Revista RENPYS "Recursos Naturales Producción y Sostenibilidad"
ISSN 2953-6561
https://doi.org/10.61236/renpys.v4i1.1020
Publicación Semestral. Vol. 4, No. 1, enero - junio 2025, Ecuador (p. 31-41). Edición continua

Generación de biogás mediante desechos sólidos de ganado bovino en la estación experimental Tunshi

John Ortega-Castro[1,2], Gerardo Antonio Herrera-Brunett[1], Catherine Frey_E[3]

[1]Universidad Estatal Península de Santa Elena, Instituto de Posgrados, Maestría Gestión Ambiental, Santa Elene, Santa Elena, Ecuador.

[2]Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Carrera de Recursos Naturales Renovables, Riobamba, Chimborazo, Ecuador.

[3]Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Riobamba, Chimborazo, Ecuador

***Dirección para correspondencia:** john.ortegacastro3989@upse.edu.ec

Fecha de Recepción: 13/12/2024 Fecha de Aceptación: 15/01/2025 Fecha de Publicación: 27/01/2025

Resumen

En la Estación Experimental Tunshi (EET – ESPOCH), se encuentra ubicada una planta de ordeño de ganado bovino, los residuos orgánicos del ganado que se acumulan a diario en el establo son desechados mediante el proceso de lavado sin darle ningún uso; el objetivo de la investigación fue aprovechar estos residuos para la producción de biogás buscando establecer un manejo eficiente y de esta manera aportar a la sostenibilidad ambiental; la metodología incluyó: la localización y condiciones climatológicas del área de estudio, recolección y caracterización de los residuos mediante pruebas fisicoquímicas de los residuos (sólidos totales, potencial de hidrógeno, conductividad eléctrica, nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio), el diseño y construcción de un biodigestor; los resultados establecieron que en función de los datos climatológicos, la materia orgánica disponible y la proporción de la mezcla la necesidad de un biodigestor tipo tubular de flujo continuo cuya capacidad sea de 7 m³, obteniéndose a partir de un volumen de 0.1733 m³/día de la mezcla (materia orgánica y agua) la producción de 0.5 m³/día de biogás, valor de biogás ligeramente inferior al teórico calculado debido fundamentalmente a la influencia de bajas temperaturas en la EET-ESPOCH; se recomienda tecnificar el proceso de recolección de residuos, y promover procesos de capacitación a los agricultores para facilitar el empleo de esta tecnología, maximizando su impacto en la economía y mejorar la gestión ambiental de la localidad; este trabajo establece las bases para futuras investigaciones sobre el biogás, su potencial en la generación de energía y su papel en la agricultura sostenible.

Palabras claves: Biogás, gestión ambiental, sostenibilidad, tratamiento de residuos orgánicos

Use of biogas generated by solid waste from cattle at station experimental Tunshi

Abstract

A cattle milking plant is located at the Tunshi Experimental Station (EET – ESPOCH), the organic waste from the cattle that accumulates daily in the barn is discarded through the washing process without giving it any use; The objective of the research was to take advantage of this waste for the production of biogas seeking to establish efficient management and thus contribute to environmental sustainability; The methodology included: the location and climatological conditions of the study area, collection and characterization of the waste through physicochemical tests of the waste (total solids, hydrogen potential, electrical conductivity, nitrogen, phosphorus, potassium, magnesium), the design and construction of a biodigester; The results established that depending on the climatological data, the available organic matter and the proportion of the mixture, the need for a continuous flow tubular biodigester with a capacity of 7 m³, obtaining from a volume of 0.1733 m³/day of the mixture (organic matter and water) the production of 0.5 m³/day of biogas, biogas value slightly lower than the theoretical

IDs Orcid:
John Oswaldo Ortega Castro: http://orcid.org/0000-0001-8197-7371
Gerardo Antonio Herrera-Brunett: https://orcid.org/0000-0001-5948-6998
Catherine Frey_E: http://orcid.org/0000-0002-4434-7394

Artículo científico: Generación de biogás mediante desechos sólidos de ganado bovino en la estación experimental Tunshi.

calculated due mainly to the influence of low temperatures on the TSE-ESPOCH; it is recommended to modernize the waste collection process, and to promote training processes for farmers to facilitate the use of this technology, maximizing its impact on the economy and improving the environmental management of the locality; This work lays the groundwork for future research on biogas, its potential in energy generation and its role in sustainable agriculture.

Keywords: Biogas, environmental management, sustainability, organic waste treatment

1. INTRODUCCIÓN

El exponencial crecimiento demográfico a nivel mundial genera un crecimiento también exponencial de recursos para satisfacer sus demandas, entre estos recursos los energéticos especialmente los fósiles son los que afectan al planeta; como (Nogar et al., 2019) mencionan, el consumo de energía procedente de fuentes fósiles se incrementa y preocupa pues genera cuestiones ambientales (gases de efecto invernadero), sociales (acceso, inclusión) y territoriales (propiedad compartida), y plantea a la generación distribuida (GD) como un modelo que pondera las fuentes alternativas al igual que (Campos-Montiel et al., 2018); por su parte (Ponce, 2016) manifiesta que existen diversas formas de obtener nuevos recursos energéticos entre los que menciona la generación de biogás aprovechando los residuos orgánicos para el uso de familias en sectores rurales, hasta sistemas de gran tamaño para generar electricidad.

A nivel mundial actualmente existe una alta dependencia de productos derivados del ganado bovino lo cual ha originado un crecimiento de este tipo de ganado ocasionando un impacto ambiental en el entorno (Vera et al., 2022), esta situación obliga a la búsqueda de nuevas alternativas en el manejo de los residuos generados, entre las alternativas está el uso de estos residuos como una fuente de energía.

(De Souza et al., 2015) trabajaron en optimizar y escalar un biorreactor mediante herramientas computacionales; estos residuos sólidos pueden ser aprovechados mediante un biodigestor para la generación de biogás como fuente de energía limpia, reemplazando el consumo de leña en las zonas rurales del municipio de Fonseca, Colombia (Ariza et al., 2018).

La necesidad del desarrollo de nuevas formas no contaminantes de generación de energía ha impulsado el avance de nuevas formas de aprovechamiento de los recursos naturales a partir de fuentes no convencionales, entre ellas el biogás según (Barreña & Knoll, 2023), estas tecnologías, además del ahorro económico contribuyen a la mitigación del cambio climático y al cumplimiento del compromiso internacional para alcanzar el Objetivo de Desarrollo Sostenible 7. Energía asequible y no contaminante de la Agenda 2030 de Naciones Unidas (Piekutin et al., 2021); es así, que en su investigación (Ronquillo et al., 2023) indican que la digestión anaerobia (DA) es una forma óptima para el tratamiento y valorización de residuos.

El biogás según (Piekutin et al., 2021) es una fuente viable para abordar el problema de la crisis energética en los países en vías de desarrollo fundamentalmente los que basan su economía e industria en la agricultura y ganadería; en tanto (Merencio & Reyes, 2022) mencionan que las tecnologías anaeróbicas juegan en varias partes del mundo un rol importante en el logro de las metas que caracterizan la sostenibilidad, por ejemplo en Cuba (Montesdeoca-Pichucho et al., 2023) indican que la DA es el proceso de descomposición de MO cuyo producto principal es una mezcla de tipo gaseosa llamada biogás que tiene potencial como combustible; en este contexto (Álvarez et al., 2021) diseñaron una planta de biogás que utiliza cachaza como materia prima para la generación de electricidad, por su parte (Hermida García et al., 2020) evaluaron el impacto de la generación de biogás en el consumo energético de la Granja Porcina Guayos, en el municipio de Cabaiguán Sancti Spíritus, Cuba; mostrando que la producción de biogás es una oportunidad de ahorro energético.

Existen algunas experiencias prácticas en el aprovechamiento del biogás que demuestran su viabilidad, en este sentido (Iocoli & Gómez, 2015) en su investigación optimizaron y escalaron un biorreactor; otra experiencia fue el análisis de la descomposición de desechos alimentarios de cocina (sustrato) por lodos (inóculo) en una planta de tratamiento de aguas residuales (Sánchez-Reyes et al., 2016).

En nuestro país la ganadería es una de las principales fuentes de ingreso en el sector rural con una permanente producción de residuos aprovechables para la obtención de biogás que podría ser utilizado en procesos térmicos y eléctricos; en este sentido, la provincia de Chimborazo se caracteriza por ser ganadera siendo esta actividad una importante fuente de ingreso para sus habitantes (León, 2018), con el empleo de tecnologías como biodigestores tanto caseros como industriales se puede producir biogás que es una alternativa energética que favorece al medio ambiente y de bajo costo para dar solución a varias problemáticas ambientales y sociales (Herrero, 2019). Sin embargo, en Ecuador existen escasos estudios sobre el aprovechamiento de biogás ocasionado un uso aún reducido de biodigestores, un ejemplo según (Pazmiño, 2016) se encuentra en las comunidades de la

parroquia Peñaherrera del cantón Cotacachi, provincia de Imbabura, donde los biodigestores han demostrado mejorar la calidad de vida de los pobladores.

La EET-ESPOCH es un sitio de investigación donde se puede encontrar varios proyectos de formación agrícola, ambiental y ganadera (Vargas, 2021), el cual es adecuado para generar el biogás a partir desechos sólidos de ganado bovino pues actualmente en el sitio se encontró 50 cabezas de ganado lechero de las cuales se obtiene la leche para la planta de ordeño (Carmona et al., 2005); esta investigación sentará las bases para un manejo adecuado de los desechos orgánicos producidos, a partir de los cuales se producirá biogás (Chinchilla et al., 1998).

2. METODOLOGÍA

2.1 Localización y caracterización del área de estudio

Se estableció la ubicación exacta del proyecto mediante coordenadas geográficas, utilizando la herramienta Google Earth Pro para determinar condiciones climáticas específicas como temperatura y precipitaciones. Esto se complementó con registros de la estación meteorológica local en la EET-ESPOCH, ubicada en la parroquia Licto, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo, a una altitud de 2750 msnm (Vargas, 2021). Sus coordenadas son: 1°44'54" S, 78°37'72" O.



Figura 1. Mapa georeferenciado de la planta de ordeño de la ETT-ESPOCH, ubicación en la cual se encuentra el biodigestor.

2.2 Recolección de residuos sólidos

Los residuos sólidos (estiércol) fueron recolectados diariamente de forma manual en el establo de la planta de ordeño donde se cuenta con 30 vacas en producción, el estiércol recolectado se cargó al biodigestor tubular de flujo continuo construido en el sitio; cada carga fue registrada en términos de volumen, y las fechas de carga se sistematizo para un control preciso del proceso como indica la Tabla 2.

2.3 Caracterización de los residuos

Se realizaron los análisis fisicoquímicos correspondientes en laboratorio para establecer las propiedades de los residuos sólidos, los parámetros evaluados incluyeron pH, conductividad eléctrica, contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, y porcentaje de MO (Herrero, 2019); los resultados de los análisis permitieron determinar las condiciones iniciales que posee la materia prima empleada para el proceso de biodigestión (Hou et al., 2020).

2.4 Diseño y construcción del biodigestor

2.4.1 Selección del tipo de biodigestor

En función de la cantidad de residuos disponibles $\left(0.0433\,\frac{m^3}{día}\right)$ y las características climáticas de la EET - ESPOCH (13.6 °C temperatura ambiente, 182.6 °C temperatura dentro del invernadero del biorreactor, 30 días de TRH), se optó por un biodigestor tubular de flujo continuo, adecuado para granjas de pequeña y mediana escala (Herrero, 2019), esta selección

consideró factores como el tiempo de retención hidráulica (TRH), que se calculó aplicando la fórmula de (Zeballos & Chate, 2021) para optimizar la actividad de las bacterias metanogénicas.

2.4.2 Dimensiones del biodigestor

El biodigestor se dimensionó siguiendo una relación entre longitud y diámetro (L/D) de 7.5 (Julón, 2023), ideal para evitar problemas de flujo y asegurar un adecuado tiempo de retención, el cálculo de la capacidad del biodigestor fue realizado en función del número de vacas en producción y del volumen estimado de residuos generados por cada animal (Julón, 2023).

2.4.3 Carga orgánica

Para la carga diaria de residuos, se empleó una proporción de 1:3 (por cada porción de residuo orgánico tres porciones de agua), la mezcla fue adicionada al biodigestor y se calculó la carga orgánica diaria a partir de la masa de residuos recolectados ecuación (2).

2.4.4 Producción de biogás

Se determinó la producción de biogás estimada por cada kilogramo de estiércol de ganado, basándose en la fórmula de (Herrero, 2019), que establece una producción de 35.3 litros de biogás por kilogramo de estiércol, estos valores calculados se compararon con los valores obtenidos mediante mediciones en el flujómetro para evaluar la eficiencia y sostenibilidad del biodigestor en condiciones controladas dentro de un invernadero, lo cual permitió mantener la temperatura óptima para la actividad metanogénica (Ahlberg-Eliasson et al., 2021).

2.4.5 Materiales utilizados

Los materiales para la construcción del biodigestor incluyeron un reactor anaeróbico de polietileno de baja densidad, conectores y aditamentos para el ensamblaje, geotextil para la protección del equipo, y una tina para la recolección de efluentes (Matos et al., 2017).

2.5 Materiales de construcción

El biodigestor de flujo continuo emplea los siguientes materiales:

- Reactor anaeróbico en material de polietileno de baja densidad.
- Conectores para el ensamble del equipo.
- Material protector (geotextil).
- Tina para efluente
- Línea de gas.
- Filtro para reducción de H_2S.
- Válvula de alivio de presión en PVC.
- Trampas de condensado.
- Geotextil protector de tela flexible de fibras sintéticas.
- Invernadero (estructura y plástico industrial).
- Tuberías

2.6 Operación y mantenimiento del Biodigestor

2.6.1 Carga inicial

El proceso de llenado inicial del biodigestor incluye la proporción de agua 3 a 1 con los residuos orgánicos necesarios para iniciar la fermentación según (Freire & Vásquez, 2020), debido a las características del espacio de recolección de los residuos esta carga debió ser manual, lo cual generó dificultades de operación, pérdida de tiempo y baja cantidad de materia a ser utilizada.

2.6.2 Alimentación diaria

La cantidad de residuos orgánicos bovinos añadidos en el biodigestor se establecen en función de la recolección en el establo previo al ordeño según la Tabla 2, esta recolección debido a los factores como tiempo, espacio inadecuado, disponibilidad de mano de obra e incluso disponibilidad de residuos, no pudo ser diaria sino periódica; este se convirtió en uno de los factores para una producción relativamente baja de biogás durante el periodo de muestreo.

2.6.3 Control de parámetros operativos

Durante el proceso de digestión se monitorearon factores críticos como la temperatura interna mediante sensores de temperatura del biodigestor, la presión de biogás fue controlada mediante válvulas, manómetro de baja presión y llevando un registro mediante un flujómetro instalado en la tubería de salida del biodigestor, lo cual permitió un registro eficiente de los parámetros señalados.

2.7 Análisis de datos

En base al diseño y construcción de biodigestor se determinó la capacidad de carga de estiércol, esto permitió la elaboración de tablas y gráficos, para evaluar patrones de producción en relación con los cambios climáticos, el análisis incluyó la correlación entre la cantidad de MO y la producción de biogás, así como la eficiencia de la biodigestión en las condiciones establecidas en la EET-ESPOCH.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Condiciones climáticas

La temperatura media obtenido en los últimos tres años fue de 13.6 °C, evidencia una actividad metabólica significativamente reducida de las bacterias metanogénicas en un biodigestor, esto no permite que se realice una eficaz producción de biogás (Julón,

2023), al limitar la conversión de ácidos grasos volátiles en metano y dióxido de carbono, así como también, la baja temperatura incrementa el tiempo de retención hidráulica (TRH).

Para alcanzar una producción de biogás significativa, se procedió con la ubicación del biodigestor dentro de un invernadero para ayudar a que las bacterias mantengan una actividad moderada, llegando de esta forma a una temperatura promedio dentro del invernadero de 18.6 °C de acuerdo con los datos recolectados mediante un sensor de temperatura colocado en el interior del biodigestor.

Tabla 1. Registro de la temperatura de la Estación Experimental Tunshi (°C).

Temperatura °C	2021			2022			2023		
	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio	Máxima	Mínima	Promedio
Enero	19.4	8.0	13.7	19.2	7.8	13.5	18.7	7.3	13.0
Febrero	19.8	8.5	14.2	19.2	8.1	13.7	19.2	8.1	13.7
Marzo	18.1	8.6	13.4	18.0	8.7	13.4	17.8	8.5	13.2
Abril	19.1	8.0	13.6	19.3	8.0	13.7	19.1	7.8	13.5
Mayo	19.5	8.3	13.9	19.2	8.1	13.7	20.2	9.1	14.7
Junio	18.6	7.5	13.1	18.0	7.0	12.5	19.2	8.2	13.7
Julio	18.8	7.6	13.2	18.5	7.4	13.0	19.6	8.5	14.1
Agosto	19.0	7.3	13.2	18.4	7.0	12.7	19.9	8.5	14.2
Septiembre	19.0	7.1	13.1	18.8	7.2	13.0	19.7	8.1	13.9
Octubre	19.6	8.3	14.0	19.2	7.9	13.6	20.1	8.8	14.5
Noviembre	20.4	7.5	14.0	19.8	7.1	13.5	20.9	8.2	14.6
Diciembre	20.6	8.1	14.4	19.5	7.0	13.3	20.8	8.3	14.6
Promedio			13.6			13.3			13.9

La temperatura media de los últimos tres años se determinó de la siguiente manera:

$$\bar{T} = \frac{\bar{T}_{2021}+\bar{T}_{2022}+\bar{T}_{2023}}{3} \qquad (1)$$

3.2 Tiempo de retención hidráulica (TRH)

Tomando en cuenta que la temperatura promedio dentro del invernadero donde se encuentra el biorreactor es 18.6 °C y en función de la Tabla 2 se ha podido establecer como TRH 30 días, este dato coincide con la ecuación planteada por (Zeballos & Chate, 2021):

donde:

$$THR = -44.70 * Ln(\bar{T}) + 160.394 \qquad (2)$$

$\overline{T}$ = Temperatura promedio (°C)

3.3 Características del ganado

La planta de ordeño actualmente cuenta con 65 cabezas ganado bovino lechero de raza Holstein las cuales según (Barragán-Escandón et al., 2020) al ser una raza lechera es adecuada por su producción entre 50 y 60 kg de estiércol fresco diario, estos bovinos son alimentadas mediante forraje de corte y suplementos concentrados (Freire & Vásquez, 2020).

Tabla 2. Tiempo de retención hidráulica (TRH).

Temperatura (°C)	Tiempo de retención hidráulica (TRH) recomendado (días)	Observaciones
5 – 10	90 - 120	Digestión muy lenta; producción de biogás mínima
10 – 15	60 - 90	Baja actividad bacteriana; baja eficiencia
15 – 20	40 - 60	Digestión lenta; aumenta la actividad bacteriana
20 – 25	30 - 40	Actividad bacteriana moderada; mayor estabilidad
25 – 30	20 - 30	Actividad mesofílica adecuada para una buena producción de biogás
30 – 35	15 - 20	Rango óptimo mesofílico; alta eficiencia de biogás
35 – 40	10 - 15	Alta producción en condiciones mesofílicas óptimas
50 – 60	5 - 10	Rango termofílico; máxima producción, pero mayor demanda de control térmico

Nota. Tomado de Herrero (2019)

Actualmente 30 vacas están en producción de leche y son las que pasan al establo previo al ordeño, debido a las características de este sitio es necesario un proceso de recolección manual de los residuos orgánicos mediante una pala y balde.

3.4 Recolección de residuos sólidos

La MO se obtuvo de forma periódica del establo y fue cargada manualmente en el biodigestor con una mezcla 1:3 de agua (Herrero, 2019), como se indica en la tabla 3.

Tabla 3. Cargas del biodigestor.

Fecha	Volumen cargas orgánicas de estiércol en (m^3)	Volumen agua en (m^3)
22/5/2024	0.09964	0.29892
23/5/2024	0.09964	0.29892
27/5/2024	0.09964	0.29892
28/5/2024	0.04982	0.14946
3/6/2024	0.09964	0.29892
4/6/2024	0.09964	0.29892
5/6/2024	0.04982	0.14946
6/6/2024	0.09964	0.29892
10/6/2024	0.09964	0.29892
11/6/2024	0.19928	0.59785
12/6/2024	0.04982	0.14946
13/6/2024	0.14946	0.44839
17/6/2024	0.04982	0.14946
18/6/2024	0.04982	0.14946
20/6/2024	0.04982	0.14946
24/6/2024	0.04982	0.14946
26/6/2024	0.04982	0.14946
2/7/2024	0.37366	1.12098
Total	181848	5.45545

El seguimiento del proceso de carga del biodigestor fue registrado durante 42 días, por lo cual la carga promedio diaria se estableció de la siguiente manera:

$$CO = \frac{Total\ carga\ orgánica\ (m^3)}{periodo\ de\ carga(días)} \quad (3)$$

$$C_A = \frac{Total\ carga\ de\ agua\ (m^3)}{periodo\ de\ carga(días)} \quad (4)$$

donde:

CO: carga orgánica diaria $\left(\frac{m^3}{día}\right)$.

C_A: carga de agua diaria $\left(\frac{m^3}{día}\right)$.

La carga orgánica diaria y la carga diaria de agua obtenidas durante el período de tiempo del estudio fue de 0.0433 y 0.13 $\left(\frac{m^3}{día}\right)$, respectivamente estos valores coinciden con los reportados por Bavera & Peñafort (2006).

Este proceso manual de carga de la MO para el biodigestor no es adecuado pues gran cantidad de residuos no son aprovechados al permanecer en el establo debido a la dificultad de su recolección, como lo establece Julón (2023) en su trabajo al proponer un proceso semi automatizado para su recolección.

3.5 Caracterización de residuos

Se realizaron análisis de laboratorio para determinar el contenido de MO, sólidos totales, potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (CE), Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Magnesio (Mg), para la biodigestión.

Tabla 4. Análisis fisicoquímico estiércol bovino.

Parámetros	Resultados	Unidades	Técnica analítica
pH	8.28		Potenciométrico
CE	3.84	ms/cm	Potenciométrico
N	1.36	%	Kjeldahl
P	1.01	%	Colorimétrico
K	0.32	%	A. Atómica
Mg	0.97	%	A. Atómica
MO	65	%	Gravimétrico

El pH de la MO de acuerdo a los resultados de laboratorio es 8.28, situándose dentro del rango óptimo para la DA favoreciendo la actividad de las bacterias metanogénicas que son responsables de la generación de biogás (Carotenuto et al., 2019); la conductividad eléctrica del estiércol es 3.84 ms/cm, lo cual establece una buena concentración de sales minerales lo cual es positivo para el proceso, pues las sales minerales son importantes en el desarrollo y activación de las bacterias metanogénicas (Yang et al., 2021).

La presencia del nitrógeno en la MO está en el orden de 1.36%, valor positivo para la generación de biogás debido a ser un nutriente esencial para el desarrollo de bacterias metanogénicas, garantizando un proceso de digestión eficiente (Yang et al., 2021); la presencia de fósforo (P) se establece en 1.02%, que es un valor alto; por otra parte se establece una presencia de potasio (K) en 0.32% rango adecuado favoreciendo la actividad de bacterias metanogénicas (Hou et al., 2019); se tiene una presencia de magnesio (Mg) de 0.97% rango adecuado (Žalys et al., 2023); el contenido de MO es de 65% un valor muy alto siendo el principal sustrato que las bacterias metanogénicas utilizan para producir biogás (Mukawa et al., 2022).

3.6 Selección del tipo de biodigestor

Basado en la cantidad de MO y las condiciones climáticas, se opta por un biodigestor tubular, pues este permite una operación adecuada para pequeñas y medianas granjas (Ahlberg-Eliasson et al., 2021).

3.7 Carga orgánica diaria del biodigestor

Según (Herrero, 2019), la mezcla recomendada para la MO de origen bovino con agua es de 1:3 (por cada kg de residuos se agrega 3 kg de agua), por lo tanto, el cálculo de la carga diaria del biodigestor viene dada por la fórmula (5):

$$COD_B = C_A + CO \qquad (5)$$

donde:
COD_B: Carga diaria del biodigestor (m^3)
C_A: Cantidad de agua diaria para la mezcla (m^3)
CO: Carga orgánica diaria (m^3)

En el presente estudio, la carga diaria del biodigestor recomendada fue de 0.1733 $\frac{m^3}{día}$, garantizando de esta forma una adecuada actividad metabólica dentro del biorreactor. Este procedimiento para el cálculo de la carga diaria del biodigestor coincide por el planteado por (Aguilar et al., 2017) pues permite un mejor aprovechamiento de los residuos y una generación de biogás eficiente.

3.8 Producción calculada de biogás

De acuerdo con (Herrero, 2019) cada kg de residuos orgánicos de ganado bovino produce entre (0.02 a 0.03) $\frac{m^3}{kg}$ de biogás, por lo tanto, para el cálculo se utiliza la fórmula (6):

$$V_{BC} = M_{CO}\ x\ P_B \qquad (6)$$

donde:
V_{BC}: Volumen biogás crudo $\left(\frac{m^3}{día}\right)$
M_{CO}: Masa del residuo orgánico de los bovinos $\left(\frac{kg}{día}\right)$
P_B: Producción biogás bovino $\left(\frac{m^3}{kg}\right)$

Según (Julón, 2023), la densidad del residuo orgánico bovino fresco tiene una densidad aproximada de 850 Kg/m^3 por lo cual la masa del residuo orgánico de los bovinos es:

$$M_{CO} = CO\ x\ \rho_{CO} \qquad (7)$$

Este volumen de biogás crudo calculado 0.736 $\frac{m^3}{día}$, es ligeramente superior al volumen generado el cual fue registrado diariamente por medio de un flujómetro como se indica en la Tabla 8; valor superior al mostrado por (Baculima & Rocano, 2015) cuya investigación establece que con una alimentación diaria al biodigestor de 13 kg día (estiércol de cerdo más agua) producían 0.0283 m^3 día de biogás; y suprior también presentado por (Almanza, 2011) de 0.53 m^3 día; lo cual demuestra una producción eficiente de biogás.

3.9 Volumen del biodigestor

Al tratarse de un biodigestor tubular de flujo continuo su volumen total se establece por la suma del volumen del líquido (mezcla de residuos orgánicos + agua) con el volumen del biogás de acuerdo con las fórmulas (8) y para el volumen total se tomó en cuenta la sumatoria del volumen del líquido con respecto al volumen de biogás crudo en m^3:

$$V_L = TRH\ x\ COD_B \qquad (8)$$

donde:
COD_B: Carga diaria del biodigestor $\left(\frac{m^3}{día}\right)$.
TRH: Tiempo de retención hidráulica (días).

Los resultados obtenidos en este estudio tanto para el volumen líquido en m^3 fueron de 5.2, y 7 respectivamente, para el volumen total.

3.10 Dimensiones biorreactor

Para el cálculo del radio del biodigestor se utiliza la ecuación (9) (Herrero, 2019):

$$r = \frac{L_c}{2\,\pi} \qquad (9)$$

donde:
L_c: Longitud de la circunferencia (m).
r: Radio de la circunferencia (m).

Se consideró un ancho de material (L_c) de 4 m, valor considerado como comercial estándar, para el radio inicial. Partiendo de un volumen calculado de biodigestor de 7 m^3 y un radio de 0.6 m, se obtuvo una longitud que cumple con los criterios de diseño óptimo para biodigestores tubulares (Julón, 2023), donde la relación longitud/ diámetro ($\frac{L}{D} = 5\ a\ 10$) (Herrero, 2019). Dado que el resultado se ajusta a este rango, el diseño se considera adecuado.

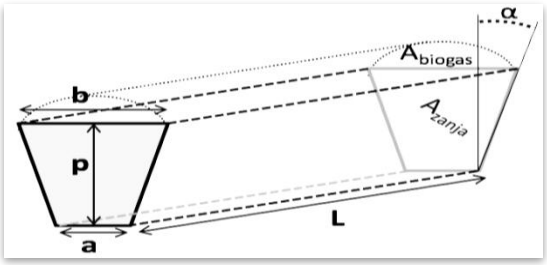


Figura 3. Parámetros de la zanja.

Tabla 5. Parámetros para diseño de zanja.

Ángulo α (°)	a (m)	b (m)	p (m)	Área de la zanja (m²)
0.0	1.49*r	1.49*r	1.57*r	2.34*r²
0.0	1.41*r	1.41*r	1.57*r	2.22*r²
0.0	1.34*r	1.34*r	1.57*r	2.10*r²
7.5	1.23*r	1.63*r	1.54*r	2.20*r²
15.0	1.02*r	1.82*r	1.49*r	2.12*r²
30.0	0.72*r	2.26*r	1.33*r	1.98*r²
45.0	0.43*r	2.57*r	1.07*r	1.61*r²

Nota. tomado de Herrero (2019).

Tabla 6. Ángulo de inclinación de talud de zanja.

Ángulo α (°)	Tipo de Suelo
0 a 7.5	Pedregosos
7.5 a 15	Humíferos (tierra negra de cultivos)
15 a 30	Arcillosos
30 a 45	Sueltos y arenosos

Nota. tomado de Herrero (2019)

A partir de la tabla se estableció el ángulo α de 0° que es adecuado para el suelo de tipo pedregoso de la EET-ESPOCH. La Tabla 7 establece el dimensionamiento de la zanja para el biorreactor tubular de flujo continuo.

Tabla 7. Dimensionamiento de la zanja.

Ángulo α (°)	0°
r (m)	0.6
a (m)	0.894
b (m)	0.894
p (m)	0.942
Área de la zanja (m²)	0.8424
L(m)	6.19
D=2r (m)	1.2
L/D	5.16

Las dimensiones del biodigestor, biorreactor y la zanja resultan la adecuadas para el espacio físico elegido que se encuentra cerca del establo, lo cual facilita la carga manual de la materia orgánica.

3.11 Medición de producción de biogás

Se registra la producción diaria de biogás en volumen mediante un flujómetro instalado en el biodigestor como indica la siguiente tabla 8.

Se presenta el registro de producción del biogás durante el periodo de un mes. Para tener un registro preciso del biogás generado el uso de un flujómetro es indispensable, lo cual permite un control del volumen dentro del biorreactor y así evitar posibles accidentes.

Tabla 8. Producción de biogás.

Día	Lecturas (m^3)	Producción (m^3)
1	0.13	0.13
2	0.14	0.01
3	0.18	0.04
4	0.50	0.33
5	1.01	0.50
6	1.51	0.50
7	1.99	0.48
8	2.61	0.63
9	3.11	0.50
10	3.60	0.49
11	4.01	0.41
12	4.55	0.54
13	5.01	0.46
14	5.65	0.64
15	6.01	0.36
16	6.51	0.50
17	7.01	0.50
18	7.43	0.42
19	8.00	0.58
20	8.51	0.50
21	9.01	0.50
22	10.38	1.37
23	10.81	0.42
24	11.13	0.32
25	11.62	0.49
26	12.10	0.48
27	12.69	0.59
28	13.05	0.36
29	13.60	0.55
30	14.00	0.40
Promedio		0.47

3.12 Eficiencia de producción de biogás

La bibliografía nos indica que la producción de biogás es de aproximada entre $(0.02 \text{ a } 0.03)\frac{m^3}{kg}$ (Hou et al., 2020), lo cual implicaría según los cálculos realizados una producción teórica de 0.736 $\frac{m^3}{día}$.

Sin embargo, hay que tomar en cuenta que existen otros parámetros que inciden en la generación de biogás: la cantidad de MO, la temperatura relativamente baja para el proceso, bajo contenido de fibra y nutrientes en la alimentación de los bovinos, falta de agitación que puede generar zonas inactivas dentro el biodigestor (Julón, 2023), factores han incidido en la producción que alcanzó un valor aproximado de 0.5 $\frac{m^3}{día}$ (Tabla 9), valor inferior al estimado teórico; pero similar al valor presentado por (Almanza, 2011).

4. CONCLUSIÓN

La investigación ha comprobado que se puede generar 0.5 $\frac{m^3}{día}$ de biogás a partir de los desechos sólidos de ganado bovino en la EET – ESPOCH, estableciéndose como la principal limitación en la generación de biogás la actual recolección manual de la MO, que al ser más frecuente y sistemática podría aumentar significativamente la cantidad de MO y por tanto, aumentar la producción de biogás, lo que establece la necesidad de optimizar la logística de recolección en futuras investigaciones.

Es necesaria la revisión permanente de los parámetros temperatura, pH y presión del biogás para un adecuado proceso de DA, razón por la que se implementó un sistema de control para ajustar las condiciones de operación del biodigestor, maximizando la actividad de las bacterias metanogénicas, y aumentando la producción de biogás al estabilizar el proceso en el reactor, para de esta manera disminuir posibles fallos operativos.; los resultados de los análisis fisicoquímicos de la MO muestran que la materia prima que ingresa en el biodigestor es adecuada, se ha analizado el pH, conductividad eléctrica, y contenido de nutrientes (nitrógeno 1.36%, fósforo 1.02%, potasio 0.32% y magnesio 0.97%); estos datos son necesarios para establecer la capacidad de generación de biogás, propiciando un ambiente adecuado para la fermentación anaeróbica.

La generación de biogás aporta a la sostenibilidad ambiental, pues mediante la generación biogás se está gestionando los residuos orgánicos, convirtiéndolos en una fuente de energía para diversas aplicaciones como calefacción y generación de electricidad, reduciendo la necesidad de combustibles fósiles y aportando a la mitigación del cambio climático.

Al implementar un sistema de biodigestión en la EET-ESPOCH se obtienen beneficios ambientales y se genera un impacto económico positivo debido a que la producción de biogás reduce los costos de energía generando, además, otros subproductos del proceso de digestión que son los fertilizantes orgánicos, los cuales contribuyen a mejorar la calidad de vida de los habitantes, al proporcionar acceso a energía limpia.

En próximas investigaciones se sugiere: optimizar la recolección de residuos orgánicos empleando métodos automatizados para mejorar la eficiencia del proceso mediante la adecuación del espacio donde se mantiene el ganado bovino previo al ordeño y un manejo semiestabulado del ganado, se recomienda investigar la variabilidad climática de la zona y su impacto en la producción de biogás, la integración de tecnologías adicionales como sistemas de monitoreo en tiempo real y mejoras en el diseño del biodigestor.

Como valor adicional se plantea promover la educación y la concienciación sobre el uso de biogás y la gestión de residuos orgánicos en las comunidades rurales, mediante la capacitación de los agricultores y la difusión de información sobre las ventajas del biogás para fomentar su adopción y contribuir a un manejo más sostenible de los recursos naturales.

Agradecimientos. - Los autores desean agradecer a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, Instituto de Posgrados, Maestría Gestión Ambiental, Santa Elene – Ecuador, a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Carrera de Recursos Naturales Renovables, Riobamba, Chimborazo, Ecuador, por brindar las facilidades para el desarrollo de la presente investigación.

Contribución de los autores. - Todos los autores contribuyeron a la concepción y diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación de datos y el análisis fueron realizados por John Ortega Castro, Gerardo Antonio Herrera Brunett y Catherine Frey. El primer borrador del manuscrito fue escrito por John Ortega Castro, y todos los autores comentaron las versiones posteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

Financiación. - No se recibieron fondos, ayudas económicas u otro tipo de apoyo.

Conflicto de intereses. - Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

5. REFERENCIAS

Aguilar, M. C., Wang, Y. D., Roskilly, T., Pathare, P. B., & Lamidi, R. O. (2017). Biogas from anaerobic co-digestion of food waste and primary sludge for cogeneration of power and heat. *Energy Procedia*, *142*, 70–76. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.12.012

Ahlberg-Eliasson, K., Westerholm, M., Isaksson, S., & Schnürer, A. (2021). Anaerobic Digestion of Animal Manure and Influence of Organic Loading Rate and Temperature on Process Performance, Microbiology, and Methane Emission From Digestates. *Frontiers in Energy Research*, *9*. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.740314

Almanza, F. (2011). *Construcción y evaluación de un biodigestor modelo chino mejorado para zonas andinas*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco] Repositorio Institucional - UNSAAC. http://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/826

Álvarez, Y. C., Yanes, J. P. M., Borges, R. J., & Vidal, C. D. P. (2021). Propuesta de diseño De un biodigestor industrial de cachaza para la generación de energía eléctrica. *Universidad y Sociedad*, *13*(5), 74–80. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202021000500074

Baculima, M., & Rocano, G. (2015). *Estudio para la determinación de la producción de energía eléctrica a partir del aprovechamiento del biogás de una granja porcina ubicada en la ciudad de Azogues* [Tesis de Grado, Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana] Repositorio Institucional - UPS-C. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7907

Barragán-Escandón, A., Ruiz, J. M. O., Tigre, J. D. C., & Zalamea-León, E. F. (2020). Assessment of Power Generation Using Biogas from Landfills in an Equatorial Tropical Context. *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 2669*, *12*(7), 2669. https://doi.org/10.3390/SU12072669

Barreña, M., & Knoll, P. (2023). Transforming Agricultural Waste in Energy: Argentina's Current Condition and Potential | Transformación de desechos agrícolas en energía: estado actual y potencial de Argentina*. *Revista Iberoamericana de Viticultura Agroindustria y Ruralidad*, *10*(30), 160–190. https://doi.org/10.35588/rivar.v10i30.5596

Bavera, G., & Peñafort, C. (2006). Lectura De La Bosta Del Bovino Y Su Relación Con La Alimentación. *Fav Unrc*, *1*, 2–8. https://share.google/7ISDdlRJJBERVpkBk

Carmona, J., Bolívar, D., & Giraldo, L. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, *18*(1), 49–63. https://doi.org/https://doi.org/10.17533/udea.rccp.323994

Carotenuto, C., Guarino, G., D'amelia, L. I., Morrone, B., & Minale, M. (2019). *Waste Management The peculiar role of C/N and initial pH in anaerobic digestion of lactating and non-lactating water buffalo manure*. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19307494

Chinchilla, M., Chi, O., & Carrillo, W. (1998). *Producción semi-intensiva de cerdos y uso de desechos para generar energía* (MAG). https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/11532/BVE20088171e.pdf?form=MG0AV3

Freire, J., & Vásquez, C. (2020). *Evaluación de la producción y calidad de leche en bovinos alimentados con diferentes tipos de forrajes en la Estación Experimental Tunshi* [Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional–ESPOCH. http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/7755/1/17T1493.pdf

Herrero, J. (2019). *Biodigestores Familiares: Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores.* Redbiolac. https://www.guiagronicaragua.com/wp-content/uploads/2020/02/Manual-de-Dise%C3%B1o-e-Instalaci%C3%B3n-de-Biodigestores-Latinoamericanos-26sep-color_compressed.pdf

Hou, H., Li, Z., Liu, B., Liang, S., Xiao, K., Zhu, Q., Hu, S., Yang, J., & Hu, J. (2020). Biogas and phosphorus recovery from waste activated sludge with protocatechuic acid enhanced Fenton pretreatment, anaerobic digestion and microbial electrolysis cell. *Science of The Total Environment*, *7*, 135–274. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135274

Iocoli, G. A., & Gómez, M. A. (2015). Utilización De Digerido Anaeróbico De Purín De Cerdo: Actividad Biológica Del Suelo Y Desarrollo Vegetal. *Ciencia Del Suelo*, *33*(1), 1–9. https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/117423

Julón, A. (2023). *Diseño de un sistema de producción de biogás utilizando bosta de cerdos y ganado vacuno para generar energía eléctrica en la granja Santa Cruz, Pomalca - Chiclayo* [Tesis de Grado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo] Repositorio Institucional - UNPRG. https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/12102

León, E. (2018). *Evaluación de la eficacia de bioles en un cultivo de hortalizas* [Tesis de Grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional - UPS-C. https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15178/1/UPS-CT007495.pdf

Matos, C. F., Paes, J. L., Pinheiro, É. F. M., & De Campos, D. V. B. (2017). Biogas production from dairy cattle manure, under organic and conventional production systems. *Engenharia*

Agricola, *37*(6), 1081–1090. https://doi.org/10.1590/1809-4430-ENG.AGRIC.V37N6P1081-1090/2017

Merencio, D. O., & Reyes, I. P. (2022). Biogas and sustainability in Cuba. *Universidad y Sociedad*, *14*(2), 597–609. https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2742

Montesdeoca-Pichucho, N. B., Garibaldi-Alcívar, K., Baquerizo-Crespo, R. J., Gómez-Salcedo, Y., Pérez-Ones, O., & Pereda-Reyes, I. (2023). Synergistic and antagonistic effects in anaerobic co-digestion. Analysis of the methane yield kinetics. *Revista Facultad de Ingenieria*, *107*, 80–87. https://doi.org/10.17533/udea.redin.20220473

Mukawa, J., Pająk, T., Rzepecki, T., & Banaś, M. (2022). Energy Potential of Biogas from Sewage Sludge after Thermal Hydrolysis and Digestion. *Energies*, *15*(14). https://doi.org/10.3390/en15145255

Pazmiño, K. (2016). *Biodigestores una solución energética para la población rural. Uso del biogás en un caso de estudio.* [Tesis de Maestría, ANDES]. Repositorio Digital FLACSO. https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/9651

Piekutin, J., Puchlik, M., Haczykowski, M., & Dyczewska, K. (2021). The efficiency of the biogas plant operation depending on the substrate used. *Energies*, *14*(11). https://doi.org/10.3390/en14113157

Ronquillo, S., Villa, G., Vera, G., & Martínez, V. (2023). Application of systems based on modeling of anaerobic processes using municipal waste for biogas production. *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao*, *2023*(E64), 148–163. https://share.google/47J4hwNPK6wvwSzdG

Sánchez-Reyes, C., Patiño-Iglesias, M. E., Alcántara-Flores, J. L., Reyes-Ortega, Y., Pérez-Cruz, M. A., & Ortíz-Muñoz, E. (2016). Determination of biochemical methane potential (BMP) of fruits and vegetables wastes at home. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, *32*(2), 191–198. https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.05

Vargas, R. (2021). *Aprovechamiento residuos para fertilizantes en la Estación Experimental Tunshi.* [Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional – ESPOCH. http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/19624

Yang, S., Chen, Z., & Wen, Q. (2021). Impacts of biochar on anaerobic digestion of swine manure: Methanogenesis and antibiotic resistance genes dissemination, *Bioresource Technology*, *324*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124679

Žalys, B., Venslauskas, K., Navickas, K., Buivydas, E., & Rubežius, M. (2023). The Influence of CO2 Injection into Manure as a Pretreatment Method for Increased Biogas Production. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(4). https://doi.org/10.3390/su15043670

Zeballos, W., & Chate, W. (2021). *Diseño de una planta de producción de biogás para el consumo de energía térmica de la empresa Centro Industrial Y Comercial Porcino SAC DE HUARAL*. [Tesis de Grado, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio Institucional. https://hdl.handle.net/20.500.12952/6411