



scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.2

ABRIL - JUNIO
2025

Artículo Científico

282 - 292



ARTÍCULO
Científico

Construcción y Diseño de un Biodigestor Tubular para el Aprovechamiento Energético a Partir de Residuos Orgánicos Aprovechables

Design and Construction of a Tubular Biodigester for Energy Recovery from Recoverable Organic Waste

Midwar Joel Nina Paniagua (Autor Corresponsal)

mjninap@unjbg.edu.pe

ORCID: 0009-0005-2364-5842

Universidad Jorge Basadre Grohmann National, Tacna, Perú

Aceptación: 7 de mayo de 2025

Publicación: 30 de junio de 2025

Resumen

La gestión de los residuos orgánicos es un desafío creciente en diversos países, especialmente en regiones donde la acumulación inadecuada genera impactos ambientales y sociales negativos. El objetivo del estudio fue evaluar el diseño de un biodigestor tubular tipo bolsa; los objetivos específicos fueron adecuar el entorno del biodigestor como un espacio educativo destinado a la enseñanza de energías alternativas basadas en el aprovechamiento de residuos orgánicos; estimar la producción de biomasa y biogás generada durante el proceso de digestión anaeróbica; e identificar los factores que inciden en la eficiencia del sistema, como la composición de los residuos, temperatura, tiempo de retención y carga orgánica. El enfoque fue de tipo cuantitativo con diseño cuasiexperimental en 3 fases definidas: exploración del problema, diseño del sistema, implementación, recolección de datos y análisis; el tipo de estudio aplicado fue descriptivo-explicativo. Se realizó una prueba diagnóstica a 3 familias locales para evaluar la factibilidad de un prototipo de biodigestor tubular, el cual tuvo una eficiencia favorable con un 70.6 % de conversión de residuos de biogás y valores adecuados de metano de entre 60-65 % y condiciones operativas en rangos óptimos (C/N, temperatura, pH), lo cual garantiza un funcionamiento estable del sistema.

Palabras clave: Biodigestor Tubular; Biogás; Biofertilizante; Energía; Residuos Orgánicos

Abstract

The management of organic waste constitutes a growing challenge in numerous countries, particularly in regions where inadequate accumulation generates adverse environmental and social impacts. The objective of this study was to evaluate the design of a tubular bag-type biodigester. The specific objectives were: (1) to adapt the biodigester setting into an educational space dedicated to teaching alternative energy technologies based on organic waste valorization; (2) to estimate the production of biomass and biogas generated during the anaerobic digestion process; and (3) to identify factors influencing system efficiency, such as waste composition, temperature, retention time, and organic loading rate. A quantitative approach employing a quasi-experimental design was adopted, structured into three defined phases: problem exploration, system design, implementation, data collection, and analysis. The applied study type was descriptive-explanatory. A diagnostic test was conducted with three local families to assess the feasibility of a tubular biodigester prototype. This prototype demonstrated favorable efficiency, achieving a 70.6% conversion of waste to biogas. It also yielded adequate methane values ranging between 60% and 65%, with operational conditions (C/N ratio, temperature, pH) maintained within optimal ranges. These results guarantee stable system operation.

Keywords: Tubular Biodigester; Biogas; Biofertilizer; Energy; Organic Waste

Construcción y Diseño de un Biodigestor Tubular para el Aprovechamiento Energético a Partir de Residuos Orgánicos Aprovechables

Midwar Joel Nina Paniagua

ORCID: 0009-0005-2364-5842

<https://revista.scienceevolution.com>





Introducción

La gestión adecuada de los residuos orgánicos representa un desafío creciente a nivel global, especialmente en regiones donde la acumulación inadecuada de estos desechos genera impactos ambientales y sociales negativos ([Hajam et al., 2023](#)).

La [Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación \(FAO, 2023\)](#) estima que más del 13 % de la producción mundial de alimentos se pierde durante las etapas de producción y de venta al por mayor de la cadena de suministro. Además, los datos mundiales apuntan que, en las etapas de la venta al por menor, los servicios alimentarios y los consumidores, se desperdicia otro 17 %. La calidad de los alimentos también se ve perjudicada a lo largo de toda la cadena de suministro. Además, la pérdida y el desperdicio de alimentos generan entre el 8 y el 10 % de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a escala mundial.

El Decreto Legislativo N° 1278 ([Ministerio del Ambiente del Perú \[MINAM\], 2016](#)) reconoce la valorización, tanto material como energética, como una prioridad frente a la disposición final de los residuos sólidos, tal como lo establece en sus artículos 2 y 37. En este contexto, la biodigestión se configura como una forma de valorización energética, puesto que transforma los residuos orgánicos en biogás, una fuente de energía renovable, y en biofertilizantes, conforme a lo dispuesto en el artículo 48. Además, dicha norma reconoce la generación de energía en base a procesos de biodegradación como una tecnología válida para la valorización energética, lo que respalda legalmente el uso de biodigestores como solución sostenible para el manejo de residuos orgánicos.

En Perú, el aumento constante de residuos orgánicos sin un manejo eficiente ha provocado la emisión de GEI y la contaminación de recursos naturales, lo cual demanda de soluciones tecnológicas actualizadas y sostenibles para su tratamiento ([Luna et al., 2023](#)).

Según el [MINAM \(2023\)](#), los residuos sólidos orgánicos representan el 57.2 % de los residuos municipales generados a nivel nacional (equivalente a 4,833,162.6 toneladas/año), siendo Lima la región que contribuye con el 44 % del total nacional. No obstante, solo el 1.8 % de estos residuos aprovechables son valorizados (69,754.55 toneladas/año en 2022), mientras que el 36.5 % recibe disposición final inadecuada. Este contraste evidencia un potencial desaprovechado, dado que los residuos orgánicos, que superan el 50 % del total, podrían convertirse en insumos energéticos o materiales mediante técnicas como compostaje o biogás. También enfatiza que la implementación del Programa RECICLA y la responsabilidad municipal en la recolección selectiva son clave para revertir esta situación y reducir impactos ambientales, como la emisión de gases de efecto invernadero.

De igual manera, el [MINAM \(2024\)](#), en su ranking del 2018 al 2022, señaló que la región Huánuco ocupó el primer lugar en acciones que aportan a la mejora del cambio climático.

En este marco, el biodigestor tubular es un sistema de digestión anaeróbica que permite la conversión de materia orgánica en biogás y biofertilizantes, contribuyendo a la mitigación de la contaminación y al aprovechamiento energético ([Pino Panchi et al., 2025](#)). Así, estudios recientes han demostrado que estos sistemas son económicos, fáciles de instalar y adaptables a diferentes condiciones, siendo especialmente útiles en zonas rurales y periurbanas donde la gestión de residuos es limitada ([Iáuregui Morales et al., 2025](#)).

Además, según la [Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura \(FAO, 2022\)](#), el uso de biodigestores representa una estrategia eficaz para mitigar el impacto ambiental de los residuos orgánicos. Su implementación reduce significativamente las emisiones de GEI, como el metano (CH₄), que es hasta 25 veces más potente que el dióxido de carbono (CO₂) en términos de calentamiento global.

Por su parte, el biogás es una mezcla de gases con un elevado contenido de metano, que puede sustituir otros combustibles como el gas propano, la leña y la electricidad. También, el biogás tiene la cualidad de convertirse, mediante procesos químicos, en una fuente de energía para lámparas de camisa de asbesto, motores de combustión, bombas de agua y generadores ([Fundación Aquea, 2021](#)). En este contexto, los biodigestores emergen como una alternativa viable para transformar residuos en energía limpia y biofertilizantes.

Durante los procesos de compostaje y vermicompostaje, uno de los principales desafíos ambientales es la emisión de GEI, como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), producto de la descomposición de materia orgánica. En particular, la liberación de CO₂ se considera un indicador del grado de descomposición de la materia orgánica, estrechamente asociada con una alta actividad microbiana. Sin embargo, las condiciones en las que se desarrolla este proceso influyen



directamente en el tipo y la magnitud de los GEI emitidos. Asimismo, la presencia de zonas anaeróbicas dentro de la pila de compostaje representa una de las fuentes más relevantes de emisiones, particularmente de CH_4 y N_2O . No obstante, estas emisiones pueden reducirse considerablemente mediante una adecuada gestión de la aireación y el control de la temperatura del sistema ([Yasmin et al., 2022](#)).

En este marco, la construcción de un biodigestor tubular para el tratamiento de residuos orgánicos constituye una necesidad urgente y estratégica en el contexto peruano, dadas las múltiples problemáticas asociadas al manejo inadecuado de estos residuos y el impacto ambiental del mal tratamiento de los residuos en botaderos informales (1,585 a nivel nacional), que generan emisiones de metano (CH_4), un gas con un poder contaminante 25 veces superior al del dióxido de carbono (CO_2), además de propiciar condiciones insalubres al atraer vectores de enfermedades que comprometen la salud pública. A ello se suma un vacío tecnológico en materia de valorización energética, dado que el marco normativo vigente, específicamente el Decreto Legislativo N.º 1278, privilegia el compostaje (fermentación aeróbica), pero omite la digestión anaeróbica, pese a que esta última se alinea con los principios de la economía circular y las "7R", entre las que se incluyen recuperar, reciclar y reutilizar. Finalmente, se subraya la oportunidad socioeconómica que representa el biodigestor tubular, al permitir la generación de energía renovable (biogás) y biofertilizantes (biol), reduciendo costos en comunidades vulnerables e integrando a recicladores informales en cadenas de valor formalizadas. En este sentido, la valorización de residuos debe orientarse a armonizar el consumo de recursos naturales con la disminución de la pérdida ecológica, en consonancia con un enfoque de sostenibilidad integral ([Chacaltana Lara, 2023](#)).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo general evaluar el diseño de un biodigestor tubular tipo bolsa, mientras los objetivos específicos fueron adecuar el entorno del biodigestor como un espacio educativo destinado a la enseñanza de energías alternativas basadas en el aprovechamiento de residuos orgánicos; estimar la producción de biomasa y biogás generada durante el proceso de digestión anaeróbica; e identificar los factores que inciden en la eficiencia del sistema, tales como la composición de los residuos, temperatura, tiempo de retención y carga orgánica.

Método

Enfoque Metodológico

El presente trabajo adopta un enfoque cuantitativo, dado que se centra en la medición y análisis numérico de variables relacionadas con la eficiencia del biodigestor, la producción de biogás y las condiciones operativas (temperatura, pH, proporción C/N, entre otras); además, valida de manera empírica la viabilidad técnica del diseño y construcción del biodigestor tubular, evaluando su rendimiento mediante datos medibles.

Diseño de Estudio

El diseño adoptado es de tipo cuasiexperimental aplicado con validación técnica en un entorno real (chacra, una pequeña unidad agrícola rural), sin grupo de control. El diseño permite observar los efectos de una intervención tecnológica (construcción del biodigestor) en un contexto controlado parcialmente, mediante fases definidas: exploración del problema, diseño del sistema, implementación, recolección de datos y análisis. Esta estructura permite evaluar funcionalmente el dispositivo creado.

Tipo de Estudio

El estudio es de tipo descriptivo-explicativo, puesto que detalla las características técnicas y funcionales del biodigestor tubular, así como sus condiciones de operación y resultados de producción de biogás. A su vez, es explicativo, pues busca determinar las causas del rendimiento observado a partir de variables como la composición de los residuos, la temperatura ambiente, el tiempo de retención hidráulica, entre otras.

Población y Muestra

- Población. No se trabajó con una población estadística en sentido clásico, dado que se trata de un estudio tecnológico. Sin embargo, el diseño está orientado a usuarios rurales o periurbanos que generan residuos orgánicos y tienen acceso limitado a energías limpias, como es el caso de las familias en Molles, provincia de Tacna, Perú (zona de intervención).
- Muestra. Se trabajó con un biodigestor prototipo como unidad de análisis, y se realizó una prueba diagnóstica con tres familias locales, que sirvieron como referencia para evaluar el nivel de



conocimiento previo y la factibilidad de aceptación social del biodigestor como tecnología educativa.

Técnicas de Recolección de Datos

Se utilizaron las siguientes técnicas:

- Observación técnica directa. Para documentar la instalación, funcionamiento y posibles incidencias del biodigestor.
- Medición físico-química. Para registrar variables como temperatura, pH y volumen de biogás generado.
- Prueba diagnóstica estructurada. Para evaluar conocimientos previos de los pobladores sobre energías renovables y biodigestores.
- Registro tabulado. Para seguimiento diario del cargue del sistema y del volumen producido.

Instrumentos

- Ficha técnica de recolección de datos operativos del biodigestor (volumen de residuos, volumen de biogás, temperatura, pH).
- Matriz de diagnóstico social (tabla de respuestas) aplicada a las tres familias sobre conocimiento energético.
- Registro fotográfico y visual de funcionamiento (no incluido en el documento, pero implícito en la observación).
- Herramientas físicas de laboratorio básico y campo para la toma de medidas (termómetros, probadores de pH, medidores de volumen).

Análisis de Datos

El análisis se desarrolló a partir de un tratamiento cuantitativo básico y descriptivo, organizando los datos en tablas (cantidad de residuos, volumen de biogás, eficiencia de conversión) y calculando promedios y porcentajes para interpretar el rendimiento del biodigestor. Se identificaron patrones entre las condiciones operativas y la eficiencia energética obtenida. A nivel interpretativo, los resultados fueron contrastados con literatura técnica para validar la pertinencia del diseño implementado.

Presión de Operación del Biodigestor. Para un recipiente cilíndrico de radio interior r y espesor de pared t que contiene un fluido a presión, los esfuerzos normales σ_1 y σ_2 , los cuales se pueden relacionar mediante la ecuación, donde "p" corresponde a la presión manométrica del fluido.

$$\sigma_1 = 2 \cdot \sigma_2 = \frac{p \cdot r}{t}$$

Secciones Transversales de un Biodigestor Tubular para Distintas Formas de la Zanja. El dimensionamiento de la zanja comienza con la determinación del área transversal de la campana de gas, la cual está definida por la longitud de la campana ($L_{\text{campana de gas}}$) y la abertura superior de la zanja (b), considerando que la longitud de la circunferencia del biodigestor se calcula como $C = \pi D$.

La relación entre estos parámetros ($f_{\text{campana gas}} = L_{\text{campana de gas}} / b$) determina el valor del ángulo central, para cualquier longitud de circunferencia C .

Parámetros geométricos de biodigestor tubular y zanja trapezoidal

$$L_{\text{campana gas}} = \pi D \times \frac{\theta^\circ}{360} \wedge D = \frac{b}{\text{sen}(\theta(\text{radianes})/2)} \rightarrow \theta^\circ = \frac{f_{\text{campana gas}} \times 360^\circ}{\pi} \times \text{sen}(\theta(\text{radianes})/2)$$

Resultados

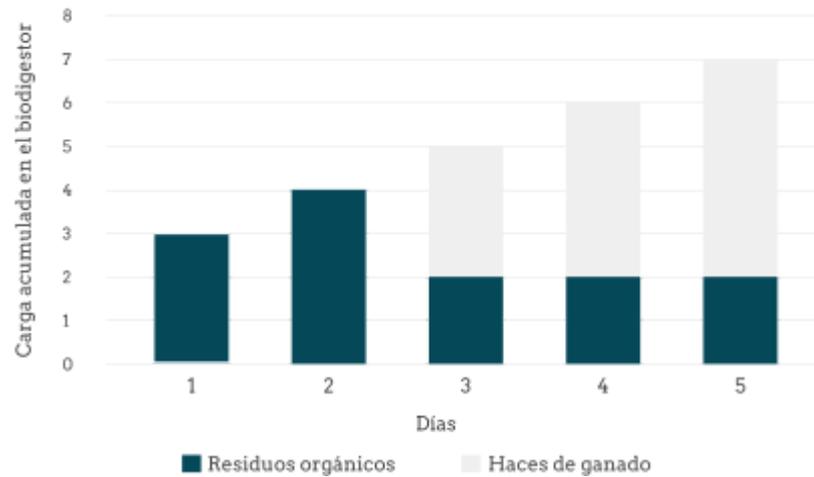
Cargue del Biodigestor

Una vez terminada la fase de construcción, se procedió a cargar el biodigestor con una mezcla de residuos orgánicos y excrementos animales, alcanzando un peso total de 25 kg, con el fin de asegurar el inicio del proceso. Las heces animales aportan una abundante cantidad de microorganismos anaeróbicos esenciales para la descomposición de la materia orgánica, entre ellos, bacterias metanogénicas, las cuales desempeñan un papel clave en la etapa final del proceso, generando metano, el principal componente del biogás.



Gráfico 1

Cargue de Biodigestor durante los 5 Días de Prueba



Las heces de animales se añadieron como inóculo para aportar bacterias metanogénicas y aumentar la materia orgánica, lo que incrementa la carga en el biodigestor y favorece una mayor producción de biogás.

Eficiencia del Biodigestor

La eficiencia del biodigestor se determinó relacionando la cantidad total de residuos orgánicos procesados con el biogás producido, obteniéndose un promedio de 70.6 %, lo que refleja una conversión eficiente de residuos en energía.

Tabla 3

Resultados sobre la Eficiencia del Diseño y Fabricación del Biodigestor Tubular

Prueba	Cantidad total de residuos (Kg)	Producción de Biogás (m3)	Eficiencia de conversión (%)
1	2 kg	0,04 m ³	
2	2 kg	0.04 m ³	
3	2 kg	0.04 m ³	
4	2 kg	0.04 m ³	
5	2 kg	0.04 m ³	
6	2.5 kg	0.05 m ³	
7	2.5 kg	0.05 m ³	
8	4.5 kg	0.09 m ³	
9	4.5 kg	0.09 m ³	
10	5 kg	0.10 m ³	
11	5 kg	0.10 m ³	
12	5.2 kg	0.104 m ³	
13	5.3 kg	0.106 m ³	
14	5.5 kg	0.11 m ³	
15	5.8 kg	0.116 m ³	
Total	55.8 kg	1.116 m ³	70,6 % (promedio)

Durante el periodo de prueba de cinco días, el biodigestor procesó 25 kilogramos de residuos orgánicos diversos, generando un total acumulado de 0.75 m³ de biogás, con un contenido promedio de metano del 65 %. La eficiencia en la conversión de residuos a biogás se calculó comparando la cantidad total de residuos ingresados con los efectivamente transformados, manteniéndose constante en aproximadamente 70.6 %, lo que refleja un rendimiento eficaz en la producción de biogás.



Condiciones Operativas

Se determinaron las condiciones operativas ideales para el biodigestor, resaltando una temperatura constante de 35.6 °C, una relación carbono/nitrógeno adecuada y un tiempo de retención hidráulica óptimo de 25 días, lo que permitió maximizar la producción de biogás y mantener un rendimiento estable del sistema.

Tabla 4
Datos de las Condiciones Operativas Óptimas

Prueba	Temperatura (°C)	Ph
1	30 °C	6.0
2	31 °C	7.0
3	32 °C	6.0
4	31 °C	7.5
5	33 °C	7.0
6	30 °C	7.6
7	32 °C	6.5
8	30 °C	6.0
9	33 °C	7.0
10	32 °C	7.4
11	30 °C	7.5
12	31 °C	6.5
13	33 °C	7.0
14	33 °C	7.2
15	32 °C	7.0
Promedio	31.5 °C	6.88

La temperatura es fundamental en la digestión anaeróbica porque influye en la actividad de los microorganismos que descomponen los residuos; un promedio de 35.6 °C resulta óptimo para favorecer esta actividad y mejorar la producción de biogás. Asimismo, la relación carbono/nitrógeno (C/N) es crucial para mantener un equilibrio nutritivo en los residuos, promoviendo una descomposición eficiente; en este caso, una relación promedio de 25.8:1 indica un balance adecuado para optimizar el proceso de digestión anaeróbica.

Producción Biogás y Prueba de Llama

El biogás está compuesto principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), y, para que produzca una llama positiva, debe contener al menos un 55 % de metano. Durante el periodo de prueba, se registró una producción constante de biogás a partir de la descomposición de residuos orgánicos, con análisis que mostraron un contenido de metano estable entre el 60 % y 65 %, asegurando así su combustibilidad.

Prueba Diagnóstica

La prueba diagnóstica y la evaluación se aplicaron a tres familias de Molles, Tacna, Perú, en una única sesión. Las respuestas recolectadas fueron transcritas con precisión y organizadas en la Tabla 5.



Tabla 5
Matriz de Respuestas

Tipo de prueba	No. de pregunta	Respuestas		
		Persona 1	Persona 2	Persona 3
	¿Qué entiende por energías renovables?	Energías que ayudan al medio ambiente	Energías que no contaminan tanto	Las energías renovables se aprovechan de una fuente inagotable como el sol
	¿Cuáles tipos de energía ha escuchado	Energía Solar e hidroeléctrica	Energía Solar, geotérmica, eólica e hidroeléctrica.	Energía Solar, geotérmica, eólica e hidroeléctrica.
¿Prueba hablar?				
Diagnóstica	¿Sabe que es un biodigestor?	No sé qué es un biodigestor	No	Si. Dispositivo que transforma estiércol en energía.
	¿Sabe que es biomasa?	No	No	No
	¿Considera que es factible obtener energía eléctrica a partir de residuos orgánicos?	Sí, por que las heces no se usan para nada	No	No, sé si se puedan usar para generar energía pero si se puede sería de mucha ayuda

A partir de la prueba diagnóstica, se evidenció un conocimiento limitado por parte de los pobladores respecto a los biodigestores; sin embargo, mostraron disposición para aprender, reconociendo su potencial en la reducción de la contaminación y el aprovechamiento de los residuos orgánicos. Esto permite concluir que el biodigestor puede ser una herramienta didáctica valiosa para fomentar el aprendizaje sobre energías alternativas.

Discusión

Con relación al objetivo general, diseñar y construir un biodigestor tubular para el aprovechamiento energético a partir de residuos orgánicos, a continuación se explican las consideraciones evaluadas durante el proceso de diseño y construcción del sistema.

Agitación

Durante el funcionamiento del biodigestor, la mayor parte de su volumen interno permanece en contacto con la fase líquida, compuesta por una mezcla de biomasa y agua, mientras que una pequeña fracción lo hace con la fase gaseosa generada (biogás). Esta configuración mantiene el plástico externo del digestor en contacto directo con las paredes de la zanja, excepto en la parte superior, correspondiente a la campana de gas, la cual permanece expuesta al ambiente, ya sea al aire libre o en el interior de un invernadero. Esta exposición ambiental, en combinación con los procesos internos de digestión anaeróbica (DA), acelera la degradación de los materiales plásticos, induciendo cambios estructurales en las películas plásticas, manifestados en su aspecto amarillento, endurecimiento, fragmentación y pérdida de transparencia, siendo estos efectos más intensos en condiciones termofílicas. Además, la exposición a la radiación ultravioleta (UV) amplifica significativamente estos deterioros, lo que sugiere un efecto acumulativo entre la DA y la radiación solar, lo que compromete la durabilidad de la estructura, siendo la zona expuesta la más susceptible a rupturas (Zhang et al., 2024). Cuando la radiación incide sobre una superficie, una parte se absorbe, otra se refleja y el resto se transmite; esta última proporción, respecto a la radiación incidente, se conoce como transmisividad (Reichle, 2023).

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas son las más relevantes al seleccionar el material plástico para un biodigestor tubular. Esto se debe a que el biogás generado en su interior ejerce presión sobre la parte superior del digestor y sobre el recipiente en general (FAO, 2011). Por ello, es fundamental conocer los rangos de presión que el material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes que



comprometan su durabilidad. En este contexto, la propiedad más importante a evaluar es el límite elástico, o resistencia a la fluencia, del plástico ([Arrieta-Palacios, 2016](#)).

Consideraciones para la Instalación

Inclinación. La instalación del biodigestor tubular debe realizarse con una leve inclinación en dirección descendente, desde la entrada hacia la salida, para facilitar el flujo de la mezcla a lo largo del digestor. Está pendiente también permite la separación longitudinal de las fases de acidogénesis y metanogénesis ([Padilla & Rivero, 2016](#)). Sin embargo, la inclinación no debe superar los 2 o 3 grados, puesto que un ángulo mayor provocaría un flujo excesivamente rápido, afectando la eficiencia del proceso.

Depósito y tuberías de alimentación y descarga del digestor. El volumen del depósito de salida del biodigestor dependerá de la frecuencia con la que se utilice el biol como fertilizante. Si este puede aplicarse diariamente, por ejemplo, en un terreno de cultivo cercano, el volumen del depósito de salida será similar al de entrada. Sin embargo, si se prefiere almacenar el biol para su uso posterior en mayores cantidades, el depósito de salida deberá ser de mayor volumen, calculado en función del tiempo de almacenamiento. En cuanto al volumen interno del biodigestor, la mayoría de autores recomienda que el líquido ocupe entre el 75 % y el 80 % del volumen total, dejando el resto para el gas, aunque puede llegar hasta un 90 % de ocupación líquida ([Ferrer et al., 2016](#)). Así, un digestor con un volumen total de 6 m³, equivalente a 5.4 m³ de líquido y 0.6 m³ para biogás, sería suficiente para satisfacer una demanda energética promedio, aunque esta distribución final depende directamente de las dimensiones de la zanja en la que se instale.

Se presentan los valores de VG/VT para diferentes valores de θ campana gas. Mientras mayor es la campana gas, mayor será el área transversal de la campana de gas y, por tanto, mayor será la relación entre el volumen gaseoso y volumen total del biodigestor (VG/VT).

Tabla 2
Diferentes ángulos θ en función de la relación entre La Campana de gas y b

$f_{campana\ gas} = \frac{L_{campana\ de\ gas}}{b}$	1.1	1.2	1.3	1.5	1.75	2	2.25
$\theta (^{\circ})$	86	118	140	171	198	217	244

Estimar la producción de biomasa y biogás generada durante el proceso de digestión anaeróbica

Con relación a la estimación de la producción de biomasa y biogás generada durante el proceso de digestión anaeróbica, en este estudio la eficiencia de conversión energética del biodigestor tubular alcanzó un promedio del 70.6 %, con una producción acumulada de 1.116 m³ de biogás a partir de 55.8 kg de residuos, y un contenido promedio de metano entre 60 % y 65 %. Condiciones térmicas controladas ($T \approx 35.6^{\circ}C$) y una relación carbono/nitrógeno de 25.8:1 reflejan un rendimiento técnico funcional. Sin embargo, en comparación con el estudio de [De Souza Guimarães y da Silva Maia \(2023\)](#), donde un biodigestor anaeróbico automatizado, operado en modo semicontinuo, logró una remoción de sólidos volátiles del 80.7 % y una producción de 68.5L de biogás con 78.5 % de CH₄, el sistema tubular evaluado presenta un desempeño inferior en términos de calidad y volumen de biogás. Esta diferencia puede atribuirse a la alimentación periódica del sistema semicontinuo, que mantiene niveles constantes de sustrato disponible y actividad microbiana óptima, a diferencia de la carga única utilizada en este estudio. Por otro lado, los valores obtenidos en esta investigación son comparables a los reportados por [Verdezoto del Salto et al. \(2023\)](#) en zonas altoandinas, donde un biodigestor tubular de 17.68 m³, con carga diaria de estiércol diluido al 10 % y un tiempo de retención de 60 días, produjo biogás con un contenido de metano entre 58 % y 70.07 %, evidenciando que el diseño tubular puede adaptarse eficazmente a distintos contextos climáticos, aunque sujeto a variaciones en la calidad del sustrato y el régimen de carga.

Además de la producción energética, es importante considerar el impacto ambiental del proceso. En esa línea, [Yasmin et al. \(2022\)](#) demostraron que la aireación, la humedad y la relación C/N afectan de forma directa la generación de emisiones de GEI, especialmente el metano. En su comparación entre compostaje tradicional y vermicompostaje, se observó una reducción de hasta un 40 % en las emisiones de CH₄ con métodos que optimizan la estabilidad del sustrato. En ese sentido, el presente estudio mantuvo parámetros físico-químicos controlados, como pH en rangos óptimos (6.0-7.6),



temperatura promedio de 31.5 °C y una adecuada relación C/N (25.8:1), lo cual contribuyó a una digestión anaeróbica eficiente y minimizó el riesgo de liberación de metano no aprovechado. Si bien no se cuantifican directamente las emisiones residuales, el cumplimiento de estos parámetros operativos sugiere que el sistema podría alinearse con prácticas de mitigación de GEI, complementando así su valor como tecnología limpia y sustentable para el tratamiento de residuos orgánicos en contextos rurales o agroindustriales.

Con relación a la identificación de los factores que inciden en la eficiencia del sistema, tales como la composición de los residuos, temperatura, tiempo de retención y carga orgánica, en el presente artículo destacaron la composición de los residuos, la temperatura operativa, el tiempo de retención hidráulica (TRH) y la carga orgánica aplicada, debido a que se utilizó una mezcla orgánica con relación C/N de 25.8:1, dentro del rango ideal para la digestión anaeróbica, favoreciendo una conversión promedio del 70.6 % de residuos en biogás y un contenido de metano del 60–65 %. Estos resultados se alinean con el estudio de [Verdezoto del Salto et al. \(2023\)](#), quienes emplearon estiércol bovino con C/N de 20.3 y lograron un rendimiento de CH₄ entre 58 % y 70.07 %. Así, ambas investigaciones exhiben que el equilibrio entre carbono y nitrógeno mantiene la estabilidad microbiana y evita acumulaciones de amoníaco o ácidos grasos volátiles. En cuanto a la temperatura, el sistema evaluado en este artículo se mantuvo en torno a los 35.6 °C, lo cual benefició la actividad de bacterias metanogénicas, mientras que [Verdezoto del Salto et al. \(2023\)](#) operaron en condiciones más frías, con una temperatura de 13.9 °C, por lo que tuvieron que ampliar el TRH a 60.18 días para compensar la menor velocidad de reacción. En cambio, en este estudio se empleó un TRH de 25 días, resultando en una producción efectiva de biogás; no obstante, pudo haber limitado la conversión total de la materia orgánica disponible, especialmente si se considera la alta tasa de carga inicial.

Respecto a la carga orgánica, este estudio utilizó una dilución cercana al 5 %, típica de sistemas tubulares, mientras que [Verdezoto del Salto et al. \(2023\)](#) sugieren una dilución del 10 % para evitar atascos y asegurar una adecuada fluidez, sobre todo con sustratos con alto contenido de sólidos. En comparación, [Martí-Herrero \(2023\)](#) argumenta que los biodigestores de domo fijo pueden trabajar con concentraciones más altas de sólidos, de hasta el 10 %, sin generar problemas de sedimentación, por el diseño interno y la agitación neumática pasiva que tiene, lo que representa una ventaja técnica importante frente a la agitación manual utilizada en el sistema tubular descrito en este estudio. Finalmente, [De Souza Guimarães y da Silva Maia \(2023\)](#) demuestran que la carga semicontinua, aplicada periódicamente, permite mantener una población microbiana activa y constante, elevando significativamente la eficiencia del proceso. En contraste, el sistema evaluado se basa en carga puntual, lo cual, si bien reduce la complejidad operativa, puede generar periodos de inestabilidad en la producción de biogás.

En suma, la comparación con otros estudios evidencia que la eficiencia del biodigestor está fuertemente condicionada por la calidad del sustrato, el diseño del sistema, el régimen de carga y el tiempo de retención; además, enfatiza que su optimización integral mejora el rendimiento energético y ambiental en contextos rurales o periurbanos.

En línea con los resultados obtenidos, se recomienda optimizar el sistema tubular mediante la implementación de un régimen de carga semicontinua y la incorporación de mejoras en el sistema de agitación. Estas medidas permitirían incrementar la estabilidad microbiana y mejorar la conversión de materia orgánica en biogás. Esta recomendación se sustenta en la evidencia técnica presentada por [Martí Herrero \(2023\)](#), quien destaca que los biodigestores de domo fijo presentan ventajas significativas frente al diseño tubular, dado que su sistema de agitación pasiva y su capacidad para operar con mayores concentraciones de sólidos permiten solucionar problemas de sedimentación sin requerir energía externa, lo cual resulta especialmente conveniente en regiones con limitaciones hídricas o acceso restringido a infraestructura eléctrica.

No obstante, y siguiendo a [Feistauer Araújo et al. \(2022\)](#), los biodigestores tubulares mantienen una alta viabilidad económica, particularmente en contextos agropecuarios como las propiedades lecheras, donde el aprovechamiento del biol como biofertilizante permite reducir los costos en insumos minerales, favoreciendo un retorno financiero positivo desde el primer año. En este sentido, se recomienda promover modelos híbridos o adaptativos que integren las ventajas técnicas del domo fijo con la rentabilidad del sistema tubular, así como fortalecer los esquemas de financiamiento, asistencia técnica y capacitación comunitaria, con el fin de garantizar la sostenibilidad operativa y económica de estas tecnologías en el mediano y largo plazo.

Finalmente, aunque el presente diseño no se enfocó directamente en la reducción de gases de efecto invernadero, [Yasmin et al. \(2022\)](#) destacan la relevancia de condiciones como la relación C/N, el pH y la humedad, todas monitoreadas en este estudio, en la mitigación de emisiones contaminantes, lo que refuerza el valor ambiental del biodigestor como tecnología limpia para el tratamiento de residuos orgánicos.



Conclusiones

En función del análisis realizado, el biodigestor tubular mostró una eficiencia técnica favorable, alcanzando un 70,6 % de conversión de residuos orgánicos en biogás y una concentración de metano entre 60 % y 65 %, lo cual evidencia un desempeño adecuado. Las condiciones operativas, como la relación C/N, temperatura y pH, se mantuvieron dentro de rangos óptimos, lo que garantiza la estabilidad del proceso.

No obstante, se identificaron limitaciones asociadas al sistema de carga puntual y a la agitación manual, factores que redujeron la eficiencia microbiana a lo largo del tiempo. Por esta razón, se recomienda la implementación de un sistema de alimentación semicontinua, así como la incorporación de mecanismos de agitación pasiva o automatizada, a fin de optimizar la actividad biológica en el interior del digestor.

En términos comparativos, si bien el modelo tubular presentó menor eficiencia frente a biodigestores semicontinuos y menor complejidad técnica respecto a los de domo fijo, especialmente en relación con la concentración de sólidos y el control de la sedimentación, su rendimiento fue consistente con el de otros sistemas tubulares operativos en zonas altoandinas, lo cual respalda su adaptabilidad a contextos diversos.

Adicionalmente, estos sistemas ofrecen ventajas económicas significativas: la producción de biol como fertilizante orgánico reduce los costos agrícolas, y su instalación y operación requieren una inversión relativamente baja, lo que los convierte en una alternativa viable para comunidades rurales y de pequeña escala.

En esta línea, se sugiere incorporar mejoras estructurales, adecuar el tiempo de retención hidráulica (TRH) según el tipo de sustrato y las condiciones ambientales, fomentar el desarrollo de diseños adaptativos en función de la disponibilidad hídrica y los tipos de residuos, e impulsar políticas públicas orientadas al financiamiento, la capacitación técnica y el seguimiento operativo para asegurar su sostenibilidad a largo plazo.

Referencias

Arrieta-Palacios, W. (2016). *Diseño de un biodigestor doméstico para el aprovechamiento energético del estiércol de ganado* [Tesis de pregrado, Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería]. Repositorio Institucional de la UDEP. <https://hdl.handle.net/11042/2575>

Chacaltana Lara, N. S. (2023). *Valorización de residuos sólidos en el Perú*. *Revista de Climatología*, 23. <https://rclimatol.eu/2023/12/21/valorizacion-de-residuos-solidos-en-el-peru/>

De Souza Guimarães, C., & Da Silva Maia, D. R. (2023). Development of anaerobic biodigester for the production of biogas used in Semi-Continuous System bioprocesses: an efficient alternative for Co-Digestion of low biodegradability biomass. *Biomass*, 3(1), 18–30. <https://doi.org/10.3390/biomass3010002>

Feistauer Araújo, G., Feiden, A., & Camargo Nogueira, C. E. (2022). Technical-economic viability of tubular biodigester and photovoltaic energy for rural property. *International Journal of Development Research*, 12. <https://doi.org/10.37118/ijdr.24748.06.2022>

Ferrer, I., Uggetti, E., Poggio, D., & Martí, J. (2016). *Producción de biogás a partir de residuos orgánicos en biodigestores de bajo coste*. https://www.academia.edu/download/50230076/PRODUCCIN_DE_BIOGS_A_PARTIR_DE_RESIDUOS_20161110-17152-6k2zno.pdf

Fundación Aquae. (2021). *Qué es un biodigestor y cómo funciona el biogás*. Fundación Aquae. <https://www.fundacionaquae.org/wiki/biodigestor/>

Hajam, Y. A., Kumar, R., & Kumar, A. (2023). Environmental waste management strategies and vermi transformation for sustainable development. *Environmental Challenges*, 13, 100747. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100747>

Jáuregui Morales, S., Zevallos Mora, E., Jiménez, F. de M., & Larrea, C. O. (2025). *Viabilidad técnica y económica de un biodigestor para reducir costos operativos en una granja de cuyes Lezem*. *Revista de Investigación Hatun Yachay Wasi*, 4(2), 75–81. <https://doi.org/10.57107/hyw.v4i2.98>

Luna, B. E. B., Lahura, N., & Borda, S. (2023). Generación de Biogás a partir de residuos orgánicos mediante la aplicación del NBS gas home organic reactor, en el anexo 14, distrito de San Ramón Junín, Perú. *Revista Científica Pakamuros*, 11(4), 121-139. <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.unj02346>

Martí Herrero, J. (2023). Potencial de los biodigestores de bajo costo o "low-tech": Soluciones de ingeniería y perspectivas para una mayor eficiencia. *Revista RedBioLAC*, 7, 4–11. <http://revistaredbiolac.org/index.php/revistaredbiolac/article/view/74>



Ministerio del Ambiente del Perú. (2016). *Decreto Legislativo N.º 1278: Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos* [Decreto Legislativo]. Ministerio del Ambiente. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-legislativo-n-1278/>

Ministerio del Ambiente del Perú. (2023). *Indicador 3.2: Porcentaje de residuos sólidos orgánicos municipales valorizados* [PDF]. https://www.mef.gob.pe/contenidos/presu_publico/miql/pi/Indicador_3_2.pdf

Ministerio del Ambiente del Perú. (2024). *Perú: valorización de residuos orgánicos contribuye a la reducción de aproximadamente 25 000 toneladas de gases de efecto invernadero* [Nota de prensa]. Gob.pe. <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/906410-peru-valorizacion-de-residuos-organicos-contribuye-a-la-reduccion-de-aproximadamente-25-000-toneladas-de-gases-de-efecto-invernadero>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2011). *Manual de biogás* [PDF]. En M. T. Varnero Moreno (ed.), *Proyecto CHI/00/G32 "Chile: remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables"*. <https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2022). *Hacer frente a la pérdida y el desperdicio de alimentos: una oportunidad de ganar por partida triple*. <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-unesco-agriculture-environment-food-loss-waste-day-2022/es>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *En el primer Día Internacional de Cero Residuos, la FAO resalta importancia de la bioeconomía*. <https://www.fao.org/newsroom/detail/on-first-ever-international-day-of-zero-waste-fao-puts-the-spotlight-on-bioeconomy/es>

Padilla, A., & Rivero, J. (2016). Producción de Biogás y compost a partir de Residuos Orgánicos recolectados del Complejo Arqueológico Huaca de la Luna. *SCIENDO INGENIUM*, 12(1), 29-43. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/1358>

Pino Panchi, E. O., Pilay Mero, J. W., Drouet Candell, A. E., & Tomalá Tomalá, A. V. (2025). *Biodigestor anaeróbico para la producción de biogás y biofertilizante a partir de residuos porcinos*. *Revista Alfa*, 9(25), 177-190. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i25.340>

Reichle, D. E. (2023). *Energy relationships between organisms and their environment*. In Elsevier eBooks (pp. 29-56). <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-18775-9.00001-2>

Verdezoto del Salto, L., Verdezoto Mendoza, F., Navas Rea, A., & Rodríguez Cepeda, E. (2023). Implementación de biodigestores tubulares anaeróbico, como herramienta de auto sustentabilidad para la producción de biogás y biol en el cantón Guaranda, provincia Bolívar, Ecuador. *Tesla Revista Científica*, 3(1), e98. <https://doi.org/10.55204/trc.v3i1.e98>

Yasmin, N., Jamuda, M., Panda, A. K., Samal, K., & Nayak, J. K. (2022). Emission of greenhouse gases (GHGs) during composting and vermicomposting: Measurement, mitigation, and perspectives. *Energy Nexus*, 7, 100092. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100092>

Zhang, S., Xing, Z., Li, Y., Jiang, L., Shi, W., Zhao, Y., & Fang, L. (2024). Plastic film from the source of Anaerobic digestion: Surface degradation, biofilm and UV response characteristics. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 135793. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135793>