

Obtaining biogas from bovine manure and dry fodder from the “Los Luises” agricultural farm, Trujillo-2024

Obtención de biogás a partir de estiércol bovino y forraje seco de la agropecuaria “Los Luises”, Trujillo-2024

Luis Alberto Alejandro Rodríguez Angulo¹, Haniel Solís Muñoz², Luis David Moncada Torres³, Elias Fernando Haro Aro⁴, Willian Antonio Blas Roeder⁵, Antonio Manuel Otoy Zelada⁶, Marjhury Lorena Sanchez Perez⁷

¹ Universidad Nacional de Trujillo, Perú, lurodrigueza@unitru.edu.pe

² Universidad Nacional de Trujillo, Perú, hsolism@unitru.edu.pe

³ Universidad Nacional de Trujillo, Perú, lmoncadat@unitru.edu.pe

⁴ Universidad Nacional de Trujillo, Perú, eharoa@unitru.edu.pe

⁵ Universidad Nacional de Trujillo, Perú, wblasro@unitru.edu.pe

⁶ Universidad Nacional de Trujillo, Perú, amotoyaz@unitru.edu.pe

⁷ Universidad Nacional de Trujillo, Perú, msanchezpe@unitru.edu.pe

Resumen- Residuos comunes en granjas dedicadas a la producción de leche de vaca incluyen estiércol bovino y forraje seco. La economía circular es fundamental para evitar el desperdicio de residuos y prevenir la contaminación ambiental. Muchas empresas agropecuarias no cuentan con un método para aprovechar los residuos que generan y estos al descomponerse expulsan contaminantes como gases de efecto invernadero. La presente investigación tuvo el objetivo principal de comparar la producción de biogás utilizando estiércol bovino y forraje seco de la Agropecuaria “Los Luises”, ubicado en 8° 2'45,51"S; 79° 7'59,57"O, así como el rendimiento de los pretratamientos utilizados mediante la fermentación anaerobia, con la finalidad de evaluar la diferencia significativa entre ambos sustratos al producir biogás. Los pretratamientos utilizados fueron específicos para cada sustrato, con ello se busca que el tiempo de fermentación metánica disminuya y la concentración de metano en el biogás aumente. Los resultados muestran que la producción de biogás tuvo mayor rendimiento en estiércol bovino que la producción en forraje seco, evidenciado por una producción de metano promedio de 603,75 mL/L y 752,5 mL/L con diluciones 1:4 y 1:5 respectivamente a comparación de la producción de metano promedio del forraje seco, siendo de 396,67 mL/L y 533,75 mL/L con diluciones 1:4 y 1:5 respectivamente, ambas en un periodo 30 días de tratamiento anaerobio.

Palabras clave: Estiércol, bovino, forraje seco, residuos alimenticios, biogás.

Abstract – Common wastes in farms dedicated to cow milk production include bovine manure and dry forage. Circular economy is essential to prevent waste of residues and avoid environmental pollution. Many agricultural companies lack a method to utilize the waste they generate, and during decomposition these residues release pollutants such as greenhouse gases. The main objective of this research was to compare biogas production using bovine manure and dry forage from Agropecuaria “Los Luises,” located at 8° 2'45.51"S; 79° 7'59.57"W, as well as to evaluate the performance of the pretreatments applied through anaerobic fermentation, in order to determine the significant differences between both substrates in biogas production. The

pretreatments used were specific to each substrate, aiming to reduce the methanogenic fermentation time and increase methane concentration in the biogas. The results show that biogas production had higher yield with bovine manure compared to dry forage, with an average methane production of 603.75 mL/L and 752.5 mL/L at dilutions of 1:4 and 1:5, respectively, compared to the average methane production of dry forage, which was 396.67 mL/L and 533.75 mL/L at dilutions of 1:4 and 1:5, respectively, both measured over a 30-day anaerobic treatment period.

Keywords: manure, bovine, dry forage, food waste, biogas.

1. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos orgánicos se acumula día tras día, no solo en zonas comerciales o residenciales, esto también pasa en la industria agropecuaria, las cuales no tienen una gestión de residuos adecuada, lo que genera un gasto considerable para las empresas removerlos además del impacto negativo que genera la contaminación de estos residuos al descomponerse [2].

En la diversa gama de soluciones sostenibles para reducir el impacto de los residuos orgánicos generados por la industria agropecuaria, destaca la producción de biogás, como una solución multifacética, ya que aborda problemáticas ambientales, energéticas y económicas [18].

El cambio hacia fuentes de energía renovables como los biocombustibles mitiga los efectos del cambio climático que producen los residuos orgánicos, ya que al capturar y combustionar moderadamente el metano producido se reduce la emisión de un gas de efecto invernadero (GEI) que tiene un potencial de calentamiento global (PCG) 25 veces mayor al dióxido de carbono [12].

La producción de biogás en empresas agropecuarias genera beneficios económicos significativos, particularmente en zonas rurales ya que el biogás y los subproductos generados como biofertilizantes genera economía circular, reduce la necesidad de recursos externos e impulsa el empleo

local, provocando mayor desarrollo socioeconómico sostenible [4].

El biogás puede producirse a partir de una gran variedad de residuos orgánicos, incluyendo residuos agrícolas y estiércol, la transformación de residuos orgánicos a biogás se da por el metabolismo anaerobio de las bacterias fermentativas, el tiempo de fermentación anaerobia y la concentración de metano en el biogás varía según las condiciones del biodigestor y el estado de la materia orgánica utilizada.

Actualmente, la agropecuaria “Los Luises” no utiliza los residuos orgánicos que genera el ganado vacuno (estiércol bovino y forraje seco) para obtener una materia prima útil y desecharlos requiere una inversión considerable, por lo que se acumulan generado contaminantes y malos olores continuamente. En el presente estudio se buscó producir biogás a partir de dos sustratos: estiércol de ganado vacuno y forraje seco, dos residuos orgánicos obtenidos de la agropecuaria “Los Luises” utilizando pretratamientos específicos que aumenten el rendimiento en ambos sustratos, el cual fue evidenciado por una mayor concentración de metano en el biogás producido. El tratamiento anaerobio se realizó en dos diluciones en cada sustrato (1:4 y 1:5), se utilizó rumen de vaca proveniente de camal como inóculo fermentativo y biorreactores herméticamente sellados de 7 litros, este proceso se repitió 3 veces, con el objetivo de comparar la producción de metano de cada sustrato y evaluar las condiciones producción.

2. METODOLOGÍA

2.1. Preparación de los biorreactores

Los biorreactores utilizados tuvieron un volumen de aproximadamente 7 litros, adecuado para la dilución que va de 4 litros a 5 litros, 500 mL de inóculo fermentativo, 1 litro de sustrato y el biogás producido por este, en condiciones herméticas con un sistema en la tapa superior para controlar la salida de gas y la salida de la dilución para un posterior muestreo [29], se utilizó un equipo de venoclisis para controlar el flujo que sale por la manguera, se realizó una agitación manual intermitente lenta durante 2 minutos cada 6 horas asegurando la eficiencia en tratamientos anaerobios. Todo el proceso tuvo una duración de 30 días, recomendado por [19].

2.2. Preparación del inóculo fermentativo

Se utilizó como inóculo el fluido ruminal vacuno, procedente de del camal Frigorífico Salaverry S.A.C., cabe mencionar que el rumen es una mezcla de residuos orgánicos de origen vegetal que se va procesando con ayuda de enzimas y bacterias en el estómago de la vaca, al ser un desecho que constantemente se acumula en los camales, pudiendo reducir su impacto al medio ambiente dándoles un uso como inóculo enzimático y bacteriano, debido a que contiene gran cantidad de enzimas y bacterias anaeróbicas que ayudan a degradar la materia orgánica de los sustratos y generar metanogénesis en menor tiempo.

En este caso la preparación para que el rumen pueda ingresar a los biorreactores consistió en filtrarlo, de manera que las partículas de mayor volumen no ingresen al sistema, ya que solo se necesita la parte líquida, de esta manera no afecta las mediciones de DQO realizadas al inicio y al final de la digestión anaerobia [27].

2.3. Preparación del sustrato

Estiércol bovino

Posterior a la recolección de muestras al azar, se disolvió el sustrato en agua, la cantidad dependió de la proporción que se utilizó (1:4 o 1:5), luego se tamizó las partículas grandes, esto se realizó con un tamiz de tela (± 1 mm) y finalmente se vertió el inóculo fermentativo previamente preparado [31].

Forraje seco

Se realizó la hidrólisis de la lignina, para ello se recolectó la muestra al azar de los comederos de las vacas, esta muestra se remojó en NaOH 5% durante 24 horas, luego se escurrió y enjuagó la parte sólida para posteriormente neutralizar el pH con ácido cítrico, después se licuó la muestra y se disolvió en agua dependiendo a la proporción que se utilizó (1:4 o 1:5), se tamizó las partículas grandes con un tamiz de tela (± 1 mm) y finalmente se vertió el inóculo fermentativo previamente preparado [29].

2.4. Justificación de métodos

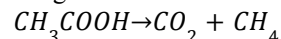
La elección de los métodos de pretratamiento utilizados, así como la preparación del inóculo fermentativo y biorreactores fueron elegidos por los antecedentes donde utilizan los mismos métodos en residuos orgánicos del mismo tipo y obtuvieron resultados óptimos de producción de biogás y concentración de metano. Entre estos estudios destacan los de las referencias [29]; [19]; [1] y [25].

Proceso de biodigestión

La digestión en el biorreactor fue anaeróbica, por lo que se realizó en dos fases:

Fermentación ácida: En esta fase ocurren dos procesos, la hidrólisis que consiste en la transformación de compuestos orgánicos complejos (grasas, proteínas, entre otros) en unidades moleculares menores, luego estas moléculas pasan al segundo proceso que viene a ser la acidogénesis, en la que se transforman en ácidos orgánicos de cadena corta (ácido acético, ácido propiónico y ácido butílico), estos procesos son realizados por bacterias anaerobias facultativas.

Fermentación metánica: En esta fase ocurren dos procesos, la acetogénesis donde las bacterias anaerobias transforman los ácidos de la dilución en acetato, y la metanogénesis, donde las bacterias metanogénicas transforman sustratos orgánicos en metano.



Debido a que la velocidad de crecimiento de las bacterias facultativas y anaerobias responsables de la fermentación ácida es mucho más elevada que el de las bacterias responsables de la fermentación metánica, esta última es la que controla la velocidad en el proceso de biodigestión anaerobia, por ello se deben mantener las condiciones

necesarias para mantener una fermentación metánica eficaz [23].

2.5. Análisis de datos

Se utilizó el software estadístico (SPSS) y se realizó los análisis estadísticos en T-Student.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de las diluciones

En las diluciones utilizadas para la producción de biogás se analizaron los siguientes parámetros: sólidos totales, sólidos volátiles, pH, DQO, conductividad eléctrica y sales.

Dilución de estiércol bovino

TABLA I
PARÁMETROS INICIALES DE LA DILUCIÓN 1:4 EN ESTIÉRCOL BOVINO

| Parámetros | Inicial | | |
|-----------------------------|---------|--------|--------|
| | Rep. 1 | Rep. 2 | Rep. 3 |
| Sólidos Totales (mg/L) | 19898 | 21638 | 23550 |
| Sólidos no Volátiles (mg/L) | 6570 | 7164 | 8204 |
| Sólidos Volátiles (mg/L) | 13328 | 14474 | 15346 |
| DQO (ppm) | 4050 | 4050 | 4000 |
| pH | 7,6 | 7,4 | 7,4 |
| Conductividad (mS/cm) | 5,35 | 5,24 | 5,17 |
| Sal (ppm) | 2840 | 2840 | 2730 |
| Sal (%) | 2,8 | 2,8 | 2,7 |

La repetición 3 tuvo valores iniciales más altos respecto a sólidos totales y sólidos volátiles.

TABLA II
PARÁMETROS FINALES DE LA DILUCIÓN 1:4 EN ESTIÉRCOL BOVINO

| Parámetros | Final | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|
| | Rep. 1 | Rep. 2 | Rep. 3 |
| Sólidos Totales (mg/L) | 13892 | 15240 | 15394 |
| Sólidos no Volátiles (mg/L) | 6102 | 6846 | 6750 |
| Sólidos Volátiles (mg/L) | 7790 | 8394 | 8644 |
| DQO (ppm) | 2200 | 2275 | 2450 |
| pH | 5,73 | 5,72 | 5,67 |
| Conductividad (mS/cm) | 11,59 | 13,16 | 13,44 |
| Sal (ppm) | 6120 | 6210 | 6890 |
| Sal (%) | 6,1 | 6,7 | 6,8 |

La repetición 3 tuvo valores finales más altos respecto a sólidos totales y sólidos volátiles.

TABLA III
PARÁMETROS INICIALES DE LA DILUCIÓN 1:5 EN ESTIÉRCOL BOVINO

| Parámetros | Inicial | | |
|------------------------|---------|--------|--------|
| | Rep. 1 | Rep. 2 | Rep. 3 |
| Sólidos Totales (mg/L) | 12926 | 10674 | 13258 |

| | | | |
|-----------------------------|------|------|------|
| Sólidos no Volátiles (mg/L) | 4630 | 3854 | 4276 |
| Sólidos Volátiles (mg/L) | 8296 | 6820 | 8982 |
| DQO (ppm) | 3550 | 3850 | 3550 |
| pH | 7,5 | 7,5 | 7,3 |
| Conductividad (mS/cm) | 5,18 | 4,73 | 4,63 |
| Sal (ppm) | 2520 | 2530 | 2410 |
| Sal (%) | 2,5 | 2,5 | 2,4 |

La repetición 3 tuvo valores iniciales más altos respecto a sólidos totales y sólidos volátiles.

TABLA IV
PARÁMETROS FINALES DE LA DILUCIÓN 1:5 EN ESTIÉRCOL BOVINO

| Parámetros | Final | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|
| | Rep. 1 | Rep. 2 | Rep. 3 |
| Sólidos Totales (mg/L) | 9482 | 7570 | 8900 |
| Sólidos no Volátiles (mg/L) | 4038 | 3258 | 3392 |
| Sólidos Volátiles (mg/L) | 5444 | 4312 | 5508 |
| DQO (ppm) | 1225 | 1900 | 1375 |
| pH | 5,86 | 5,72 | 5,71 |
| Conductividad (mS/cm) | 8,01 | 6,06 | 6,83 |
| Sal (ppm) | 3460 | 3100 | 3320 |
| Sal (%) | 3,4 | 3,1 | 3,3 |

La repetición 1 y 3 tuvieron valores finales más altos respecto a sólidos totales y sólidos volátiles respectivamente.

Dilución de forraje seco

TABLA V
COMPOSICIÓN DE FORRAJE EN PESO POR BOVINO

| Alimentos | Cantidad por día (kg) |
|-----------------------------|-----------------------|
| Concentrado | 13,00 |
| Chala de campo | 10,94 |
| Silo | 23,79 |
| Melaza | 1,60 |
| Alfalfa Picada | 2,22 |
| Ración total por día | 51,55 |

La ración total diaria por vaca es 51,55 kg de forraje en la Agropecuaria "Los Luises".

TABLA VI
PARÁMETROS INICIALES DE LA DILUCIÓN 1:4 EN FORRAJE SECO

| Parámetros | Inicial | | |
|-----------------------------|---------|--------|--------|
| | Rep. 1 | Rep. 2 | Rep. 3 |
| Sólidos Totales (mg/L) | 15278 | 16938 | 15450 |
| Sólidos no Volátiles (mg/L) | 7876 | 8444 | 7864 |
| Sólidos Volátiles (mg/L) | 7402 | 8494 | 7586 |
| DQO (ppm) | 2800 | 2650 | 2750 |
| pH | 7,5 | 7,4 | 7,4 |
| Conductividad (mS/cm) | 11,75 | 11,54 | 11,73 |
| Sal (ppm) | 6730 | 6630 | 6710 |

| Parámetros | Inicial | | |
|------------|---------|--------|--------|
| | Rep. 1 | Rep. 2 | Rep. 3 |
| Sal (%) | 6,7 | 6,6 | 6,7 |

La repetición 2 tuvo valores finales más altos respecto a sólidos totales y sólidos volátiles.

TABLA VII
PARÁMETROS FINALES DE LA DILUCIÓN 1:4 EN FORRAJE SECO

| Parámetros | Final | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|
| | Rep. 1 | Rep. 2 | Rep. 3 |
| Sólidos Totales (mg/L) | 12342 | 12106 | 11474 |
| Sólidos no Volátiles (mg/L) | 7228 | 6638 | 6138 |
| Sólidos Volátiles (mg/L) | 5114 | 5468 | 5336 |
| DQO (ppm) | 1700 | 1475 | 1625 |
| pH | 6,9 | 6,8 | 6,8 |
| Conductividad (mS/cm) | 12,52 | 12,34 | 11,59 |
| Sal (ppm) | 7210 | 7140 | 6680 |
| Sal (%) | 7,2 | 7,1 | 6,6 |

La repetición 1 y 2 tuvieron valores finales más altos respecto a sólidos totales y sólidos volátiles respectivamente.

TABLA VIII
PARÁMETROS INICIALES DE LA DILUCIÓN 1:5 EN FORRAJE SECO

| Parámetros | Inicial | | |
|-----------------------------|---------|--------|--------|
| | Rep. 1 | Rep. 2 | Rep. 3 |
| Sólidos Totales (mg/L) | 12918 | 11038 | 11462 |
| Sólidos no Volátiles (mg/L) | 7922 | 5982 | 5974 |
| Sólidos Volátiles (mg/L) | 4996 | 5056 | 5488 |
| DQO (ppm) | 2500 | 2600 | 2550 |
| pH | 7,5 | 7,3 | 7,5 |
| Conductividad (mS/cm) | 10,33 | 9,85 | 10,03 |
| Sal (ppm) | 5950 | 5620 | 5720 |
| Sal (%) | 5,9 | 5,6 | 5,7 |

La repetición 1 y 3 tuvieron valores finales más altos respecto a sólidos totales y sólidos volátiles respectivamente.

TABLA IX
PARÁMETROS FINALES DE LA DILUCIÓN 1:5 EN FORRAJE SECO

| Parámetros | Final | | |
|-----------------------------|--------|--------|--------|
| | Rep. 1 | Rep. 2 | Rep. 3 |
| Sólidos Totales (mg/L) | 9221 | 9156 | 9312 |
| Sólidos no Volátiles (mg/L) | 5426 | 5832 | 5682 |
| Sólidos Volátiles (mg/L) | 3795 | 3324 | 3630 |
| DQO (ppm) | 1025 | 975 | 1075 |
| pH | 6,5 | 6,7 | 6,5 |
| Conductividad (mS/cm) | 10,99 | 9,95 | 9,66 |
| Sal (ppm) | 6230 | 5580 | 5590 |
| Sal (%) | 6,2 | 5,5 | 5,5 |

La repetición 2 y 1 tuvieron valores finales más altos respecto a sólidos totales y sólidos volátiles respectivamente.

3.2. Acondicionamiento del sustrato:

Pretratamiento en estiércol bovino

La muestra se tomó al azar tanto en los corrales de los bovinos como en la sala de ordeño, para acondicionar el estiércol como sustrato se diluyó 1 litro de muestra de estiércol en agua potable para cada dilución, se utilizaron proporciones (1:4 y 1:5), luego se coló las partículas sólidas con un tamiz de tela (1mm) y se agregó 500 mL de fluido ruminal como inóculo fermentativo. Por último, se vertió en biorreactores de 7 litros, se agitó manualmente por 1 minuto y se cerró herméticamente. Se realizaron 3 repeticiones para cada dilución, en total se prepararon 6 biorreactores.

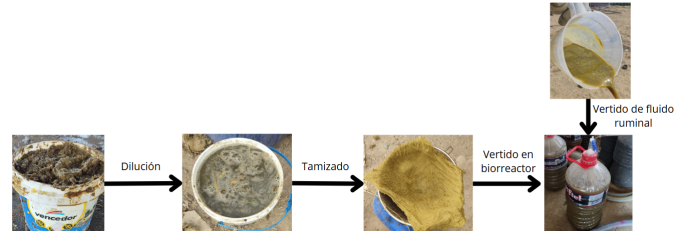


Figura 1. Diagrama de flujo de pretratamiento en estiércol bovino.

Nota: Basado en el pretratamiento utilizado por [31].

Pretratamiento en forraje seco:

La muestra se tomó al azar a 1 metro de los comederos de los bovinos por el método del cuarteo, solo se utilizó forraje seco. Para acondicionar el forraje seco como sustrato se añadió un litro de muestra para cada dilución en una solución de NaOH al 5% (v/v) durante aproximadamente 24 horas, luego se enjuagó el forraje y se añadió ácido cítrico al 5% (v/v) hasta neutralizar el pH, posteriormente se escurrió la parte sólida para posteriormente licuarla en una licuadora a 2200 rpm durante 1 minuto, después se coló el sustrato con un tamiz de tela (1mm), acto seguido se vertió en un biorreactor de 7 litros agua hasta completar la proporción (1:4 y 1:5), 500 mL de fluido ruminal como inóculo fermentativo y 3 gramos de urea como macronutriente, finalmente se agitó manualmente por 1 minuto el biorreactor y se cerró herméticamente. Se realizaron 3 repeticiones para cada dilución, en total se prepararon 6 biorreactores.



Figura 2. Diagrama de flujo de pretratamiento en forraje seco.

Nota: Basado en el pretratamiento utilizado por la referencia [29].

3.3. Acondicionamiento del inóculo fermentativo:

El fluido ruminal utilizado se recolectó del camal Frigorífico Salaverry S.A.C., se seleccionó el rumen más fresco para que el inóculo fermentativo tenga mayor carga bacteriana, antes de verter el fluido ruminal en los biorreactores, el rumen fue colado con un tamiz de tela (1mm) para eliminar las partículas sólidas. Se recolectó 500 mL de fluido ruminal para cada biorreactor.



Figura 3. Diagrama de flujo de acondicionamiento del fluido ruminal.
Nota: Basado en la preparación de rumen como inóculo fermentativo realizado por la referencia [27].

3.4. Acondicionamiento del biorreactor:

Los biorreactores utilizados tuvieron un volumen neto de 7 litros, por lo que se utilizaron bidones vacíos previamente lavados con agua destilada, se colocó en las tapas un sistema para poder extraer el biogás generado de manera que se pueda recolectar sin que haya fugas, para ello se colocó en la parte de la tapa un equipo de venoclisis, ya que este contiene una manguerilla con una llave reguladora por la que el biogás puede salir controladamente. El tratamiento anaerobio tuvo una duración de 30 días y una agitación intermitente de 2 minutos cada 6 horas para ambos sustratos, los biorreactores se colocaron dentro de la sala de ordeño, en un lugar poco transitado para evitar el deterioro y la entrada de luz solar que puede perjudicar las condiciones óptimas de funcionamiento.

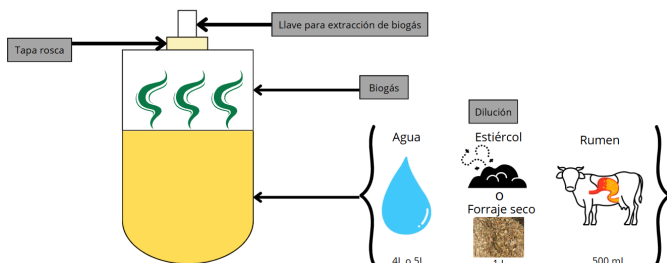


Figura 4. Diagrama de flujo de acondicionamiento de biorreactor.
Nota: Basado en el acondicionamiento de biorreactor realizado por [19]

3.5. Cálculo de producción de biogás:

El rendimiento de biogás se determinó con el porcentaje de metano (v/v) que produjo cada biorreactor, también se midió la cantidad de amoníaco (NH_3) y ácido sulfhídrico (H_2S).

TABLA X
PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN ESTIÉRCOL BOVINO 1:4.

| Parámetros | Estiércol Bovino | | |
|----------------------------|------------------|--------|--------|
| | Rep. 1 | Rep. 2 | Rep. 3 |
| Metano (v/v) | 58% | 61% | 60% |
| NH_3 (ppm) | 5,5 | 7 | 14,5 |
| H_2S (ppm) | 6 | over | over |

Cuando el parámetro supera el límite máximo que el equipo puede medir, digita el término “over”.

TABLA XI
PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN ESTIÉRCOL BOVINO 1:5.

| Parámetros | Estiércol Bovino | | |
|----------------------------|------------------|--------|--------|
| | Rep. 1 | Rep. 2 | Rep. 3 |
| Metano (v/v) | 47% | 51% | 53% |
| NH_3 (ppm) | 48 | 52,5 | 51,5 |
| H_2S (ppm) | 13 | 6,5 | over |

La repetición 3 tuvo una producción de biogás con mayor concentración de metano.

TABLA XII
PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN FORRAJE SECO 1:4.

| Parámetros | Forraje seco | | |
|----------------------------|--------------|--------|--------|
| | Rep. 1 | Rep. 2 | Rep. 3 |
| Metano (v/v) | 16% | 14% | 15% |
| NH_3 (ppm) | 69 | 74 | 43 |
| H_2S (ppm) | over | over | over |

La repetición 1 tuvo una producción de biogás con mayor concentración de metano.

TABLA XIII
PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN FORRAJE SECO 1:5.

| Parámetros | Forraje seco | | |
|----------------------------|--------------|--------|--------|
| | Rep. 1 | Rep. 2 | Rep. 3 |
| Metano (v/v) | 17% | 20% | 18% |
| NH_3 (ppm) | 14 | 15 | 35,5 |
| H_2S (ppm) | over | over | over |

La repetición 2 tuvo una producción de biogás con mayor concentración de metano.

3.6. Actividad metanogénica específica (AME):

Partiendo del factor de conversión de DQO a metano siendo de 0,35 [24], se halló la AME de cada dilución de los sustratos:

TABLA XIV
ACTIVIDADES METANOGENICA ESPECIFICA EN BIORREACTORES

| Biorreactores | | AME (mL/g.d) | |
|------------------|-----|--------------|------|
| Estiércol bovino | 1:4 | Rep. 1 | 1,62 |
| | | Rep. 2 | 1,43 |
| | | Rep. 3 | 1,18 |
| | 1:5 | Rep. 1 | 3,27 |
| | | Rep. 2 | 3,34 |
| | | Rep. 3 | 2,83 |
| Forraje seco | 1:4 | Rep. 1 | 1,73 |
| | | Rep. 2 | 1,61 |
| | | Rep. 3 | 1,73 |
| | 1:5 | Rep. 1 | 3,44 |
| | | Rep. 2 | 3,77 |
| | | Rep. 3 | 3,14 |

La repetición 2 del forraje seco 1:5 tuvo una actividad metanogénica específica más alta.

3.7. Producción de biogás:

La producción de biogás estimada por litro de dilución en 30 días de tratamiento anaerobio fue la siguiente.

TABLA XV
PRODUCCIÓN DE METANO Y BIOGÁS

| Biorreactores | | Metano (mL/L) | Biogás (mL/L) |
|------------------|------------|---------------|---------------|
| Estiércol bovino | Rep. 1 | 647,50 | 1116,38 |
| | 1:4 Rep. 2 | 621,25 | 1018,44 |
| | Rep. 3 | 542,50 | 904,17 |
| | 1:5 Rep. 1 | 813,75 | 1731,38 |
| | Rep. 2 | 682,50 | 1338,24 |
| | Rep. 3 | 761,25 | 1436,32 |
| Forraje seco | Rep. 1 | 385,00 | 2406,25 |
| | 1:4 Rep. 2 | 411,25 | 2570,31 |
| | Rep. 3 | 393,75 | 2625,00 |
| | 1:5 Rep. 1 | 516,25 | 2717,10 |
| | Rep. 2 | 568,75 | 2843,75 |
| | Rep. 3 | 516,25 | 2868,06 |

La repetición 1 de estiércol bovino en proporción 1:5 tuvo la mayor producción de metano.

3.8. Comparación de la producción de metano
Análisis estadístico

Para comparar la producción de metano en estiércol bovino y forraje seco se realizó la prueba t-Student con los datos descritos en la Tabla 15, por ello, primero se comprobó si los datos en ambos grupos (G1: metano producido con estiércol bovino, G2: metano producido con forraje seco) siguen una distribución normal:

Prueba de normalidad: Para comprobar la normalidad se consideró evaluar la significancia de Shapiro-Wilk, debido a que tenemos un tamaño de muestra pequeña:

TABLA XVI
PRUEBAS DE NORMALIDAD OBTENIDAS DEL SOFTWARE SPSS

| Sustratos | Kolmogorov-Smirnov | | | Shapiro-Wilk | | |
|------------------|--------------------|----|--------|--------------|----|-------|
| | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Estiércol bovino | 0,149 | 6 | 0,200* | 0,981 | 6 | 0,958 |
| Forraje seco | 0,256 | 6 | 0,200* | 0,862 | 6 | 0,195 |

* Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

Ambas significancias de Shapiro-Wilk son mayores a 0,05

Al ser mayor la significancia a 0,05, se comprueba que los datos en ambos grupos tienen una distribución simétrica y que se puede utilizar el promedio como un valor que represente a los 6 datos en cada grupo.

Prueba t-Student: En la tabla 17 se observa que el promedio del G1 es 678,13±97,87 y del G2 es 465,95198±77,95,

TABLA XVII
PROMEDIO DE DATOS EN AMBOS GRUPOS

| | Sustratos | N | Media | Desv. Desviación | Desv. Error promedio |
|-------------|------------------|---|----------|------------------|----------------------|
| M e t a n o | Estiércol bovino | 6 | 678,1250 | 97,86710 | 39,95408 |
| | Forraje seco | 6 | 465,2083 | 77,95198 | 31,82376 |

Se puede observar que el promedio en el G1 es mayor que el promedio del G2,

TABLA XVIII
PRUEBA T-STUDENT OBTENIDA CON EL SOFTWARE SPSS

| Prueba de Levene de igualdad de varianzas | | Prueba t para la igualdad de medias | | | | | | | | |
|---|--------------------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|-----------|
| | | F | Sig. | t | gl | Sig. (bilateral) | Diferencia de medias | Diferencia de error estándar | 95% Intervalo de confianza | |
| | | | | | | | | | Inferior | Superior |
| M e t a n o | Se asumen varianzas iguales | 0,060 | 0,811 | 4,168 | 10 | 0,002 | 212,91667 | 51,07915 | 99,10522 | 326,72811 |
| | No se asumen varianzas iguales | | | 4,168 | 9,524 | 0,002 | 212,91667 | 51,07915 | 98,32869 | 327,50465 |

Se observa en la prueba de Levene que la significancia es mayor a 0,05, por ello no se asumen varianzas iguales.

Prueba T: Al ser la significancia (bilateral) mayor a 0,05, se interpreta que las medias en ambos grupos (G1 y G2) son diferentes.

Diferencia de medias: Se observa que la diferencia de medias es positiva, por tanto, se comprueba que el promedio de metano producido por estiércol bovino es mayor al promedio por forraje seco, aceptando la hipótesis alternativa: Si existe diferencia significativa entre el estiércol bovino y el forraje seco en la obtención de biogás, debido a que el promedio del metano producido por el estiércol bovino es mayor al promedio de metano producido por forraje seco. Concluyendo que el estiércol bovino es un mejor sustrato que el forraje seco para producir biogás debido a que tiene mayor rendimiento, a esto se le atribuye la producción de metano por cada sustrato, lo cual se puede evidenciar en el siguiente diagrama de cajas.

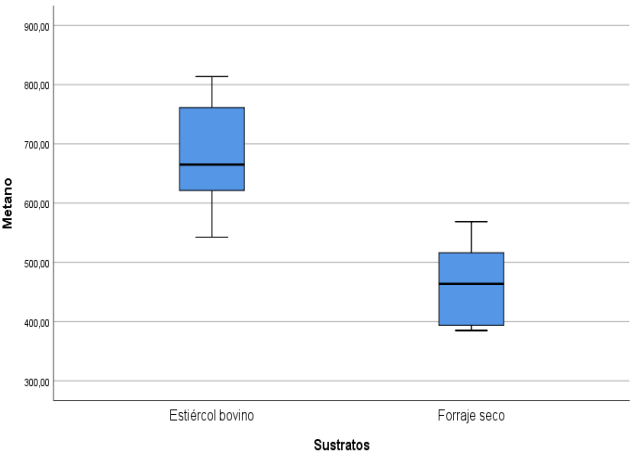


Figura 5. Gráfica de cajas obtenido con el software SPSS.

Nota: En la gráfica se observa la diferencia considerable de producción de metano.

3.9. Discusiones

Variación de los parámetros en las diluciones

La variación en los parámetros de las diluciones muestra la actividad microbiana y por tanto la producción de metano, los parámetros que se consideraron son sólidos totales (ppm), sólidos volátiles, DQO (ppm), pH, conductividad (mS/cm) y sales (ppm).

Los sólidos totales disminuyeron al final del tratamiento como lo describe las tablas 01, 02, 03, 04, 06, 07, 08 y 09 debido a que la materia orgánica presente en el sustrato se transformó en formas más simples. La disminución promedio de sólidos totales en estiércol bovino en proporción 1:4 y 1:5 fue de 31,5% y 29,5% respectivamente y en forraje seco en proporción 1:4 y 1:5 de 24,63% y 21,82% respectivamente siendo estos resultados menores a la disminución promedio del estudio realizado por la referencia [13], donde los sólidos totales disminuyeron en un 34,25%. Esto se atribuye a la concentración inicial de sólidos totales, composición del sustrato, inóculo fermentativo y el diseño del biorreactor.

La disminución de los sólidos volátiles en los biorreactores se debe a la descomposición de los ácidos volátiles en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) en la etapa de fermentación metánica. En las tablas 01, 02, 03, 04, 06, 07, 08 y 09 se observa una disminución promedio de sólidos volátiles en estiércol bovino en proporción 1:4 y 1:5 de 42,4% y 36,6% respectivamente y en forraje seco en proporción 1:4 y 1:5 de 32,21% y 30,83% respectivamente, la disminución de sólidos totales en el presente estudio es similar al resultado obtenido por la referencia [1] donde la producción de biogás con mayor rendimiento produjo un 39,51% de disminución de sólidos volátiles, a esto se le atribuye la similitud del inóculo fermentativo (fluido ruminal) y sustratos utilizados (estiércol bovino y residuos agrícolas).

La DQO disminuye considerablemente en los biorreactores durante el tratamiento debido al consumo de la materia orgánica por las bacterias fermentativas [1]. En las tablas 01, 02, 03, 04, 06, 07, 08 y 09 se observa una disminución promedio de DQO en estiércol bovino en proporción 1:4 y 1:5 de 41,46% y 59,8% respectivamente y en forraje seco en proporción 1:4 y 1:5 de 42,76% y 58,9% respectivamente, esta disminución de DQO es baja comparado con la investigación realizada por Abbas et al., 2023, donde la disminución de DQO fue de 65,15%. A esto se le atribuye la codigestión realizada por el autor, cabe mencionar que esto va a depender de los residuos con los que se cuente en el área de estudio.

La disminución del pH en un tratamiento anaerobio es debido a la formación de ácidos volátiles en la etapa de fermentación ácida, luego tiende a aumentar al transformarse los ácidos volátiles en metano [1]. En las tablas 01, 02, 03, 04, 06, 07, 08 y 09 se observa un pH promedio al inicio y final del tratamiento anaerobio en estiércol bovino de 7,45 y 5,74 y en forraje seco de 7,43 y 6,70 respectivamente,

comparado con la investigación realizada por Solís et al., 2023, donde el pH promedio de inicial y final de tratamiento anaerobio fue de 6,78 y 7,85 respectivamente, pudiendo atribuir que el pH no ha aumentado debido a la presencia de materia orgánica en los biorreactores en forma de ácidos orgánicos, por ello el pH final es más ácido que el pH inicial, esto se debe a condiciones climáticas, que no ofrecen una temperatura ideal para la actividad bacteriana.

El aumento en la conductividad eléctrica observada en los biorreactores indica una mayor concentración de sales en las diluciones, lo cual se vincula con la descomposición de la materia orgánica presente en los sustratos en nutrientes asimilables por los microorganismos anaerobios, entre estos nutrientes. En las tablas 01, 02, 03, 04, 06, 07, 08 y 09 se observa una conductividad eléctrica promedio al inicio y final del tratamiento anaerobio en estiércol bovino de 5,05 mS/cm y 9,85 mS/cm y en forraje seco 10,87 mS/cm y 11,18 mS/cm respectivamente, comparado con la investigación realizada por la referencia [32] donde la conductividad eléctrica promedio de inicial y final de tratamiento anaerobio fue de 11,72 mS/cm y 14,76 mS/cm respectivamente, pudiendo atribuir que la conductividad aumentó debido a la descomposición de la materia orgánica.

Acondicionamiento del sustrato, inóculo fermentativo y dilución

El acondicionamiento en el presente estudio fue realizado según los diagramas de flujo descritos por las figuras 01, 02, 03 y 04, comparados con los estudios realizados por [29] y [19] la proporción de la dilución, el inóculo fermentativo, la proporción de sustrato y las condiciones del tratamiento anaerobio fueron similares, debido a que se utilizaron residuos orgánicos del mismo tipo que se describe en la producción de biogás realizada.

Concentración de metano

En la tabla 15 se observa que la concentración de metano promedio en el biogás producido por estiércol bovino es de 59,67% y 50,33% en diluciones de 1:4 y 1:5 respectivamente, así mismo en las tablas 12 y 13 la concentración de metano promedio en el biogás producido por forraje seco fue de 15,67% y 19%. Siendo el porcentaje de metano obtenido con estiércol bovino ligeramente menor al que obtuvieron en la referencia [1] donde el promedio de metano obtenido fue de 60%.

Producción de biogás

En la tabla 15 se observa que la producción de biogás promedio estimada en 30 días de tratamiento por estiércol bovino es de 1013 mL/L y 1501 mL/L en diluciones de 1:4 y 1:5 respectivamente, el biogás producido en la dilución 1:5 es cercano al obtenido en la investigación realizada por [19] que produjo 1723,68 mL/L, así mismo, se observó que en el mismo periodo de tiempo el forraje seco obtuvo en las diluciones 1:4 y 1:5 una producción de biogás estimada promedio de 2533,85 mL/L y 2809,64 mL/L. Este resultado es similar comparado con la investigación realizada por [29] donde la producción de biogás promedio en 30 días de

tratamiento fue aproximadamente de 2600 mL/L. En ambos casos, la variación de producción de biogás es atribuida por la diferencia en la composición del sustrato, proporción de la dilución, condiciones de tratamiento anaerobio, concentración de sólidos totales y DQO inicial en el presente estudio.

Limitaciones del estudio

En el presente estudio no se contempló la posibilidad de una codigestión con los sustratos utilizados, ni se llevó a cabo una estimación del potencial financiero del biogás generado. Además, no se realizaron mediciones diarias de la producción de biogás en los biorreactores y tampoco se consideró la implementación de un proceso de depuración del biogás producido por estos sistemas.

Recomendaciones

Se recomienda implementar un pretratamiento específico para cada sustrato, considerando que cada residuo posee características, cualidades y composición únicas. Es fundamental mantener los biorreactores en agitación constante para asegurar una distribución homogénea de los nutrientes en la dilución. En el caso del estiércol bovino se sugiere priorizar el uso de estiércol fresco ya que contiene una mayor carga bacteriana. Además, al realizar el pretratamiento del forraje seco, es crucial regular el pH a 7 para evitar la inhibición de los microorganismos presentes en el inóculo bacteriano. Para maximizar la producción de metano se recomienda realizar diluciones con estiércol y forraje seco en una proporción de 1:5. Finalmente, se aconseja aplicar un postratamiento al biogás producido para depurar el metano de otros gases no volátiles lo que permitirá aprovechar el biogás con mayor eficacia.

4. CONCLUSIONES

Se encontraron valores de sólidos totales, sólidos volátiles, DQO, sales, pH y conductividad en los biorreactores antes y después del tratamiento anaerobio, observándose una disminución significativa de sólidos volátiles del 40,38% en estiércol bovino y del 31,52% en forraje seco así como una reducción de la DQO del 50,43% en estiércol bovino y del 50,63% en forraje seco. Ambos sustratos fueron acondicionados en proporciones de 1:4 y 1:5 aplicando pretratamientos específicos para cada uno y utilizando el mismo inóculo fermentativo. Se calculó el rendimiento de biogás, midiendo la producción de metano en los biorreactores, con un promedio de 678 mL/L para estiércol bovino y 465 mL/L para forraje seco. Mediante la prueba T se comparó la producción de metano entre ambos sustratos identificándose una diferencia significativa con un incremento del 45,76% en la producción de metano a partir de estiércol bovino en comparación con el forraje seco.

REFERENCES

- [1] Abbas, Y., Yun, S., Mehmood, A., Shah, F. A., Wang, K., Eldin, E. T., Al-Qahtani, W. H., Ali, S., & Bocchetta, P. (2023). Co-digestion of cow manure and food waste for biogas enhancement and nutrients revival in bio-circular economy. *Chemosphere*, 311, 137018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137018>
- [2] Abellán Álvaro, F. J. (2022). *Estudio de viabilidad sobre la implementación de digestores para generación de biogás mediante residuos agropecuarios en la organización indígena Casaiches Inti Churi, cantón Guaranda, provincia Bolívar, Ecuador* [Tesis de grado, Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/182001>
- [3] American Public Health Association (APHA). (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- [4] Linares Carrión, A. R. (2022). *Estudio de factibilidad para la implementación de un biodigestor y la producción de biogás en la base aeronaval del Callao* [Tesis de licenciatura, Universidad de Piura]. <https://hdl.handle.net/11042/5775>
- [5] Ariza Calvo, D., Rincón Ravelo, M., Paz Cadavid, C. A., & Gutiérrez-Montero, D. J. (2019). Evaluación de producción de biogás y reducción de carga orgánica de vinazas mediante digestión anaerobia. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(2), 118–130. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n2.79555>
- [6] Barreda-Del-Carpio, J. E., Ancco Mamani, M. R., Núñez Chambi, A. D., Aguirre, C. E., Tejada Meza, K., & Pacheco Pacheco, G. M. (2022). Co-digestión de tres tipos de estiércol (vaca, cuy y cerdo) para obtener biogás en el sur del Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(3), 174–181. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.457>
- [7] Barrera Gurbillón, M. A., Cubas Alarcón, F., Gosgot Angeles, W., Ordinola Ramírez, C. M., Rascón Barrios, J., & Huanes Mariños, M. (2019). Sistema de producción de biogás y bioabonos a partir del estiércol de bovino, Molinopampa, Chachapoyas, Amazonas, Perú. *Arnaldoa*, 26(2), 725–734. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.262.26214>
- [8] Cabos, J. (2017). *Diseño e implementación de una planta piloto modelo para la producción de biogás y bioabonos a partir de excretas de vacuno. Trujillo - La Libertad, 2016* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo].
- [9] Castañeda, L. (2019). *Potencial de producción de biogás mediante co-digestión anaerobia de lactosuero residual y excretas bovinas en Perú* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo].
- [10] Catherine, C., & Twizerimana, M. (2022). Biogas production from thermochemically pretreated sweet potato root waste. *Heliyon*, 8(9), e10376. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10376>
- [11] Díaz Vento, I., Ancco, M., Peña Dávila, G., Ancco-Loza, R., Dávila Del-Carpio, G., & Jiménez Pacheco, H. G. (2022). Efectos del biocarbón obtenido a partir de residuos agrícolas de uva en la generación de biogás. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(4), 278–288. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.423>
- [12] Espino-García, J. J., Almaraz-Buendía, I., Peralta-Ortiz, J. J. G., Reyes-Munguía, A., Hernández-Soto, I., González-Montiel, L., & Campos-Montiel, R. G. (2023). Efecto de xonoostle (*Opuntia matudae* Scheinvar) sobre la concentración de metano y las variables ruminales durante una fermentación *in vitro* de rastrojo de maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 14(2), 309–325. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v14i2.6093>
- [13] Evidente, R. C., & Almendrala, M. C. (2022). Anaerobic co-digestion of pre-treated press mud and molasses-based distillery wastewater enhanced biogas production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 997(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/997/1/012020>
- [14] Garkoti, P., & Thengane, S. K. (2024). Feasibility analysis of circular economy-based biogas plants for Indian cattle shelters. *Biomass and Bioenergy*, 186, 107259. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107259>
- [15] Grillet, S. C., Rodríguez, A. A., Pérez, S. R., & Pompa, N. P. (2016). Evaluación del tratamiento anaerobio de las aguas residuales de una comunidad universitaria. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(1), 49–56. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.57715>
- [16] Hernández, R., & Fernández, C. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw Hill Education.

- [17] Ivanchenko, A., & Yelatontsev, D. (2024). Improved agro-industrial waste utilization in biogas and fertilizer production ensuring CO₂ sequestration. *Environmental Challenges*, 14, 100836. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100836>
- [18] Jameel, M. K., Mustafa, M. A., Ahmed, H. S., Mohammed, A. J., Ghazy, H., Shakir, M. N., Lawas, A. M., Mohammed, S. K., Idan, A. H., Mahmoud, Z. H., Sayadi, H., & Kianfar, E. (2024). Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. *Results in Chemistry*, 7, 101549. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101549>
- [19] Leite, S. A. F., Leite, B. S., Ferreira, D. J. O., Baêta, B. E. L., & Dangelo, J. V. H. (2023). The effects of agitation in anaerobic bioreactors operating with substrates from swine manure and rice husk. *Chemical Engineering Journal*, 451, 138533. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138533>
- [20] Madrigal, G., Huaraya, M., Sancho, T., Mendieta, O., & Jaimes-Estévez, J. (2022). Biochar from bovine manure as a sustainable additive to improve the anaerobic digestion of cheese whey. *Bioresource Technology Reports*, 18, 101258. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101258>
- [21] Mrosso, R., Mecha, A. C., & Kiplagat, J. (2024). Performance evaluation of calcined eggshell waste (sorbent) for biogas upgrading: Adsorption isotherms, adsorption kinetics, and fixed bed studies. *Environmental Challenges*, 100961. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100961>
- [22] Muñoz, M. (2018). *Producción de biogás a partir de biomasa residual pecuaria enriquecida con subproductos agrícolas biocatalizadores* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo].
- [23] Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de aguas residuales*. Editorial Reverté S.A.
- [24] Rodríguez (2023). *Constantes cinéticas de crecimiento y balance de masa de DQO de un reactor anaerobio*. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/139139>
- [25] Solís, H., Zelada, A. M. O., Aro, E. F. H., & Escarcena, L. I. G. (2023). Producción de biofertilizante en biorreactor con cúpula flotante a partir de guano de la isla Guañape. *Religación Press*. <https://doi.org/10.46652/religacionpress.105>
- [26] Scherzinger, M., Kaltschmitt, M., & Elbanhaw, A. Y. (2022). Evidence of anaerobic biogas formation from crops' agricultural residues – Modeling investigations. *Bioresource Technology*, 359, 127497. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127497>
- [27] Sohail, M., Khan, A., Badshah, M., Degen, A., Yang, G., Liu, H., Zhou, J., & Long, R. (2022). Yak rumen fluid inoculum increases biogas production from sheep manure substrate. *Bioresource Technology*, 362, 127801. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127801>
- [28] Soluciones Químicas Ambientales S.A.C. (2021). *Demanda química de oxígeno*. SQA.
- [29] Sumardiono, S., Jos, B., Dewanti, A. A. E., Mahendra, I., & Cahyono, H. (2021). Biogas production from coffee pulp and chicken feathers using liquid- and solid-state anaerobic digestions. *Energies*, 14(15), 4664. <https://doi.org/10.3390/en14154664>
- [30] Tito Ccama, J. C. (2023). *Control de los parámetros del proceso de codigestión anaerobia de suero lácteo y excreta bovina en la generación de biogás* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/140637>
- [31] Van Tran, G., Ramaraj, R., Balakrishnan, D., Kumar Nadda, A., & Unpaprom, Y. (2022). Simultaneous carbon dioxide reduction and methane generation in biogas for rural household use via anaerobic digestion of wetland grass with cow dung. *Fuel*, 317, 123487. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123487>
- [32] Yildiz. (2021). *Generación de biogás y biol con mezcla del suero salado de queserías y estiércol de cuy en Canta - Perú* [Tesis, Universidad Científica del Sur]. <https://doi.org/10.21142/tl.2021.1949>
- [33] Wang, Y. C., Jia Yu, G., & Ni, J. J. (2023). Influence of biochar on soil air permeability and greenhouse gas emissions in vegetated soil: A review. *Biogeotechnics*, 100040. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100040>