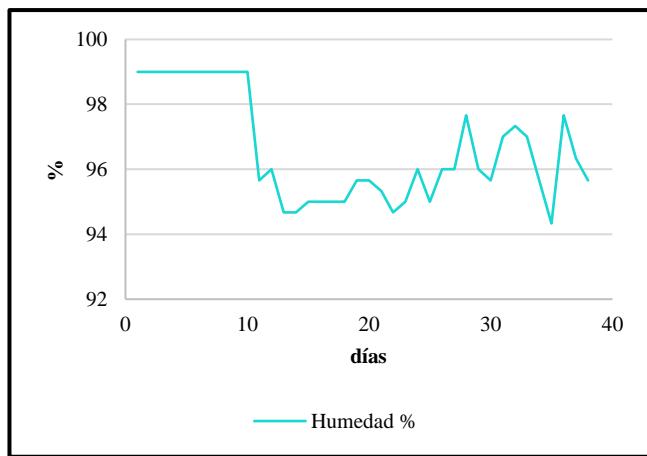
Figura 6. Temperatura promedio del biodigestor



Humedad

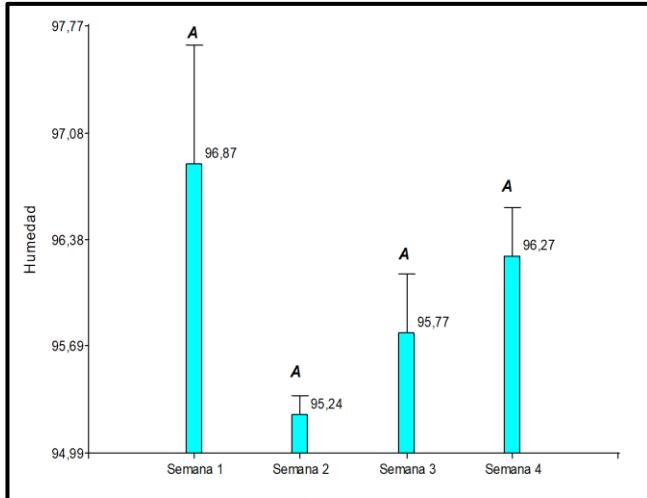
En la figura 7, se observa que este parámetro experimentó un descenso gradual. En el día 11, se registró el primer cambio, disminuyendo del 99% al 95%, este cambio se produjo al mismo tiempo del cambio de temperatura, esto se debe a que ambas variables interactúan mutuamente. Posteriormente, la humedad se mantuvo dentro de rangos entre el 94% y el 97%. El porcentaje de humedad promedio del contenido del biodigestor durante los días de retención fue del 96.1%.

Figura 7. Humedad interna del biodigestor



Por su parte, el test de Kruskal-Wallis ($H = 10.38$) con un p -valor de 0.0156 afirma que existieron diferencias significativas, principalmente en las semanas 2 y 4, como se evidencia en la figura 8.

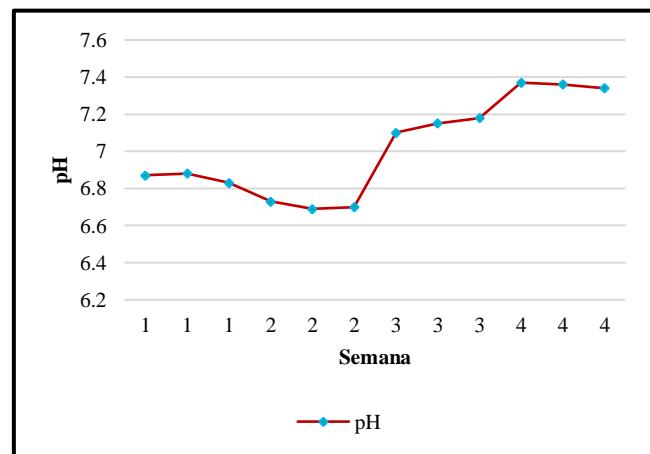
Figura 8. Humedad promedio del biodigestor



pH

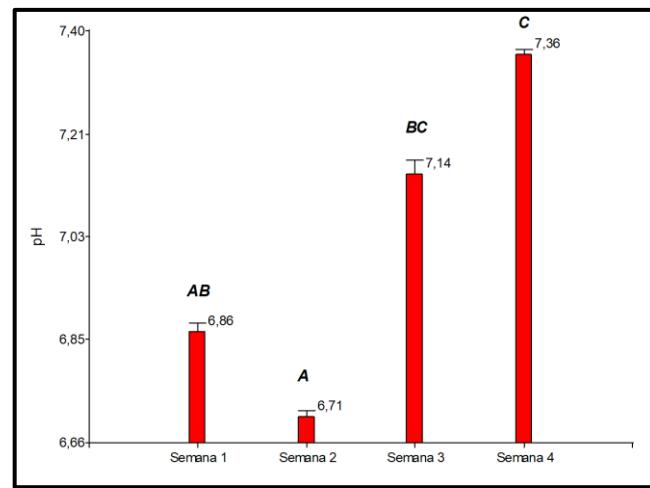
En la figura 9 se puede observar el comportamiento del pH, el cual transcurrida la primera semana de operación del biodigestor mostró un rango ligeramente ácido de pH, 6.86, valor que no tuvo mayor cambio 14 días después del periodo. Por el contrario, en la tercera y cuarta semana los datos registrados (7.14; 7.36) indicaron rangos de neutralidad en el proceso anaerobio.

Figura 9. Medición semanal de pH



Por su parte, la prueba de Kruskal-Wallis ($H = 10.38$) con un p -valor de 0.0156 afirma que existieron diferencias significativas, principalmente en las semanas 2 y 4, como se evidencia en la Figura 10.

Figura 10. Rangos promedios de pH

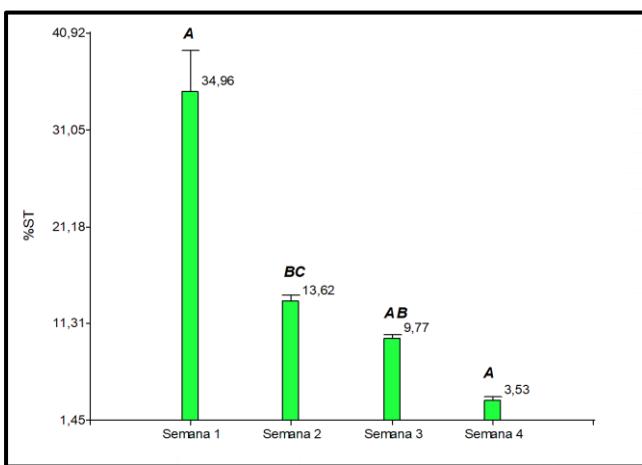


Sólidos totales (ST)

El contenido de ST experimentó una disminución progresiva a lo largo del tiempo de retención, como se observa en la figura 8. El proceso de biodigestión inició con un valor promedio de 34.9% de ST, luego, el porcentaje de ST disminuyó, se registró un 3.53% de contenido una vez concluido el proceso anaeróbico.

En base a la prueba de Kruskal-Wallis ($H = 10.38$) con un p -valor de 0.0156 se demostró que existieron diferencias significativas en los datos, principalmente en las semanas 1 y 4, como se evidencia en la figura 11.

Figura 11. Promedio de sólidos totales

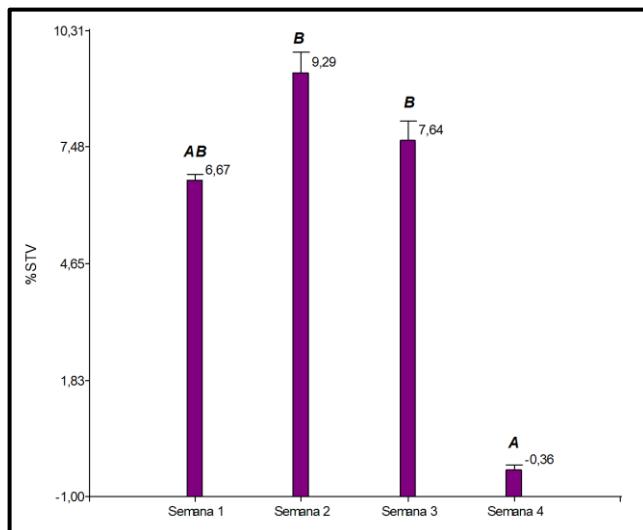


Sólidos totales volátiles (STV)

Al inicio del proceso, el porcentaje promedio de STV, fue de 6.67%, el cual experimentó un ligero aumento durante la segunda semana de operación del proceso, así se visualiza la figura 12. Al concluir el tiempo de retención, se registró un valor negativo en el porcentaje los STV, alcanzando -0.36%, esto indica una remoción que excede el 100% del contenido orgánico presente en los STV.

En consecuencia, la prueba de Kruskal-Wallis ($H = 9.51$) con un p -valor de 0.0232 señala que existieron diferencias significativas en los datos, principalmente en las tres últimas semanas del proceso, como efecto de la actividad microbiana.

Figura 12. Promedio de sólidos totales volátiles

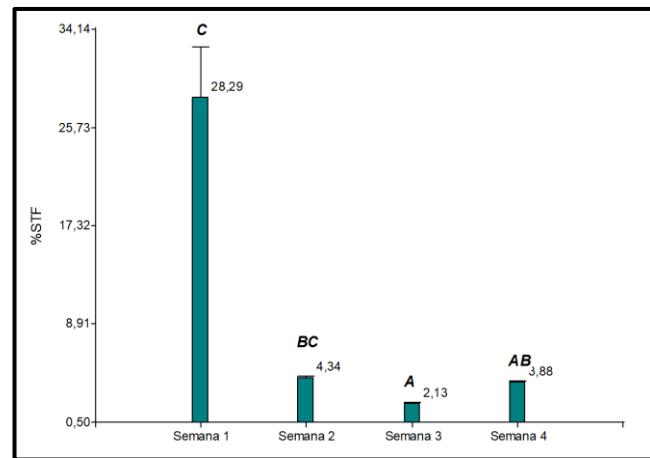


Sólidos totales fijos (STF)

Al inicio de la operación el sistema anaerobio registró un contenido promedio del 28.29% de STF, en la segunda semana los STF se redujeron a 4.34%. Posteriormente, los STF registraron al final apenas un 3.88% de presencia, lo que indica que sufrieron una remoción del 86% de su contenido durante el tiempo de retención.

En base a la prueba de Kruskal-Wallis ($H = 10.38$) con un p -valor de 0.0156 confirma que en la semana uno y tres existieron diferencias estadísticamente significativas con respecto a los datos, como se observa en la figura 13.

Figura 13. Promedio de sólidos totales fijos



Discusión de resultados

El tiempo de retención al que fue sometido el sustrato fue de 38 días, esto debido a que luego de los siete días de operabilidad del biodigestor se realizó un proceso de purga, que consistió en abrir la llave de paso del biogás por unos segundos para liberar el aire que impide la consecuente formación de metano, por ende, la primera medición de metano se realizó en el día 14, es decir, la primera semana del proceso anaeróbico ininterrumpido, de la cual se registró un total de 430 ppm de CH₄, a diferencia de Ramírez et al., (2017) que a los seis días registraron 15,000 ppm de CH₄, una clara diferencia, sin embargo, en el mismo estudio a partir de la tercera semana la concentración de CH₄ se mantuvo en 35,000 ppm, mientras que en este estudio el pico máximo de CH₄ fue de 47,478 ppm, lo cual indica que la generación de biogás en este estudio fue superior.

El resultado de 39.21 m³ de CH₄ por tonelada de sólidos volátiles (SV) añadidos se encuentra en concordancia con investigaciones previas. Estudios como los de Amani et al. (2011) reportaron valores cercanos a 35-45 m³ CH₄/t SV en biodigestores con estiércol bovino, dependiendo de las condiciones operativas y del tipo de sustrato empleado. Por otro lado, Chen et al. (2015) encontraron valores de hasta 42 m³ CH₄/t SV en condiciones mesofílicas similares. Estas cifras sugieren que la eficiencia de la digestión anaeróbica en el presente estudio está dentro del rango esperado para este tipo de biodigestores.

El volumen total de biogás generado fue de 0.21288 m³ en 31 días, sin considerar la semana de purga, Roldán et al., (2022) obtuvieron un valor de 5.81 m³ en un periodo similar, la diferencia entre los valores se atribuye al tipo de biodigestor utilizado en cada caso, ya que, al emplear un sistema de mayor escala, se requiere una cantidad proporcionalmente mayor de materia orgánica, lo que conlleva a una mayor producción de biogás. Moncayo (2017) establece que el poder calorífico del biogás es de 4,700 – 5,500 kcal/m³, en este estudio se obtuvo un total de 1,000.51 kcal/m³ lo cual se encuentra lejos de los límites mencionados, por otra parte, el CH₄ representó el 67% del contenido total, en la investigación de Suárez et al., (2018) los autores encontraron un contenido de metano del 57%, por lo cual, de acuerdo con lo expresado por Gutiérrez et al. (2012), como se citó en Lloja (2018), se espera que este contenga entre un 50% y un 80% de gas

metano en su composición para considerar el biogás obtenido como de calidad y combustible.

El incremento de 15°C con respecto a la temperatura ambiente se explica desde dos perspectivas: bioquímica y climatológica. Desde el punto de vista bioquímico, la actividad microbiana dentro del biodigestor genera calor como subproducto del metabolismo anaeróbico, principalmente debido a la descomposición de materia orgánica por bacterias hidrolíticas, acidogénicas y metanogénicas (Angelidaki et al., 2011). Investigaciones han demostrado que, en condiciones mesofílicas, la temperatura del biodigestor suele ser superior a la del ambiente debido a la liberación de energía en forma de calor por las reacciones bioquímicas involucradas en la degradación de los sustratos (Khalid et al., 2011).

Desde el punto de vista climatológico, la ubicación del biodigestor también influye en la temperatura interna. Investigaciones previas han evidenciado que biodigestores expuestos a radiación solar directa pueden presentar incrementos térmicos significativos debido a la absorción de calor (Khalid et al., 2011). En este estudio, la temperatura ambiente promedio fue de 26.5°C, mientras que la interna alcanzó los 40.6°C, lo cual sugiere que la combinación de la actividad microbiana y la absorción de radiación solar contribuyeron a este incremento.

La temperatura de funcionamiento del biodigestor se considera como uno de los parámetros más importantes debido a la influencia significativa en la velocidad del proceso de digestión anaeróbica. Los microorganismos anaeróbicos tienen la capacidad de operar en tres intervalos de temperatura distintos: los psicrófilos, que trabajan por debajo de los 25°C; los mesófilos, que operan entre los 25 y 45°C; y los termófilos, cuyo rango de trabajo se sitúa entre los 45 y 65°C. Ahora bien, dado que la temperatura se incrementó significativamente alcanzando picos de hasta 45°C, resulta apropiado decir que el proceso se encontraba dentro del rango de operación mesóflico, el cual ha demostrado ser un nivel óptimo para una mayor producción de biogás según señala Tapia (2016).

Al analizar los datos registrados de la humedad interna del biodigestor mostrados en las figuras 7 y 8, puede apreciarse una disminución de este parámetro, lo cual resultó apropiado para lograr una alta

transformación del material orgánico y mejorar la eficiencia del proceso anaeróbico, tal como señalan Vargas et al., (2019). Asimismo, el porcentaje promedio de humedad (96.1%) durante los días de retención fue superior al 50%, que es el requerido para que la materia orgánica pueda ser aprovechada energéticamente por los microorganismos anaerobios (Lock, 2018).

La medición de los rangos de pH en el proceso de la biodigestión es importante, ya que este parámetro no debe ser menor a 6.0 ni mayor a 8.0 para favorecer el crecimiento de los microorganismos productores de metano (Gómez et al., 2021). En este caso, durante las dos primeras semanas se registraron rangos ácidos de pH; sin embargo, esto cambió a partir del día 14 post proceso de purga, donde el pH registrado indicó que el contenido se encontraba en rangos de neutralidad, que según lo expresado es óptimo. Por el contrario, si el pH hubiera descendido o incrementado fuera de este rango, habría ocurrido la inhibición del crecimiento de las bacterias metanogénicas, lo que habría resultado en una reducción en la producción de metano y un aumento en los niveles de CO₂, además de la presencia de olores desagradables debido al aumento de sulfuro de hidrógeno.

Los valores obtenidos del contenido de sólidos totales disminuyeron significativamente. Sin embargo, para el funcionamiento óptimo de un biodigestor de una sola carga se requiere un contenido inicial del 40% de ST. En esta investigación, la carga inicial de ST fue ligeramente menor. No obstante, la diferencia entre el porcentaje requerido para el funcionamiento adecuado del sistema de biodigestión al ser mínima no afectó la producción de biogás. El valor final de ST presentes indicó que se generó una mayor producción de biogás y un consumo de nutrientes por parte de las bacterias metanogénicas presentes en la composición (Quechulpa et al., 2020).

Los sólidos totales volátiles representan la fracción orgánica de sólidos que se convierten en biogás. Por lo tanto, el hecho de que al finalizar el tiempo de retención se registraran valores negativos de la presencia de STV en el contenido, indica la ausencia de estos componentes en la composición. Esto afirma una remoción que excede el 100% del contenido orgánico, lo cual supera la estimación proporcionada por Karim

et al. (2005), quienes indican una remoción superior al 63% de los STV.

En cuanto a los sólidos totales fijos estos los residuos no digeribles y su presencia puede afectar la eficiencia de la biodigestión, ya que estos residuos no se descomponen durante el proceso y pueden reducir la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos, así lo indican (Reyes & Pérez, 2019), en caso de la presencia de STF en el biodigestor estos se redujeron en el transcurso del tiempo de retención, esto afirma que se generó una descomposición más efectiva de los residuos sólidos en el contenido del biol. Un valor de remoción similar fue reportado por Casadiego (2005), en donde, los sólidos fijos tuvieron una reducción de 82% en su contenido para un modelo de biodigestor de flujo continuo.

Las variables independientes que más influyeron en las variables de respuesta fueron la temperatura, el pH y la cantidad de sustrato. La temperatura es un factor clave en la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica, ya que regula la actividad de las bacterias metanogénicas. Estudios han demostrado que temperaturas en el rango mesofílico (alrededor de 35 °C) favorecen una mayor producción de metano debido a la aceleración del metabolismo microbiano. Por ejemplo, Gómez y Ramírez (2023) encontraron que una temperatura de 35 °C resultó en una producción de metano del 78,34% en la digestión anaerobia del estiércol de ganado vacuno.

Asimismo, el pH dentro del rango neutro (6,5 - 7,5) es fundamental para evitar la inhibición de las bacterias metanogénicas. Un estudio evaluó la influencia del pH en la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal y encontró que los pH cercanos a la neutralidad lograron las mejores producciones de metano, siendo la producción a un pH de 7,0 unidades la mayor, con 126,0 mL CH₄/g SV.

La cantidad de sustrato disponible influye directamente en la generación de biogás, ya que una mayor concentración de materia orgánica proporciona una fuente constante de nutrientes para los microorganismos involucrados en el proceso. Es importante mantener un equilibrio adecuado, ya que una sobrecarga de sustrato puede llevar a la acumulación de ácidos grasos volátiles y a la inhibición del proceso, mientras que una cantidad insuficiente

puede resultar en una baja producción de biogás (Parra et al., 2014).

Conclusiones

Se determinó que la generación de estiércol diario en la hacienda fue de 47.53 kg/d de estiércol por animal y 13,165.81 kg/d por el total de animales presentes. La abundancia de estiércol facilitó el ensayo del biodigestor piloto con una carga de 65.5 kg, obteniendo una densidad óptima para el desarrollo del proceso anaeróbico.

A lo largo del tiempo de retención, el biodigestor demostró un aumento constante en la producción de metano, alcanzando un pico máximo de 47,478 ppm. Por su parte, el metano representó el 67% de la energía total producida, destacando la viabilidad del proceso. Los valores promedios de los parámetros fisicoquímicos (temperatura 40.6°C, humedad 96.1%, pH 7.01, sólidos totales 15%, sólidos totales volátiles 5.81%, sólidos totales fijos 9.66%) cumplieron con los requisitos para la digestión anaeróbica y la producción de biogás.

La energía total generada por el biogás fue de 1,000.51 kcal/m³, mientras que el metano aportó 670.56 kcal/m³. Esto evidencia que el proceso es capaz de transformar los residuos ganaderos en una fuente de energía sostenible, produciendo aproximadamente 1.53 kcal de energía por kilogramo de estiércol. Estos resultados confirman que la digestión anaeróbica no solo reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también ofrece una alternativa viable para el aprovechamiento energético de los residuos ganaderos, contribuyendo al desarrollo de tecnologías limpias en zonas rurales de Ecuador.

Finalmente, se recomienda la implementación de un monitoreo continuo y automatizado de las variables del biodigestor para mejorar la precisión en la medición y control de parámetros clave, como la temperatura, el pH y la composición del biogás. La integración de sensores y herramientas de modelado predictivo podría optimizar el proceso y facilitar la toma de decisiones en la gestión de biodigestores a diferentes escalas.

Agradecimientos

A la hacienda La Estrella por prestar acceso al sitio para llevar a cabo la fase de campo de esta investigación, así como a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo por el apoyo dado en la fase de laboratorio durante la ejecución de esta investigación.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado por la Universidad Técnica Estatal de Quevedo a través del FOCICYT en su novena convocatoria, perteneciente al proyecto: Sostenibilidad de la gestión ecoeficiente de los residuos sólidos reciclables en la zona norte de la provincia Los Ríos.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún tipo de conflicto de interés que pudiera haber influido en esta investigación.

Como citar este documento

Barragán Monrroy, R. J., Reinoso Triana, M. F., Tay-Hing Cajas, C. C., & Sabando Cedeño, C. M. (2024) Análisis de la biodigestión para la obtención de metano (CH₄) a partir de residuos orgánicos generados en la hacienda la Estrella, Ecuador. *Aqua, Saneamiento & Ambiente*, 19(1), 1-15. <https://doi.org/10.36829/08ASA.v19i1.1690>

Consentimiento informado

No aplica.

Contribuciones de autor

Elaboración y revisión del manuscrito, desarrollo o diseño de metodología, y análisis estadísticos, responsabilidad de liderazgo para la planificación y ejecución de la actividad de investigación: R.J.B.M. Conceptualización, trabajo de campo, trabajo de laboratorio, tabulación, análisis y escritura: M.F.R.T. Interpretación de los resultados de laboratorio, redacción de los resultados con fundamento científico: C.C.T.C.

Encargado de verificar que el artículo cumpla con todas las normas de la revista, encargada de la redacción y revisión del artículo: C.M.S.C.

Declaración de disponibilidad de datos del estudio.

- 1) Imágenes fueron descargadas de <https://dataspace.copernicus.eu/browser/>

Referencias

- Almache, F. (2009). *Estudio de factibilidad para la creación de una ganadería lechera semiestabulada en el cantón Baba* [Tesis de ingeniería, Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/5616/1/Almache%20Cajas%20Fabian.pdf>
- Amat, J. (2016). *Test Kruskal-Wallis*. https://cienciadedatos.net/documentos/20_krusk_al-wallis_test
- Amani, T., Nosrati, M., & Sreekrishnan, T. R. (2011). Anaerobic digestion from the viewpoint of microbiological, chemical, and operational aspects—a review. *Environmental Reviews*, 19(1), 1-19. <https://doi.org/10.1139/A10-011>
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H. & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452-466. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011>
- Casadiego, W. (2005). *Operación y evaluación de un biodigestor modelo chino de flujo continuo (tipo gobar), a escala real utilizando excretas de cerdo + bovino en la "Finca la Providencia" en Tinaquillo Municipio Falcón Estado Cojedes* [Tesis de Ingeniería, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela]. <http://sibucv.ucv.ve/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=10027>
- Durazno, A. (2018). *Valoración de esriércol bovino y porcino en la producción de biogás en un biodigestor de producción por etapas* [Tesis de Ingeniería, Sede Cuenca, Carrera de Ingeniería Ambiental, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15445/1/UPS-CT007585.pdf>
- Gómez, J., Regino, F., & Jaramillo, H. (2021). Desarrollo de un sistema de monitoreo para las variables de temperatura, presión y pH en un biodigestor anaeróbico. *Revista Ingenio*, 19(1), 22-27. <https://doi.org/10.22463/2011642X.3035>
- Gómez, J., & Ramírez, J. (2023). *Evaluación de la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia del estiércol de ganado vacuno en un biodigestor de 2,5 m³*. Repositorio UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/10339>
- Gutierrez, A. (2022). *Energías renovables: energías para un futuro más seguro*. Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/climatechange/raising-ambition/renewable-energy#:~:text=El%20cambio%20a%20fuentes%20de,en%20favor%20de%20la%20salud>
- Hernández, J. (2022). *Estrategias de manejo de residuos orgánicos en instituciones educativas como medida de mitigación al cambio climático: El caso de Unidad Educativa El Playón-Sucumbíos-Ecuador* [Tesis de especialización, Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, FLACSO Ecuador]. <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/bitstream/10469/18501/2/TFLACSO-2022JCHN.pdf>
- Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, K., & Al-Dahhan, M. (2005). Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing,. *Water Research*, 39(15), 3597-3606. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.06.019>
- Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8), 1737-1744. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- Lloja, J. (2018). *Calidad del biogás a partir del efluente de la planta extractora de aceite de palma a nivel piloto en "Industrias Oleaginosas Monte Alegre" S.A. (Indolmasa), distrito de Neshuya, dpto. de Ucayali* [Tesis de Ingeniería, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad Nacional de Ucayali]. <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/3631/000003257T.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Lock, D. (2018). *Potencial energético de los residuos de la cadena de valor del cacao (Theobroma cacao) en la región Madre de Dios* [Tesis de Ingeniería, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/ha>

- ndl.ebscohost.com/ndle/20.500.12996/3660/lock-navarro-david-hosnar.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lucas, A. d., Peso, C. d., Rodríguez, E., & Prieto, P. (2012). *Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad*. Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT. <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>
- Moncayo, G. (2017). *¿Qué es el biogás?* Retrieved 15 de Febrero de 2024, from <https://s51d157330f7b08ca.jimcontent.com/download/version/1505441029/module/14489637722/name/QUE-ES-EL-BIOGAS.pdf>
- Nuhu, S., Gyang, J., & Kwarbak, J. (2021). Production and optimization of biomethane from chicken, food, and sewage wastes: The domestic pilot biodigester performance. *Cleaner Engineering and Technology*, 5(1). <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100298>
- Palau, E., & Carmen, V. (2016). *Digestión anaerobia de residuos de biomasa para la producción de biogás* [Tesis de Ingeniería, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/68331>
- Parra Orobio, B. A., Torres Lozada, P., Marmolejo Rebellón, L. F., Cárdenas Cleves, L. M., Vásquez Franco, C., Torres López, W. A., & Ordóñez Andrade, J. A. (2014). Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de bio-residuos de origen municipal. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2), 553–562. <https://doi.org/10.31910/rudca.v17.n2.2014.421>
- Quechulpa, P., Herrera, R., Guarneros, N., Terron, K., & Itehua, J. (2020). Estudio de la generación de biogás a partir de basura orgánica, usando un biodigestor doméstico. *JEEOS*, 4(1), 43-61. <https://doi.org/10.19136/Jeeos.a4n1.3480>
- Ramírez, V., Cuevas, L., Vargas, A., & Pérez, F. (2017). Generación de Biogás en un Biodigestor Automatizado. *Revista de Energía Química y Física*, 4(12), 8-13. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournal/s/Energia_Quimica_y_Fisica/vol4num12/Revista_de_Energ%C3%ADa_Qu%C3%ADmica_y_F%C3%ADsica_V4_N12_2.pdf
- Reyes, E., & Pérez, E. (2019). Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de las excretas de ganado, caballo, cerdo y gallinaza para la generación de biogás. *Revista Científica de FAREM-Estelí. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*, 31(1) 97-108. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i31.8474>
- Roldán, G., Guerrero, W., Casanova, É., & Salazar, R. (2021). Construcción de un biodigestor para generar energía renovable a partir de desechos orgánicos en el camal de Pacto - Ecuador. *Esferas*, 3(1), 134-153. <https://doi.org/10.18272/esferas.v3i1.2426>
- Salazar, J., & Arias, J. (2016). *Diseño y construcción de un biodigestor para producción de biogás a partir de estiércol vacuno en la finca Isabel de la parroquia Taracoa, provincia de Orellana*. [Tesis de Ingeniería, Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/6175/1/236T0220.pdf>
- Sánchez, Y. (2017). *Evaluación de la viabilidad de la biodigestión como sistema de tratamiento de los residuos de la granja porcina "Galo Porcina" cantón Echeandía, provincia de Bolívar, año 2016*. [Tesis de Ingeniería, Facultad de Ciencias Ambientales]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/1988>
- Soria, R., & Carvajal, P. (2013). Biogás: Una Alternativa para la Expansión de Generación Eléctrica en El Ecuador. *Revista Técnica energía*, 9(1), 38–45 pp. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v9.n1.2013.131>
- Suárez, V., López, I., & Álvarez, M. (2018). Estimación de la producción de biogás a partir de un modelo de simulación de procesos. *Centro Azúcar*, 46(1), 73-85. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v46n1/2223-4861-caz-46-01-73.pdf>
- Tapia, V. (Octubre de 2016). *Instalación y uso de biogás. Manual técnico*. Lima. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TAPIA%202016.%20Manual%20de%20Instalaci%C3%B3n%20y%20Uso%20de%20Biog%C3%A1s.pdf
- Toledo, E., Sánchez, A., & Martínez, M. (2014). *Probabilidad. Distribuciones de probabilidad. Bioestadística amigable*, 65-100.
- Vargas, O., Trujillo, J., & Torres, M. (2019). El compostaje, una alternativa para el

aprovechamiento de residuos orgánicos en las centrales de abastecimiento. *Orinoquia*, 23(2), 123-129.

<https://doi.org/10.22579/20112629.575>

Varnero, M. (2011). *Manual de biogás*. FAO.
<https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

Zelaya, R. (2017). Aprovechamiento y valorización energética de biomasa y biogás. *Palmas* 37(2), 157-162.
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/11931>