

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



**DILUCIÓN DEL ESTIÉRCOL DE PORCINO (*Sus scrofa domesticus*) EN LA
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A NIVEL DE LABORATORIO.**

Tesis

Para optar el grado de:

INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

GAMARRA OMONTE KETLY MAGALY

Tingo María – Perú

2025



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°007-2026-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 19 de diciembre de 2025, a horas 10:00 a.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“DILUCIÓN DEL ESTIÉRCOL DE PORCINO (*Sus scrofa domesticus*) EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A NIVEL DE LABORATORIO”

Presentado por la Bachiller: **GAMARRA OMONTE, KETLY MAGALY** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “**MUY BUENA**”.

En consecuencia, la sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 27 de enero de 2026

Mchlgo. MSc. **LUIS ALBERTO SANCHEZ ROMERO**
PRESIDENTE

Ing. MSc. **ABBY SOLANGE DA CRUZ RODRIGUEZ**
MIEMBRO



Ing. MSc. **PATRICIA PILAR ROMERO USHUÑAHUA**
MIEMBRO

Ing. MSc. **FRANKLIN DIONISIO MONTALVO**
ASESOR

Ing. MSc. **SANDRA LORENA ZAVALA GUERRERO**
ASESOR



UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 053 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis

X

Trabajo de Suficiencia Profesional

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
DILUCIÓN DEL ESTIÉRCOL DE PORCINO (<i>Sus scrofa domesticus</i>) EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A NIVEL DE LABORATORIO	GAMARRA OMONTE KETLY MAGALY	08 % Ocho	Menor a 20 %

Tingo María, 17 de febrero de 2026.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO


ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



**DILUCIÓN DEL ESTIÉRCOL DE PORCINO (*Sus scrofa domesticus*) EN LA
PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A NIVEL DE LABORATORIO.**

Autor	: Ketly Magaly Gamarra Omonte
Asesor	: Ing. M.Sc. Franklin Dionisio Montalvo
Asesora	: Ing. M.Sc. Sandra Lorena Zavala Guerrero
Área de investigación	: Ciencia y tecnologías ambientales - PIBIOT
Grupo de investigación	: Ciencia y tecnologías ambientales
Línea de investigación	: Tecnologías para reducir la contaminación
Lugar de ejecución	: Laboratorio de Calidad del Agua
Duración del trabajo	: 6 meses
Financiamiento	: S/. 4721.76
FEDU	: No
Propio	: Si
Otros	: No

Tingo María – Perú

2025

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en los momentos difíciles, por su amor infinito y por iluminar siempre mi camino, por escuchar mis oraciones y brindarme la serenidad que necesito para avanzar. Gracias por sostenerme cuando las dudas aparecían, por renovar mi esperanza cada día y por recordarme que ningún esfuerzo es en vano cuando se camina con fe.

A mi papá Pablo Gamarra y a mi mamá Erlinda Omonte, por su apoyo incondicional, por estar siempre conmigo en los momentos más difíciles y por darme los ánimos para seguir adelante.

A mis hermanos Iglér, Lizet, Paola y Edrick, que son mi mayor motivación para continuar y esforzarme cada día más.

A mi abuela Mercedes Guerra, mi querida mamita, que siempre me engríe, me anima y me demuestra su cariño inmenso.

A mi tío Alex Guerra, quien confió en mí desde pequeña y me brindó su apoyo constante.

A mi mejor amiga, Génesis Bartolomé, mi gran compañera, quien siempre está conmigo en las buenas y en las malas.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada paso de mi vida, por brindarme sabiduría, salud y perseverancia para culminar esta etapa tan importante.

A mis padres, por su amor incondicional, comprensión y sacrificio. Por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo, la humildad y la constancia. Este logro también les pertenece, porque sin su apoyo nada de esto habría sido posible

A mi alma máter, la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por haberme formado profesionalmente y brindarme las herramientas necesarias para desarrollarme con responsabilidad, compromiso y amor por mi carrera.

A mis asesores, el Ing. M.Sc. Franklin Dionisio Montalvo y la Ing. M.Sc. Sandra Lorena Zavala Guerrero, por su orientación, paciencia y por compartir sus conocimientos con generosidad. Sus aportes fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de esta investigación.

A mis jurados, Mtblgo. Luis Alberto Sanchez Romero, Ing. M.Sc. Abby Solange Da Cruz Rodrigues y Ing. M.Sc. Patricia Pilar Romero Ushuñahua por su tiempo, dedicación y valiosas observaciones, las cuales contribuyeron significativamente al perfeccionamiento de esta investigación.

Al Dr. José Luis Paredes Salazar, por brindarme un espacio en el Laboratorio de Calidad de Agua y por su valiosa guía profesional.

Al Ing. Gilmer Milton Neira Trujillo, por permitir el uso de su Laboratorio de Suelos, Agua y Ecotoxicología, mostrando siempre amabilidad, disposición y colaboración en el desarrollo de mis análisis experimentales.

A mis tías Marlene Gamarra y Yeni Gamarra, por sus sabios consejos y constante apoyo.

A mis primos Miguel Troncos Gamarra y Luz Troncos Gamarra, por su cariño, ánimo y compañía en cada etapa.

Y a mi sobrino Roy Silva Durand, por ser como un hermano más para mí y estar siempre presente cuando más lo necesité.

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Antecedentes.....	3
2.1.1. Internacionales.....	3
2.1.2. Nacionales	5
2.2. Marco teórico.....	6
2.2.1. Utilidad de los residuos como materia prima	6
2.2.2. Porcino (<i>Sus scrofa domesticus</i>).....	7
2.2.3. Estiércol de porcino	7
2.2.4. Digestión anaerobia	8
2.2.5. Factores de afectan la digestión anaerobia	10
2.2.6. Biogás.....	13
2.3. Marco conceptual.....	16
2.3.1. Biodigestor	16
2.3.2. Gasómetro.....	16
III. MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.1. Lugar de ejecución.....	17
3.1.1. Ubicación política.....	17
3.1.2. Ubicación geográfica.....	17
3.1.3. Característica generale de la zona	18
3.2. Materiales y equipos	18
3.2.1. Materiales de campo.....	18
3.2.2. Materiales de Laboratorio.....	18

3.2.3. Equipos de Laboratorio	19
3.2.4. Reactivos	19
3.2.5. Materiales para el equipo.....	19
3.2.6. Software.....	19
3.3. Criterio y análisis del estudio.....	19
3.3.1. Nivel de investigación	19
3.3.2. Tipo de investigación	19
3.3.3. Método de investigación.....	20
3.3.4. Operacionalización de variables.....	20
3.3.5. Diseño de investigación.....	21
3.3.6. Población y muestra	22
3.3.7. Técnicas de recolección de datos.....	22
3.4. Metodología.....	23
3.4.1. Análisis de la variación de los parámetros fisicoquímicos del estiércol de porcino (<i>Sus scrofa domesticus</i>).	23
3.4.2. Determinación del periodo de producción de biogás a partir de la dilución del estiércol de porcino (<i>Sus scrofa domesticus</i>) a nivel de laboratorio.....	28
3.4.3. Determinación de la proporción óptima de dilución del estiércol de porcino (<i>Sus scrofa domesticus</i>) en la producción de biogás a nivel laboratorio.....	30
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	35
4.1. Análisis de la variación de los parámetros fisicoquímicos del estiércol de porcino (<i>Sus scrofa domesticus</i>).	35
4.2. Determinación del periodo de producción de biogás a partir de la dilución del estiércol de porcino (<i>Sus scrofa domesticus</i>) a nivel de laboratorio.	43
4.3. Determinación de la proporción óptima de dilución del estiércol de porcino (<i>Sus scrofa domesticus</i>) en la producción de biogás a nivel de laboratorio.....	44
4.3.1. Testigo 1	44
4.3.2. Testigo 2	45

4.3.3. Dilución 1	46
4.3.4. Dilución 2	47
4.3.5. Dilución 3	48
4.3.6. Comparación de volúmenes de biogás y metano.....	50
4.3.7. Tasa de rendimiento del biogás y metano	51
4.4. Análisis estadístico	52
V. CONCLUSIONES.....	54
VI. PROPUESTAS A FUTURO	55
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
VIII. ANEXOS	64

ÍNDICE DE TABLA

Tabla	Página
1. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica.....	13
2. Composición de biogás	14
3. Coordenadas UTM de ubicación.....	17
4. Operacionalización de variables.....	20
5. Distribución del estiércol de porcino utilizado según su tamaño y la cantidad requerida.....	22
6. Valor de relación de estiércol de porcino y agua	28
7. Muestras evaluadas	28
8. Análisis fisicoquímicos del estiércol de porcino.....	35
9. Volumen total de biogás y composición porcentual de gases en el testigo 2.....	45
10. Volumen total de biogás y composición porcentual de gases en la dilución 1 (1:2).....	46
11. Volumen total de biogás y composición porcentual de gases en la dilución 2 (1:3).....	47
12. Volumen total de biogás y composición porcentual de gases en la dilución 3 (1:4).....	49
13. Comparación de los volúmenes de biogás y metano en el testigo y las diluciones.....	50
14. Tasa de rendimiento de biogás y metano en el testigo y diluciones.....	51
15. Análisis de Varianza (ANOVA)	52
16. Prueba de Tukey.....	52
17. Datos registrados diariamente de la producción de biogás.	64
18. Porcentaje de metano (CH ₄) en el testigo y las diluciones del estiércol de porcino.....	68
19. Porcentaje de dióxido de carbono (CO ₂) en el testigo y las diluciones.....	68
20. Porcentaje de sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) en el testigo y las diluciones.....	68
21. Porcentaje final del biogás (CH ₄ , CO ₂ y H ₂ S) en el testigo y las diluciones.....	68
22. Análisis de varianza (ANOVA) para la producción de biogás a los 15 días.....	69
23. Prueba de Tukey para la producción de biogás a los 15 días.....	69
24. ANálisis de varianza (ANOVA) para la producción de biogás a los 30 días.....	69
25. Prueba de Tukey para la producción de biogás a los 30 días.....	69
26. Análisis de varianza (ANOVA) para la producción de biogás a los 45 días.....	69
27. Prueba de Tukey para la producción de biogás a los 45 días.....	70
28. Análisis de varianza (ANOVA) final a los 56 días.....	70
29. Producción final acumulada de biogás y prueba de Tukey a los 56 días.....	70

ÍNDICE DE FIGURA

Figura	Página
1. Alternativas de uso del biogás.....	15
2. Ubicación del Laboratorio de Calidad del agua, laboratorio de Suelo, Agua y Ecotoxicología y la granja de Zootecnia.....	18
3. Flujograma de investigación.....	21
4. Flujograma de investigación.....	21
5. Equipo experimental para producir y medir el volumen de biogás.....	29
6. Variación del pH en cada muestra evaluada.....	36
7. Variación del C: N en cada muestra evaluada.....	38
8. Variación de la humedad en cada muestra evaluada.....	40
9. Variación de la temperatura en cada muestra evaluada.....	41
10. Variación del NPK en cada muestra evaluada.....	42
11. Periodo de producción de biogás según las diferentes diluciones evaluadas.....	43
12. Comportamiento de la producción de biogás durante el periodo experimental en el testigo 2.....	45
13. Comportamiento de la producción de biogás durante el periodo experimental en la dilución 1 (1:2).....	46
14. Comportamiento de la producción de biogás durante el periodo experimental en la dilución 2 (1:3).....	48
15. Comportamiento de la producción de biogás durante el periodo experimental en la dilución 3 (1:4).....	49
16. Comparaciones de los volúmenes de biogás y metano en el testigo y diluciones.....	50
18. Comparación de la tasa de rendimiento del biogás y metano.....	51
19. Recolección del estiércol de porcino.....	71
20. Muestras para los análisis fisicoquímicos iniciales.....	71
21. Medición de la humedad.....	72
22. Secado de la muestra.....	72
23. Rotulación de las muestras del testigo y diluciones.....	73
24. Medición de la relación de C: N.....	73
25. Medición del potencial de hidrógeno (pH).....	74
26. Secado de las muestras en la estufa.....	74
27. Retiro de las muestras de la estufa.....	75

28. Peso final después del secado de las muestras.	75
29. Pesado del estiércol de porcino para cada dilución.	76
30. Dilución para cada relación de estiércol: agua.	76
31. Cada dilución introducida en las botellas de 3L.....	77
32. Instalación de los sistemas.....	77
33. Temperatura ambiente monitoreo.....	78
34. Verificación de la producción diaria de biogás.	78
35. Registro diario de la producción de biogás.	79
36. Medición de los gases finales con el analizador portátil de biogás.	79
37. Medición con el analizador portátil de biogás.....	80
38. Medición de los gases de la Dilución 1 (1:2).	80
39. Medición de los gases de la Dilución 2 (1:3).	81
40. Medición de los gases de la Dilución 3 (1:4).	81
41. Resultados iniciales de los análisis fisicoquímicos	83
42. M Resultados finales de los análisis fisicoquímico.....	83

RESUMEN

El presente estudio determinó el efecto de la dilución del estiércol de porcino (*Sus scrofa domestica*) en la producción de biogás a nivel de laboratorio, con el objetivo de identificar la proporción óptima para la generación energética bajo digestión anaerobia. Se trabajó con tres diluciones (1:2, 1:3 y 1:4) y dos testigos (solo estiércol y solo agua), registrando producción total, composición gaseosa y tasa de rendimiento. El análisis estadístico Análisis de Varianza y prueba de Tukey confirmó diferencias significativamente positivas entre las diluciones, demostrando que la concentración del sustrato influye directamente en el volumen de biogás y metano producido. La dilución 1:2 fue la más eficiente con 552 ml de biogás y 397.44 ml de metano (CH₄), presentando la mayor tasa de rendimiento con 17.25 ml/día de biogás y 12.42 ml/día de metano; seguida por la dilución 1:3 con 482 ml de biogás y 298.84 ml de metano (CH₄) con una tasa de 11.48 ml/día de biogás y 7.12 ml/día de metano, y finalmente la dilución 1:4 con 425 ml de biogás y 238 ml de metano (CH₄) con tasas de 7.59 ml/día de biogás y 4.25 ml/día de metano. En contraste, el testigo con estiércol sin diluir produjo solo 41 ml de biogás y 5.74 ml de metano (CH₄), con una tasa mínima de 3.14 y 1.07 ml/día, mientras que el testigo con agua no generó gas alguno. Con estos resultados, se concluye que la proporción óptima de dilución para maximizar el rendimiento bioenergético del estiércol porcino es 1:2, debido a su mayor eficiencia y velocidad de producción, constituyéndose como la alternativa más viable para biodigestores a mayor escala y sistemas de aprovechamiento sostenible de residuos pecuarios.

Palabras claves: Digestión anaerobia, biodigestor, metano, proporción óptima, tasa de rendimiento.

ABSTRAC

In the present study the effect of the dilution of porcine (*Sus scrofa domesticus*) manure in the production of biogas at a laboratory level was determined, with the objective of identifying the optimal proportion for the generation of energy through anaerobic digestion. Three dilutions (1:2, 1:3 and 1:4) were used with two controls (just manure and just water); the total production, gas composition and yield rate were recorded. The variance analysis statistical analysis and the Tukey test confirmed that there were significant positive differences between the dilutions, demonstrating that the concentration of the substrate directly influenced the volume of the biogas and methane that were produced. The 1:2 dilution was the most efficient with 552 ml of biogas and 397.44 ml of methane (CH₄), presenting the greatest yield rate at 17.25 ml/day of biogas and 12.42 ml/day of methane; followed by the 1:3 [dilution] with 482 ml of biogas and 298.84 ml of methane (CH₄) at a rate of 11.48 ml/day of biogas and 7.12 ml/day of methane; and finally, the 1:4 with 425 ml of biogas and 238 ml of methane (CH₄) with rates of 7.59 ml/day of biogas and 4.25 ml/day of methane. In comparison, the control with undiluted manure produced only 41 ml of biogas and 5.74 ml of methane (CH₄), with a minimal rate of 3.14 and 1.07 ml/day, while the control with water did not generate any gas. With these results it was concluded that the optimal dilution proportion, in order to maximize the bioenergy yield of the porcine manure, was 1:2, due to its greater efficiency and production velocity, making it a more viable alternative for biodigesters on a large scale and for sustainable systems that make use of livestock waste.

Keywords: anaerobic digestion, biodigester, methane, optimal proportion, yield rate.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la actividad pecuaria ha crecido de manera acelerada y esto ha incrementado la generación de grandes volúmenes de estiércol, especialmente en la industria porcina, lo que representa un riesgo ambiental cuando no se maneja de forma adecuada, ya que afecta la calidad del agua, del suelo y además libera metano (CH_4) que contribuye al cambio climático por lo que la digestión anaerobia se ha consolidado como una alternativa eficiente al permitir la transformación del estiércol en biogás como fuente de energía renovable, una práctica que países como Alemania, Dinamarca y China han adoptado mediante tecnologías avanzadas de biodigestión que les ha permitido disminuir los impactos ambientales y generar beneficios energético y económicos dentro de sus sistemas productivos.

El sector pecuario es una actividad clave en la economía del Perú y la producción porcina ha mostrado un crecimiento importante en los últimos años, pero la gestión de los residuos que genera sigue siendo un desafío, porque en muchos casos el estiércol se acumula en espacios abiertos y esto ocasiona contaminación debido a los malos olores, la proliferación de patógenos y la movilización de nutrientes hacia las fuentes de agua, por lo que el aprovechamiento de estos residuos mediante digestión anaerobia viene ha sido promovido por diversas instituciones como una estrategia que contribuye los impactos ambientales y a impulsar el uso de energías renovables.

El departamento de Huánuco presentó una creciente actividad pecuaria, con un número significativo de criaderos de porcinos destinados tanto al autoconsumo como a la comercialización. No obstante, el manejo inadecuado del estiércol ha generado problemas ambientales, entre ellos la alteración de los recursos hídricos y el aumento de organismos que actúan como transmisores de enfermedades, a pesar de estos desafíos, la disponibilidad de materia orgánica y las condiciones climáticas favorables en la región hacen viable la implementación de biodigestores para transformar estos residuos en biogás, reduciendo su impacto ambiental y generando beneficios energéticos y agrícolas.

La granja de zootecnia de la Universidad Nacional Agraria de la Selva fue empleada como fuente de obtención del estiércol de porcino utilizado en esta investigación. Este residuo, que actualmente no recibe un aprovechamiento adecuado, constituye una oportunidad importante para su valorización mediante digestión anaeróbica, permitiendo la generación de biogás como recurso energético sostenible. No obstante, la limitada evaluación de alternativas

que optimicen el rendimiento de este proceso dificulta su incorporación en modelos de producción sostenibles y en estrategias de economía circular dentro de la región. En este sentido, resulta fundamental determinar cuál de las diluciones entre estiércol y agua presenta un desempeño superior, considerando que la proporción del sustrato influye directamente en la eficiencia de la producción de biogás. Por ello, el presente estudio analiza diferentes diluciones del estiércol de porcino a nivel de laboratorio, con el fin de identificar la mezcla más eficiente y viable para su aplicación en futuros sistemas de biodigestión a mayor escala.

La justificación del presente estudio se basó en la necesidad de determinar el efecto de la dilución del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*) en la producción de biogás a nivel de laboratorio, utilizando como muestra los residuos generados en la granja de zootecnia. Esta investigación permitió optimizar el uso de un recurso orgánico abundante, mejorar las prácticas de manejo de residuos en la institución y generar información técnica que pueda ser aplicada en sistemas de mayor escala. Asimismo, buscó fomentar el uso de tecnologías limpias, contribuir a la reducción de impactos ambientales y promover estrategias replicables para una gestión eficiente y sostenible de los residuos pecuarios.

El presente estudio planteó la siguiente interrogante: ¿Qué efecto produce la dilución del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*) en la producción de biogás a nivel de laboratorio?, como hipótesis, se plantea que la dilución del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*) produce efectos significativamente positivos en la producción de biogás a nivel de laboratorio.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la dilución del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*) en la producción de biogás a nivel de laboratorio.

1.1.2. Objetivos específicos

- Analizar la variación de los parámetros fisicoquímicos del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*).
- Determinar el periodo de producción de biogás a partir de la dilución del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*) a nivel de laboratorio.
- Determinar la proporción óptima de dilución del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*) en la producción de biogás a nivel de laboratorio

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Según N'guessan et al. (2025), se realizó un estudio enfocado en optimizar la producción de biogás y la reducción de patógenos presentes en estiércol porcino mediante la digestión anaerobia en biodigestores de 1600 L, alimentados con una mezcla diluida en proporción 1:4 (estiércol: agua) y operados durante 56 días bajo condiciones mesofílicas y con pH entre 6.9 y 7.3. Durante la investigación se obtuvo una producción de 22.63 m³ y 16.31 m³ de biogás según la fuente del estiércol. Posteriormente, la aplicación de un biofiltro aumentó la concentración de metano hasta 80–82 %, demostrando que la digestión anaerobia con dilución 1:4 constituye una alternativa eficiente para generar biogás y mejorar la calidad sanitaria del sustrato.

Según Mosquera et al. (2024), se llevó a cabo una investigación orientada a evaluar la producción de biogás a partir de estiércol porcino utilizando un reactor anaerobio tipo UASB operado de forma continua durante aproximadamente 360 días, empleando estiércol proveniente de una granja porcina de 200 cerdas y preparado con una dilución 1:4 de estiércol y agua. Durante el proceso, el pH se mantuvo dentro del rango óptimo para la digestión anaerobia (6.8–7.4) y se garantizó una temperatura mesofílica estable, condiciones adecuadas para la actividad microbiana. Los resultados mostraron una remoción de DQO del 87.40 %, un rendimiento de 507 mL CH₄/g VS⁻¹ con un tiempo de retención de 19 días y una composición del biogás conformada por 67.7 % de metano, 18.1 % de dióxido de carbono y alrededor de 1413 ppm de H₂S, demostrando que el uso de un reactor UASB bajo condiciones controladas permite obtener altos niveles de eficiencia en la producción de biogás a partir de estiércol porcino.

Fan et al. (2023), en su investigación realizaron análisis fisicoquímicos del estiércol de porcino y establecieron que la humedad inicial del estiércol fresco recién recolectado debe mantenerse dentro de un rango de 65 % a 70 %, obteniendo en su estudio un valor de 68.5%. Aunque este nivel de humedad es característico del estiércol de porcino fresco, los autores señalan que es necesario diluirlo con agua para garantizar una digestión anaerobia adecuada y favorecer así la producción de biogás.

Ignatowicz et al. (2023), menciona que cómo distintos sustratos influyen en la producción de biogás y destaca que, en el caso del estiércol de porcino, su eficiencia depende principalmente de su composición química, caracterizada por una alta humedad, una relación C/N relativamente baja y una degradabilidad moderada. Los autores señalan que este tipo de estiércol, aunque apto para la digestión anaerobia, requiere un manejo adecuado como la dilución o la mezcla con otros residuos más ricos en carbono para evitar inhibiciones y mejorar la producción de metano. Asimismo, enfatizan que la preparación del sustrato, incluida su homogenización y la aplicación de pretratamientos sencillos, incrementa su digestibilidad y optimiza el rendimiento energético. Concluyen que el estiércol porcino puede ser un sustrato eficiente para la producción de biogás, siempre que se acondicione apropiadamente dentro del sistema de biodigestión.

Vanegas et al. (2022) evaluaron la digestión anaerobia de estiércol de cerdo a escala piloto utilizando un pretratamiento térmico y realizaron un monitoreo detallado de la estabilidad del proceso. En su estudio, los autores señalaron que el pH inicial del estiércol debe mantenerse dentro entre 6.7 a 7.4, rango que consideraron óptimo para el desarrollo de los microorganismos metanogénicos y para garantizar una producción de metano estable, bajo estas condiciones.

Castro et al. (2020) desarrollaron un estudio en Colombia con el objetivo de evaluar la digestión anaerobia de estiércoles bovino, porcino y equino para optimizar el potencial energético en biodigestores domésticos, empleando diferentes mezclas y diluciones de estiércol y agua para mejorar la fluidez del sustrato y evitar problemas operativos. Para el estiércol porcino, su modelo experimental identificó que la proporción más adecuada fue 1:3 (estiércol: agua), alcanzando una producción de biogás durante 40 días bajo condiciones mesófilas, con un rendimiento aproximado de 12.2 ml/día donde el biogás total al finalizar el periodo de producción fue de 488 ml de las cuales la producción de metano fue 64% y el resto dióxido de carbono y otros gases. Los autores señalan que, aunque no se reportan parámetros fisicoquímicos específicos para cada dilución, el estiércol de porcino utilizado presentó condiciones iniciales típicas dentro de los rangos considerados óptimos para iniciar la digestión anaerobia en sistemas de pequeña escala, incluyendo pH entre 6.5 y 7.0, relación C/N entre 18:1 y 25:1 y humedad superior al 65 %. Esta adecuación permitió sostener la actividad microbiana y favorecer el proceso digestivo.

Duan et al. (2020), en su estudio titulado *Anaerobic digestion of pig manure: balancing carbon and nitrogen for optimal methane production*, la relación carbono/nitrógeno (C/N) es un parámetro fundamental para garantizar un proceso eficiente de digestión anaerobia del estiércol porcino. Los autores señalan que el rango óptimo de C/N para maximizar la producción de biogás se encuentra entre 20:1 y 30:1, ya que dentro de estos valores los microorganismos disponen del equilibrio adecuado entre carbono como fuente de energía y nitrógeno para la síntesis celular. Asimismo, explican que relaciones C/N por debajo de este rango pueden generar acumulación de amonio e inhibición de la metanogénesis, mientras que valores excesivamente altos limitan la disponibilidad de nitrógeno y reducen la eficiencia del proceso.

2.1.2. Nacionales

Cosi (2025), desarrolló una investigación en Tacna orientada a la producción de biogás empleando estiércol de porcino como sustrato en sistemas anaerobios. Para ellos construyó un biodigestor de 19 L que operó durante 40 días bajo condiciones anaerobias, a temperatura ambiente y con una humedad controlada entre 75 % y 85 %, rango que favorece la actividad microbiana al mantener el sustrato lo suficientemente fluido para la fermentación. Se observó que la producción de biogás se incrementó de manera notable después del día 20, alcanzando un volumen aproximado de 620 L, el cual fue utilizado satisfactoriamente en la cocción de alimentos mediante un quemador adaptado, donde se concluyó que el estiércol de porcino constituye un recurso energético viable y de bajo costo, destacando que el control de la humedad del sustrato es determinante para optimizar la metanogénesis y garantizar la eficiencia del proceso, facilitando la replicabilidad de esta tecnología como alternativa al GLP en zonas rurales.

Tancara (2025), evaluó la producción de biogás empleando diferentes tipos de estiércol (cuy, pollo y cerdo) bajo condiciones ambientales, distrito de Inclán (Tacna, Perú), con énfasis en determinar el desempeño del estiércol porcino frente a otros sustratos. El estudio se desarrolló mediante un diseño completamente aleatorio con tres tratamientos y tres repeticiones en biodigestores discontinuos, utilizando una proporción de dilución 1:2 (estiércol: agua). A lo largo de 34 días de monitoreo, el tratamiento con estiércol de cerdo generó 560 ml de biogás total, de las cuales teniendo el pico más alto el día 15 con 58 ml/día, el biodigestor tuvo un volumen de 3 L. Las condiciones ambientales registradas, con una temperatura promedio de 25.7 °C y un pH entre 6.99 y 7.51, se mantuvieron dentro de los rangos óptimos para la digestión anaerobia, favoreciendo así la actividad microbiana. La producción observada

evidenció que la estabilidad del pH influyó directamente en el rendimiento del estiércol porcino, mostrando una relación positiva entre la neutralidad del medio y el volumen de biogás producido. Aunque el estiércol de pollo alcanzó el mayor rendimiento, el estiércol de cerdo demostró un comportamiento estable y adecuado para la producción de biogás, confirmando su viabilidad como sustrato en sistemas anaerobios.

Huarac & More (2022), se realizó un estudio para determinar la producción más eficiente de biogás mediante tres tratamientos de aprovechamiento del estiércol porcino en el Centro Poblado de Retes, utilizando biodigestores instalados en una azotea y monitoreando parámetros fisicoquímicos durante 42 días. Durante el proceso, la temperatura ambiental fluctuó entre 28 y 32 °C, el pH del sustrato se mantuvo dentro de un rango ligeramente neutro a ligeramente alcalino (6.8–7.5), y la humedad ambiental varió entre 70 % y 85 %, condiciones adecuadas para el desarrollo de la digestión anaerobia. Los tratamientos evaluados fueron T1 (estiércol porcino mezclado con estiércol de cuy), T2 (estiércol porcino mezclado con residuos orgánicos) y T3 (estiércol porcino mezclado con estiércol de cuy y residuos orgánicos), empleando una proporción 1:2 de materia orgánica y agua. En cuanto a los resultados, T1 generó 44.9 L de biogás (33 %), T2 produjo 37.7 L (29 %) y T3 alcanzó la mayor eficiencia con 49.6 L (38 %), demostrando que la combinación de estiércol porcino con estiércol de cuy y residuos orgánicos mejora el rendimiento del biogás.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Utilidad de los residuos como materia prima

Los residuos orgánicos pueden aprovecharse como materia prima para la producción de biogás por medio de la digestión anaerobia, proceso por el cual los microorganismos transforman la materia orgánica sin oxígeno, este mecanismo no solo contribuye a disminuir la cantidad de residuos generados, sino que además permite aprovechar su potencial energético para generar biogás, una fuente renovable de energía, entre los residuos comúnmente utilizados se encuentran estiércoles, residuos agrícolas, residuos de alimentos y desechos industriales orgánicos (Trujillo et al., 2024).

Se refiere al aprovechamiento de desechos orgánicos e inorgánicos para la producción de nuevos productos o energía, este enfoque promueve la economía circular al reducir la contaminación y mejorar la eficiencia del aprovechamiento de los recursos disponibles, en el caso de los residuos orgánicos, como el estiércol porcino, pueden convertirse en biogás o fertilizantes mediante procesos como la digestión anaeróbica, este aprovechamiento

contribuye a la sostenibilidad ambiental y a la generación de valor a partir de materiales que de otro modo serían desperdiciados (Avila & Contreras, 2024).

2.2.2. Porcino (*Sus scrofa domesticus*)

Es un mamífero ungulado perteneciente al orden Artiodactyla y a la familia Suidae. Se considera la subespecie domesticada del jabalí (*Sus scrofa*), resultado de un proceso de domesticación que inició hace miles de años, debido a su adaptabilidad alimenticia, crecimiento rápido y capacidad reproductiva, esta especie se ha convertido en uno de los animales de mayor importancia productiva para la alimentación humana (Ernholm et al., 2023).

Se caracteriza por un cuerpo denso y musculoso, patas cortas con pezuñas hendidas, hocico móvil que le permite hurgar el suelo y una piel parcialmente cubierta de cerdas, es un animal omnívoro, lo cual facilita su alimentación y manejo en sistemas de crianza, presenta alta eficiencia reproductiva, con una gestación cercana a 114 días y camadas numerosas, lo que favorece su explotación en la industria porcina para obtener carne, grasa, cuero, gelatina y otros derivados de valor económico (Nikhila et al. 2024).

2.2.3. Estiércol de porcino

Es un residuo orgánico resultante de la crianza de cerdos, compuesto por excretas, restos de alimentos y materiales de cama. Por su alto contenido de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, se utiliza con frecuencia como abono orgánico en la agricultura, ya que enriquece el suelo y favorece el desarrollo de los cultivos de forma sostenible (Padilla, 2024).

Es una fuente valiosa de materia orgánica biodegradable, lo que permite su aprovechamiento en la producción de biogás mediante digestión anaeróbica. Este proceso no solo genera energía renovable, además de contribuir a la reducción de las emisiones de gases y minimiza los impactos ambientales asociados a la acumulación de residuos pecuarios (Pegoraro et al., 2023)

2.2.3.1. Características del estiércol de porcino

Es un residuo proveniente de la actividad pecuaria, caracterizado por su elevado contenido de materia orgánica y humedad, condiciones que facilita su descomposición. Este residuo posee nutrientes importantes como nitrógeno, fósforo y potasio, lo que lo convierte en un fertilizante orgánico de uso común en la agricultura, ya que mejorar la calidad del suelo y estimula el crecimiento de cultivos. (López & Moreno, 2020)

Desde una perspectiva ambiental y energética, el estiércol de porcino es una fuente potencial de biogás cuando se somete a digestión anaeróbica. Su descomposición genera metano, una fuente de energía renovable, pero si no se gestiona adecuadamente, puede provocar impactos negativos en el suelo y en los cuerpos de agua como resultado del arrastre o filtración de nutrientes (Vazquez, 2023).

2.2.4. Digestión anaerobia

Es un proceso biológico donde los microorganismos degradan la materia orgánica sin presencia de oxígeno, lo que permite la producción de biogás, constituido principalmente por metano y dióxido de carbono, además de un residuo estabilizado llamado digestato. Este procedimiento se aplica ampliamente en el tratamiento de desechos orgánicos, permitiendo la producción de energía renovable y la reducción del impacto ambiental asociado a la acumulación de residuos (Simón, 2024).

Los microorganismos descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás (principalmente metano y dióxido de carbono) y digestato, un subproducto útil como fertilizante, este proceso es ampliamente utilizado para el tratamiento de residuos orgánicos, como estiércol animal y residuos agroindustriales, permitiendo la producción de energía renovable y la reducción de contaminación ambiental, al disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y el impacto de los desechos en suelos y cuerpos de agua (Ortega, 2024).

2.2.4.1. Hidrólisis

Es la primera etapa, donde grandes compuestos orgánicos como carbohidratos, proteínas y lípidos se descomponen en sustancias más simples, como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos. Este paso es esencial porque facilita la metabolización de estos compuestos en etapas posteriores, como la acidogénesis y metanogénesis, contribuyendo así a la producción de biogás. Sin una hidrólisis adecuada, el proceso de digestión anaerobia sería menos eficiente, ya que las moléculas complejas no podrían ser aprovechadas por los microorganismos responsables de generar biogás (Sofokleous et al., 2022).

Es un proceso químico en el que una molécula se descompone en dos o más fragmentos mediante la reacción con agua. Esta reacción es fundamental en diversos procesos biológicos, como la digestión de macromoléculas (proteínas, lípidos y carbohidratos) y la degradación de compuestos orgánicos en la digestión anaerobia. En el contexto de la

producción de biogás, la hidrólisis es la primera etapa del proceso, donde polímeros complejos se descomponen en compuestos más simples, facilitando su posterior fermentación por microorganismos (Camargo & Cobos, 2023).

2.2.4.2. Acidogénesis

Es la segunda etapa del proceso de digestión anaerobia, en la que los productos generados durante la hidrólisis (como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos) son convertidos por microorganismos en ácidos orgánicos volátiles, como el ácido acético, propiónico, butírico, y otros compuestos más simples. Además, se generan gases como dióxido de carbono (CO_2) e hidrógeno (H_2). Esta fase es crucial porque transforma los compuestos simples obtenidos en la hidrólisis en formas que pueden ser utilizados por los microorganismos metanogénicos en la siguiente etapa, la metanogénesis. La eficiencia de la acidogénesis influye directamente en la cantidad de biogás que se puede generar, ya que se producen sustratos esenciales para la producción de metano, el principal componente del biogás (Triviño et al., 2021).

Es la segunda etapa del proceso de digestión anaerobia, en la cual los compuestos simples obtenidos en la hidrólisis, como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos, son transformados por bacterias acidogénicas en ácidos orgánicos, alcoholes, hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2). Esta fase es crucial, ya que genera los precursores necesarios para la acetogénesis y la metanogénesis, etapas posteriores en la producción de biogás. Además, influye en la eficiencia del proceso, ya que el equilibrio de los productos afecta la actividad de los microorganismos involucrados (Muñoz et al., 2020).

2.2.4.3. Acetogénesis

Es la etapa fundamental de la digestión anaerobia en la cual los ácidos orgánicos, alcoholes y otros productos intermedios generados en la acidogénesis son transformados por bacterias acetogénicas en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono (CO_2), estos metabolitos constituyen sustratos esenciales para los microorganismos metanogénicos, responsables de la formación de metano y, en consecuencia de la producción de biogás (Pérez et al., 2021).

Consiste en un proceso metabólico anaerobio mediante el cual los microorganismos convierten compuestos orgánicos de cadena corta en acetato, favoreciendo el equilibrio microbiano y permitiendo el desarrollo eficiente de la metanogénesis, asimismo

desempeña un papel importante en la estabilización del pH y en la regulación de la concentración de hidrogeno, factores determinantes para el adecuado desarrollo del metanogénesis, de esta manera, un acetogénesis eficiente favorece el rendimiento de la digestión anaerobia y optimizando la producción de biogás (Reyes & Neria, 2024).

2.2.4.4. Metanogénesis

Es la última etapa del proceso de digestión anaerobia, en la cual microorganismos metanogénicos convierten los productos generados en la acetogénesis, principalmente ácido acético, hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2), en metano (CH_4) y agua (H_2O). Este proceso es llevado a cabo por arqueas metanogénicas, organismos anaerobios estrictos que desempeñan un papel clave en la producción de biogás, una fuente de energía renovable. La metanogénesis no solo es crucial para la generación de metano como biocombustible, sino que también contribuye a la reducción de la materia orgánica y la estabilización del digestato, un subproducto útil como fertilizante (Camargo et al., 2023).

Es la etapa final de la digestión anaerobia, en la que arqueas metanogénicas transforman los productos de la acidogénesis y acetogénesis, como hidrógeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2) y ácidos orgánicos, en metano (CH_4) y dióxido de carbono. Este proceso es clave para la producción de biogás, ya que el metano es su componente principal y fuente de energía. La eficiencia de la metanogénesis depende de factores como el pH, la temperatura y la disponibilidad de sustratos adecuados, asegurando una producción óptima de biogás (López, 2022).

2.2.5. Factores de afectan la digestión anaerobia

2.2.5.1. Sustrato

En la digestión anaerobia es la materia orgánica que alimenta a los microorganismos involucrados en el proceso. Está compuesto principalmente por carbohidratos, proteínas y lípidos, que se descomponen progresivamente a través de las etapas de hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La calidad y composición del sustrato influyen directamente en la eficiencia de la producción de biogás, ya que algunos materiales, como los residuos agroindustriales y estiércoles, presentan mayor biodegradabilidad y potencial energético (Córdoba et al., 2022).

Es cualquier material orgánico que sirve como fuente de nutrientes y energía para los microorganismos en procesos biológicos, como la digestión

anaerobia. En la producción de biogás, los sustratos pueden incluir estiércol, residuos agrícolas, lodos de depuradoras y restos de alimentos, los cuales son degradados por microorganismos para generar metano y otros compuestos. La composición y calidad del sustrato influyen directamente en la eficiencia del proceso, determinando la cantidad y composición del biogás producido (Mazeh, 2022).

2.2.5.2. Humedad

Es un factor fundamental en la digestión anaerobia, ya que influye directamente en la actividad microbiana y en la eficiencia del proceso. Un nivel adecuado de humedad facilita el transporte de nutrientes y la disolución de compuestos orgánicos, permitiendo que los microorganismos descompongan eficientemente la materia orgánica. En biodigestores, la humedad óptima suele estar entre el 85 % y 95 %, dependiendo del tipo de sustrato utilizado. Un exceso de humedad puede diluir los nutrientes y reducir la producción de biogás, mientras que una humedad insuficiente dificulta la actividad microbiana y ralentiza el procesamiento de los residuos orgánicos (Abubakar et al., 2023)

Es la cantidad de agua presente en un material o en el ambiente. En procesos biológicos, como la digestión anaerobia, la humedad es un factor clave, ya que influye en la actividad microbiana y en la descomposición de la materia orgánica. En el caso del estiércol de porcino, su alto contenido de humedad (75-90%) facilita su degradación y producción de biogás. Un nivel adecuado de humedad es esencial para optimizar la eficiencia del proceso y evitar condiciones que limiten la actividad de los microorganismos involucrados (Carreño, 2023).

2.2.5.3. Relación carbono-nitrógeno (C: N)

Es un parámetro importante en la digestión anaerobia, ya que influye tanto en la actividad microbiana de los microorganismos como en la eficiencia de la producción de biogás; actuando como la principal fuente de energía para los microorganismos, mientras que el nitrógeno es esencial para la síntesis de proteínas y enzimas (Meier, 2024).

Es un parámetro clave en la descomposición de materia orgánica y en procesos como la digestión anaerobia. Representa la proporción entre el carbono, fuente de energía para los microorganismos, y el nitrógeno, necesario para su crecimiento y metabolismo. Un equilibrio adecuado (generalmente entre 20:1 y 30:1) favorece la producción eficiente de biogás. Relaciones muy altas pueden ralentizar el proceso por falta de nitrógeno,

mientras que relaciones bajas pueden generar acumulación de amoníaco, afectando la actividad microbiana (Espinoza et al., 2023).

2.2.5.4. Potencial de Hidrógeno (pH)

Constituye un factor fundamental en la digestión anaerobia, debido a que afecta de manera directa la actividad y el equilibrio de los microorganismos durante todo el proceso. Este indicador mide la concentración de iones de hidrógeno (H^+) en el medio, permitiendo determinar su acidez o alcalinidad. La estabilidad del pH en el biodigestor es fundamental para optimizar el procesamiento de la materia orgánica y garantizar una producción eficiente de biogás. Un pH adecuado favorece el desarrollo de los microorganismos responsables de cada etapa del proceso, evitando condiciones extremas que puedan inhibir su actividad y comprometer la eficiencia del sistema (Acarley et al., 2020).

Es una medida que indica la acidez o alcalinidad de un medio y es un factor crucial en la digestión anaerobia. Un pH adecuado garantiza la actividad óptima de los microorganismos involucrados en la producción de biogás. Generalmente, el proceso se desarrolla mejor en un rango de 6.5 a 8.0, donde las bacterias metanogénicas son más eficientes. Valores fuera de este rango pueden inhibir la producción de metano, ya sea por acumulación de ácidos orgánicos (pH bajo) o por exceso de amoníaco (pH alto) (Vázquez, 2020).

2.2.5.5. Temperatura

Es un factor determinante en la digestión anaerobia, ya que influye en la actividad metabólica de los microorganismos. Existen tres rangos principales de temperatura en los que se desarrolla este proceso: psicrófilo (10-25 °C), mesófilo (30-40 °C) y termófilo (50-60 °C). Generalmente, el rango mesófilo es el más utilizado por su estabilidad y eficiencia en la producción de biogás. Temperaturas inadecuadas pueden ralentizar la descomposición de la materia orgánica o afectar la supervivencia de los microorganismos involucrados (Peña, 2021).

Es un factor crucial en la digestión anaerobia, ya que regula la actividad metabólica de los microorganismos responsables de la descomposición de la materia orgánica y la producción de biogás (Geney et al., 2023).

Existen distintos rangos de temperatura, tal como se presenta en la tabla 1, dentro de los cuales los microorganismos anaerobios pueden mantenerse activos. (Geney et al., 2023).

Tabla 1. Rangos de temperatura y tiempo de fermentación anaeróbica

Microorganismos anaeróbicos	Ramos de temperatura			Tiempo de fermentación
	Bajo	Óptimo	Alto	
Psicrofílica	4 - 10°C	15 - 18°C	20 - 25°C	Sobre 100 días
Mesofílica	15 - 20°C	25 - 35°C	35 - 45°C	30 - 60 días
Termofílica	25 - 45°C	50 - 60°C	75 - 80°C	10 - 15 días

Fuente: Geney et al., (2023)

2.2.5.6. Contenido de agua en la mezcla

Cuando la cantidad de agua es insuficiente, la producción de biogás será reducida, ya que los microorganismos involucrados en el proceso no podrán desarrollarse de manera óptima. La proporción de agua varía en función de la materia prima utilizada en la digestión anaerobia. Para determinar la combinación adecuada de estiércol y agua en la generación de biogás, se realizaron pruebas a pequeña escala con proporciones de 1:2, 1:3 y 1:4. En caso de emplear una mezcla de estiércol y residuos agrícolas como sustrato, la relación biomasa-agua recomendada se encuentra entre 1:2 y 1:3, asegurando así un proceso eficiente de desarrollo (Vásquez, 2023).

Es un factor clave en la digestión anaerobia, ya que influye en la biodisponibilidad de los sustratos y en la actividad microbiana. Un nivel óptimo de humedad, generalmente entre 80-90%, permite un adecuado transporte de nutrientes y favorece la producción de biogás. Un contenido de agua insuficiente puede dificultar la degradación de la materia orgánica, mientras que un exceso puede diluir los nutrientes y reducir la eficiencia del proceso (Hurtado, 2020).

2.2.6. Biogás

Es un gas combustible producido a partir de la descomposición anaerobia de materia orgánica por acción de microorganismos en ausencia de oxígeno. Está compuesto

principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), además de otros gases en menor proporción, como sulfuro de hidrógeno (H_2S) y vapor de agua (Barragán, 2024).

Es un gas renovable producido por la descomposición anaerobia de materia orgánica, compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), junto con trazas de otros gases. Se obtiene a partir de residuos agropecuarios, lodos de depuradoras y desechos orgánicos urbanos. Su principal uso es como fuente de energía para generación eléctrica, térmica o como combustible vehicular. (Martínez, 2023).

2.2.7. Características de biogás

Está compuesto principalmente por metano (CH_4) entre 50-70% y dióxido de carbono (CO_2) entre 30-40%, con pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y vapor de agua. Se genera a partir de la descomposición anaerobia de residuos orgánicos y es altamente inflamable, siendo utilizado como fuente de energía para electricidad, calefacción o combustible vehicular. Además, su producción contribuye a la reducción de residuos y emisiones de gases de efecto invernadero, promoviendo la sostenibilidad ambiental (Cadillo & Ramos, 2020).

Tabla 2. Composición de biogás

Sustancia	Proporciones (%)
Metano	50 - 80
Dióxido de carbono	20 - 50
Agua	Saturado
Nitrógeno	0 - 1
Oxígeno	0 - 1
Compuestos orgánicos	Trazas

Fuente: Lijarza (2022)

Es un producto de la digestión anaerobia que está compuesto principalmente por metano (CH_4) en un 50 % a 80 % en volumen, acompañado de dióxido de carbono (CO_2) en un 20 % a 50 %, además de pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno (H_2S). La composición del biogás determina su poder calorífico y su potencial como fuente de

energía renovable, siendo el metano el principal responsable de su valor energético. No obstante, la presencia de compuestos como sulfuro de hidrogeno puede generar efectos adversos, tales como corrosión de equipos, emisión de olores desagradables y riesgos ambientales si no se aplican procesos adecuados de tratamientos y purificación. (Lijarza, 2022).

2.2.8. Aplicación del biogás

Tiene diversas aplicaciones en el sector energético y ambiental. Se utiliza para generación de electricidad y calor en plantas industriales y residencias, sustituyendo combustibles fósiles. También puede ser purificado y convertido en biometano, apto para uso vehicular o inyección en redes de gas natural. En el ámbito agropecuario, su producción permite el tratamiento de residuos orgánicos, reduciendo la contaminación y generando fertilizantes orgánicos a partir del digestato. Su aprovechamiento contribuye a la transición hacia fuentes de energía renovables y sostenibles (Cadillo & Ramos, 2020).

Se emplea para producir calor en caleras y electricidad, así como en automóviles, sistemas de calefacción directa y para la generación de electricidad. De esta forma, se presenta como una fuente de energía sostenible, utilizándose también como alternativa al gas natural licuado o al metanol (Atienza, 2024).

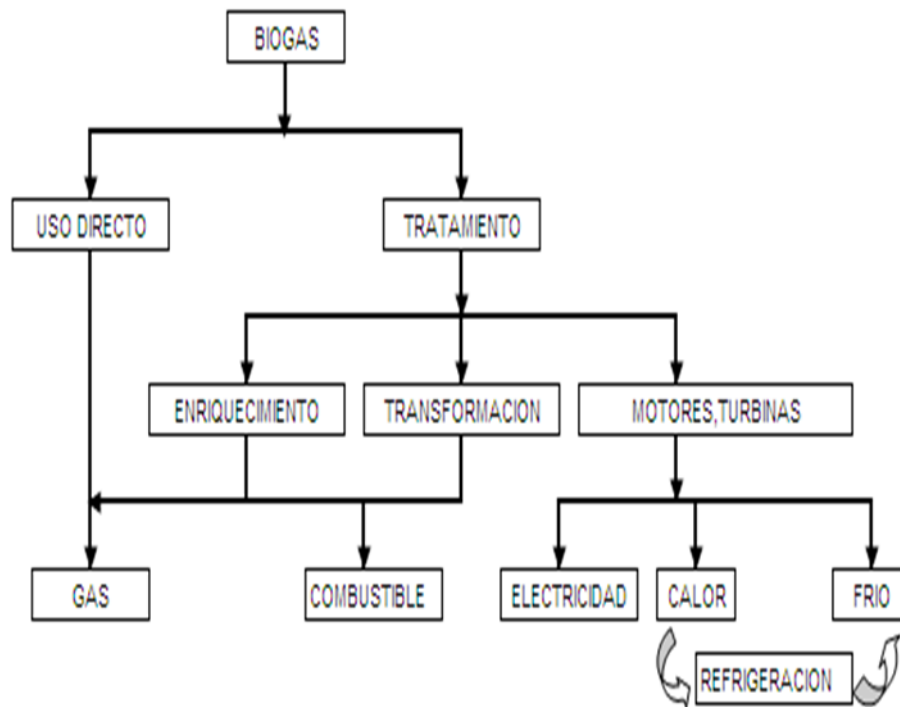


Figura 1. Alternativas de uso del biogás.

Fuente: Atienza (2024)

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Biodigestor

Es un sistema cerrado y sellado que permite la descomposición de la materia orgánica en ausencia de oxígeno mediante procesos anaerobios, donde microorganismos descomponen residuos como estiércol y desechos vegetales, generando biogás y digestato, un fertilizante orgánico (Morales, 2024).

Es un reactor biológico en el que se lleva a cabo la fermentación anaerobia de materia orgánica para producir biogás. Su eficiencia depende de factores como temperatura, pH y relación carbono-nitrógeno del sustrato (Flores, 2022).

2.3.2. Gasómetro

Es un dispositivo diseñado para medir y almacenar el biogás producido en procesos de digestión anaerobia. Funciona desplazando un líquido, generalmente agua, o utilizando cámaras flexibles que se expanden a medida que se acumula el gas. Se emplea en estudios experimentales y en sistemas industriales para evaluar la eficiencia de producción de biogás y regular su uso en aplicaciones energéticas. Su diseño puede variar desde modelos simples de laboratorio hasta estructuras más complejas utilizadas en plantas de biogás a gran escala (Acosta & Muñoz, 2020).

Es un equipo utilizado para la recolección, almacenamiento y medición del biogás generado en biodigestores. Su principio de funcionamiento se basa en la captura del gas en un compartimento hermético que permite cuantificar su volumen con precisión. Es una herramienta clave en la investigación y optimización de la producción de biogás, ya que facilita el monitoreo de la generación de metano y otros gases. Dependiendo de su diseño, puede ser portátil o formar parte de sistemas integrados de producción energética (Sanchez, 2023).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La investigación se desarrolló en la Universidad Nacional Agraria de la Selva, ubicada en la Carretera Central km 1.21, Tingo María, ejecutándose en tres áreas específicas, donde la recolección del estiércol de porcino se realizó en la granja de Zootecnia, posteriormente, los análisis fisicoquímicos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Suelo, Agua y Ecotoxicología y, por último, la producción de biogás se ejecutó en el Laboratorio de calidad del agua, Provincia Leoncio Prado, Región Huánuco.

3.1.1. Ubicación política

Ciudad: Tingo María

Distrito: Rupa Rupa

Provincia: Leoncio Prado

Región: Huánuco

3.1.2. Ubicación geográfica

El estudio se desarrolló en tres ubicaciones principales, como se describe en la tabla 3 y se ilustra en la figura 2, lo que permite identificar con claridad la ubicación donde se llevó a cabo cada parte de la investigación.

Tabla 3. Coordenadas UTM de ubicación

Ubicación	Coordenadas UTM		
	Zona	Norte	Este
Granja de Zootecnia	18L	8970459.17	390546.32
Laboratorio de Suelos, Agua y Ecotoxicología	18L	8970303.64	390561.48
Laboratorio de Calidad del Agua.	18L	8990454.00	384833.00

Fuente: Elaboración Propia

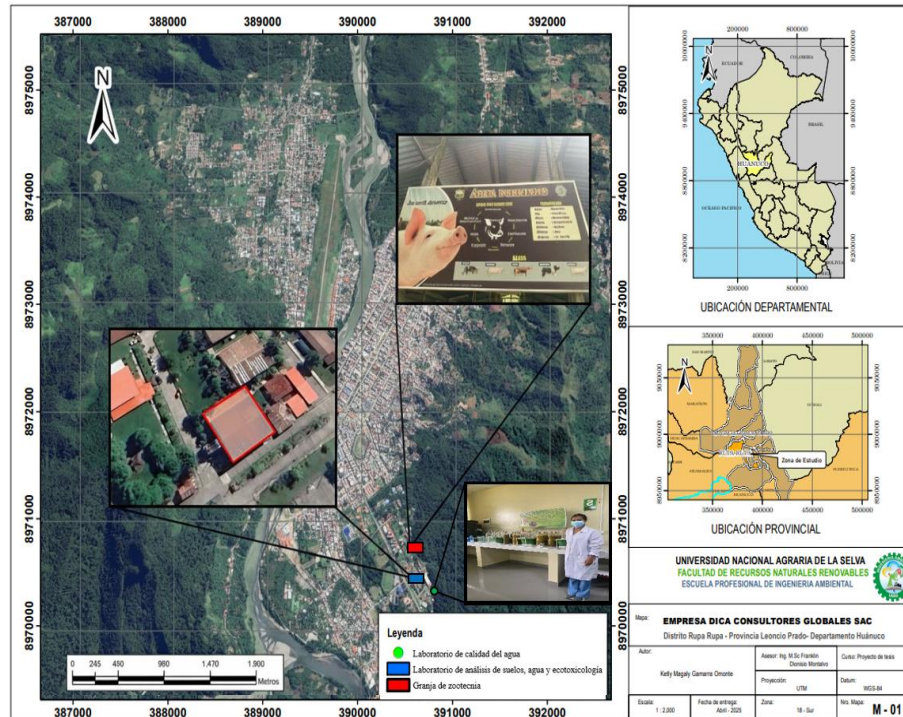


Figura 2. Ubicación del Laboratorio de Calidad del agua, laboratorio de Suelo, Agua y Ecotoxicología y la granja de Zootecnia.

Fuente: Elaboración Propia

3.1.3. Característica generale de la zona

Según el servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) (2025), las zonas donde se desarrolló la investigación, que incluyen la Granja de Zootecnia, el Laboratorio de Suelo, Agua y Ecotoxicología y el Laboratorio de Calidad del Agua de la Universidad Nacional Agraria, presenta un clima cálido y húmedo, con temperaturas que varían entre 20 y 32 °C y una humedad relativa promedio de alrededor del 86 %.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales de campo

Botas, chaleco, mascarillas descartables, guantes descartables, pala, balde, bolsas herméticas y etiquetas.

3.2.2. Materiales de Laboratorio

Balones de destilación tipo micro Kjeldahl de 100 ml, macro pipeta hasta 5 ml de capacidad, dispensador capas de dispensar hasta 10 ml, dispensador de laboratorio de 25 ml, matraz Erlenmeyer de 250 ml y 125ml, buretas para titulación Probetas de 50 ml, agitador de muestra, espátula, B-11 (rack de polietileno), pisetas, vasos Beaker de 100ml,

valorador o titulador automático, tubos de ensayo, micropipeta de 5ml, gradilla para tubos, papel filtro Whatman, guantes descartables, mascarilla y guardapolvo.

3.2.3. Equipos de Laboratorio

Se utilizaron balanza electrónica, balanza analítica, equipo de digestión micro Kjeldahl, equipo de destilación micro Kjeldahl, estufa, espectrómetro de Absorción, espectrómetro UV-Visible y multiparámetro (Milwaukee Mi 180).

3.2.4. Reactivos

Los reactivos que se utilizaron son las soluciones buffer de calibración de pH de 4.01, buffer de calibración de pH de 7.00, buffer de calibración de pH de 10.01, Sulfato de potasio, ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido bórico 2% (H_3BO_3), hidróxido de sodio 10 N (NaOH), dicromato de potasio 1N ($K_2Cr_2O_7$), y acetato de amonio 1N pH 7.

3.2.5. Materiales para el equipo

Se utilizaron botellas de plástico de 3L (15 unidades), botellas de plástico de 500ml (15 unidades), 7.5 metros de mangueras de un $\frac{1}{4}$, divididas en medio metro, 3 soportes y silicona.

3.2.6. Software

Microsoft Word 365, Microsoft Excel 365, Microsoft PowerPoint v. 2019 y Infostat.

3.3. Criterio y análisis del estudio

3.3.1. Nivel de investigación

El nivel de investigación es experimental, porque se manipuló la variable independiente (dilución del estiércol de porcino (*Sus scrofa domestica*)), midiéndose la variable dependiente (producción de biogás) y finalmente comparándose con dos testigos (agua) (estiércol) (Condori, 2020).

3.3.2. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicativo, ya que se orientó a evaluar el efecto de la dilución del estiércol de porcino (*Sus scrofa domestica*) en la producción de biogás, con el propósito de determinar la proporción óptima. Los resultados obtenidos buscan ser replicables y transferibles a contextos reales, tales como granjas agropecuarias, sistemas de

biodigestores rurales y proyectos vinculados a la producción de energía renovable (Nieto, 2020).

3.3.3. Método de investigación

El método de investigación es cuantitativo, ya que se basó en la recopilación, medición y análisis de datos numéricos relacionados con la producción de biogás, lo que permitió evaluar de manera objetiva el comportamiento del proceso y obtener resultados confiables y verificables. (Cadena et al., 2020).

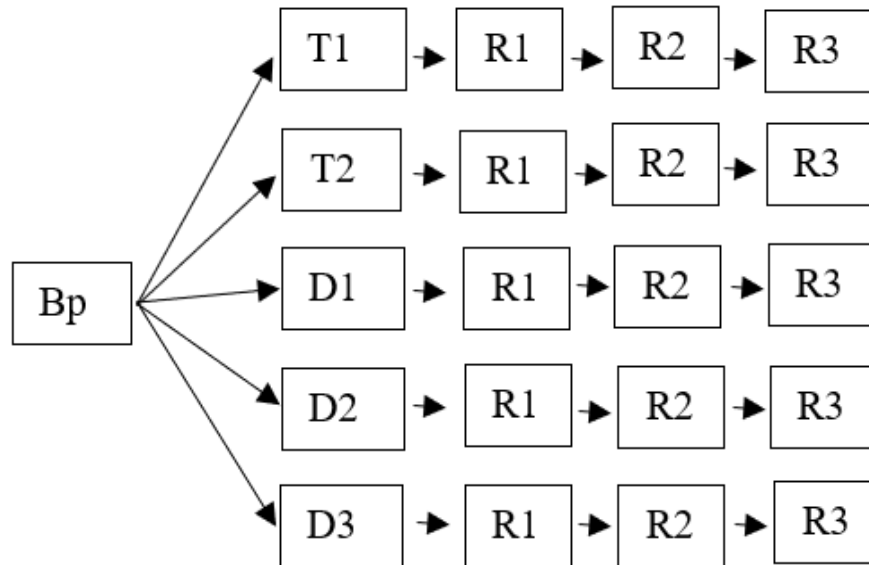
3.3.4. Operacionalización de variables

Tabla 4. Operacionalización de variables

Variable	Definición de operacionalidad	Dimensión	Indicador	Escala
Variable Independiente:				
Dilución del estiércol de porcino (<i>Sus scrofa domesticus</i>) de la granja de Zootecnia	Caracterización del estiércol utilizado en el estudio.	Propiedades fisicoquímico	- Temperatura (°C)	Intervalo
			- pH	
		- C: N		
		- Humedad (%)		
Variable Dependiente: Producción de biogás	Cantidad de biogás producido a partir del estiércol de porcino.	Volumen de biogás producido	Volumen (ml)	Razón
	Duración del proceso de producción de biogás.	Periodo de producción de biogás	Tiempo (días)	Razón
Variable Interviniente: Condiciones climáticas	Nivel de calor en el ambiente	Parámetro climático	Temperatura (°C)	Intervalo

Fuente: Elaboración propia

3.3.5. Diseño de investigación



Leyenda: [Bp]: Biogás a producirse del estiércol de porcino, [T]: Testigo, [D1]: Dilución del estiércol de porcino 1, [D2]: Dilución del estiércol de porcino 2, [D3]: Dilución del estiércol de porcino 3, [R1]: Repetición 1, [R2]: Repetición 2, [R3]: Repetición 3.

Figura 3. Flujograma de investigación

Fuente: Elaboración propia

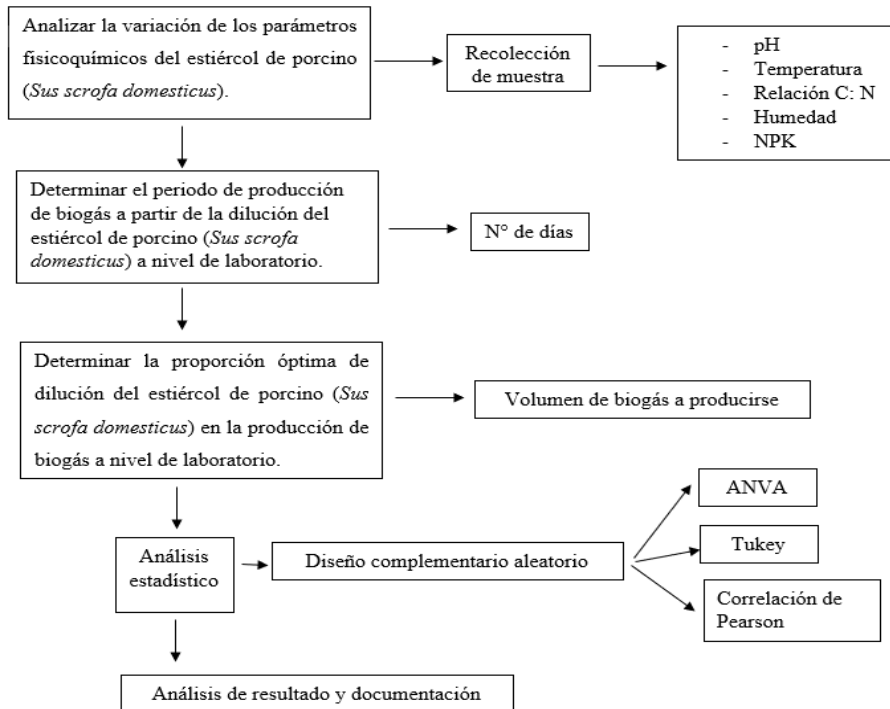


Figura 4. Flujograma de investigación

Fuente: Elaboración propia

3.3.6. Población y muestra

La granja de Zootecnia contó con una población total de 67 porcinos, distribuidos en 11 grandes, 28 medianos y 28 pequeños. Según Martines (2015), la producción diaria de estiércol variaba en función del tamaño del animal: los porcinos grandes generan 2 kg/día, los medianos 1.5 kg/día, y los pequeños 1 kg/día. Con base en estos valores, se estimó que la producción total de estiércol en la granja es de 92 kg por día.

Para la investigación, se seleccionó una muestra no probabilística, distribuyéndola equitativamente entre porcinos de diferentes tamaños: grandes, medianos y pequeños. Se determinó la cantidad de estiércol producido por cada grupo para calcular el total generado diariamente y establecer la cantidad a utilizar en las disoluciones experimentales. En total, se utilizaron 16.55 kg de estiércol de porcino, 0.5 kg para los análisis fisicoquímicos y 16.05 para las diluciones, distribuidos proporcionalmente entre los diferentes tamaños de porcinos. La distribución detallada se presenta en la tabla 5

Tabla 5. Distribución del estiércol de porcino utilizado según su tamaño y la cantidad requerida.

Tamaño del porcino	Cantidad de porcinos	Estiércol producido por unidad (kg/día)	Estiércol total (kg/día)	Porcentaje del total (%)	Estiércol total a (kg)	Estiércol a según el tamaño (kg)
Grande	11	2	22	23.91		3.96
Mediano	28	1.5	42	45.65	16.55	7.55
Chico	28	1	28	30.44		5.04
Total	67		92	100		16.55

Fuente: Elaboración propia

3.3.7. Técnicas de recolección de datos

Se emplearon dos técnicas para la recolección de datos, las cuales se detallan a continuación.

- A. Observación directa:** Se realizó un seguimiento detallado del proceso de digestión anaeróbica, registrando la producción de biogás en diferentes diluciones de estiércol y agua.
- B. Medición de resultados:** Para la medición de los parámetros fisicoquímicos, se usó el método de Walkley y Black, el método Kjeldahl, el método de Olsen modificado, el procedimiento

descrito en la NTP 251.010 y la saturación con acetato de amonio 1N a pH 7.0. Las botellas estuvieron calibradas y marcadas en intervalos de 2 ml para registrar la cantidad de biogás producido.

3.4. Metodología

3.4.1. Análisis de la variación de los parámetros fisicoquímicos del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*).

3.4.1.1. Recolección del estiércol de porcino

Para la recolección del estiércol de porcino, se programó una visita a la granja de Zootecnia en horas tempranas de la mañana, específicamente a las 4:00 a.m. El procedimiento se realizó cumpliendo con todas las medidas de bioseguridad, incluyendo el uso obligatorio de botas, guantes, mascarilla y chaleco, y contando previamente con la autorización institucional correspondiente.

Para la recolección de muestra se tuvo en cuenta la clasificación de los porcinos por tamaño (grandes, medianos y pequeños), por lo que se tomaron seis puntos de muestreo en cada corral, siguiendo las recomendaciones del Departamento de agricultura de Estados Unidos (2019) para estiércol de porcino. En los porcinos grandes se trabajó con siete corrales que en conjunto sumaban once individuos, obteniéndose un total de 3.96 kg de muestra homogenizada; en los porcinos medianos, distribuidos en cuatro corrales de siete individuos cada uno, se recolectaron 7.56 kg; y en los porcinos pequeños, ubicados en dos corrales con catorce individuos cada uno, se obtuvieron 5.04 kg. Una vez recolectadas las submuestras por tamaño, estas fueron homogenizadas y transferidas en bolsas herméticas rotuladas, asegurando su adecuada conservación para evitar fermentación o pérdidas de compuestos volátiles. Finalmente, las tres muestras homogenizadas se integraron para conformar la muestra general utilizada en el estudio tanto en las diluciones y los análisis fisicoquímicos.

3.4.1.2. Análisis fisicoquímico

Fueron realizados en el Laboratorio de Suelos, Agua y Ecotoxicología de la Universidad Nacional Agraria de la Selva con la supervisión de los encargados.

A. Temperatura y Potencial de Hidrógeno (pH)

Para medir el pH y la temperatura se utilizó un multiparámetro (Milwaukee Mi 180). Antes de empezar con las mediciones, el equipo fue calibrado siguiendo

las indicaciones del fabricante, asegurando que los valores registrados fueran precisos. Luego, en la mesa de trabajo se seleccionaron las muestras y se pesaron 20 gramos de estiércol porcino. A cada muestra se le agregaron 20 mililitros de agua destilada fresca con ayuda de un dispensador de laboratorio, manteniendo una relación 1:1 entre estiércol y agua. Después, las muestras colocadas en el rack B-11 se llevaron al agitador, donde permanecieron agitando durante 10 minutos. Al terminar, se dejaron reposar por 5 minutos para estabilizar la mezcla. Finalmente, se realizó la lectura del pH y la temperatura directamente en el multiparámetro.

B. Humedad (%)

Para medir la humedad se utilizó el método descrito en la NTP 251.010 (Ruiz, 2015), para ello, el estiércol de porcino previamente recolectado fue pesado y luego secado en estufa a 103 ± 2 hasta alcanzar un peso contante; este procedimiento se aplicó tanto al estiércol inicial como al finalizar la producción de biogás en cada dilución, donde la determinación de la humedad se realizó utilizando la ecuación 1:

$$Ch = \frac{(Pha - Psa)}{Pha} * 100 \dots (1)$$

Donde:

Ch: Contenido de humedad expresado en porcentaje.

Pha: Peso del recipiente más la muestra húmeda.

Psa: Peso del recipiente más la muestra.

C. Relación C: N

El análisis de la relación de C: N del estiércol de porcino proveniente de la granja de Zootecnia se realizó en el Laboratorio de Suelo, Agua y Ecotoxicología. Teniendo en cuenta que un valor ideal para la producción de biogás suele oscilar entre 20:1 y 30:1 (Espinoza et al., 2023).

En primer lugar, las muestras fueron secadas en una estufa a 65 °C hasta alcanzar peso constante con el propósito de eliminar la humedad. Una vez secas, fueron molidas y tamizadas para obtener un material fino y homogéneo. Posteriormente, se

procedió a la determinación del contenido de carbono (C) mediante el método Walkley y Black de la siguiente manera:

- **Determinación de Carbono**

Las soluciones se prepararon de la siguiente manera, primero se pesó 49.024 g de dicromato de potasio que había sido previamente secado a 110 °C por 4 horas y luego se disolvió en un litro de agua, después se preparó la solución de sal de Mohr 0.5 pesando 196 g de sulfato ferroso amoniacal, se disolvió en 500 ml de agua, se agitó bien y se añadió 20 ml de ácido sulfúrico para estabilizar la solución, completando el volumen a un litro y se guardó en un frasco oscuro, por último se preparó la solución de difenilamina sulfúrica pesando 0.5 g de difenilamina, se colocó en un vaso Beaker con 20 ml de agua destilada y añadí 50 ml de ácido sulfúrico hasta que se disolvió por completo.

La determinación de carbono se realizó pesando 0.25 gramos de muestras en un Erlenmeyer, luego se añadió 5 ml de dicromato de potasio 1 N con un dispensador y se agitó durante un minuto, se observó si la mezcla adquirió un color pardo, después de la mezcla se dejó en reposo a temperatura ambiente por 30 minutos, luego, se incorporaron 50 ml de agua destilada y se dejó reposar por 2 horas, transcurrido ese tiempo se tomaron 10 ml de la solución en un vaso precipitado y se agregó 3 gotas de indicador difenilamina sulfúrica, finalmente se tituló con sulfato ferroso 0.5 N hasta observar el cambio de verde oscuro a verde brillante y se registró el volumen gastado de la sal Mohr, y con ello se obtuvo el valor del carbono.

Posteriormente se realizará la determinación del nitrógeno (N) en la muestra de estiércol de porcino mediante el método de Kjeldhal, siguiendo los siguientes pasos:

- **Determinación de Nitrógeno**

Las soluciones se prepararon de la siguiente manera, la mezcla catalizadora se obtuvo pulverizando por separado 150 g de sulfato de potasio, 10 g de sulfato de cobre pentahidratado y 1 g de selenio, para luego mezclarlos y molerlos en un mortero, el hidróxido de sodio 10 N se preparó disolviendo 400 g de NaOH en 700 ml de agua destilada, dejando enfriar y completando el volumen a 1000 ml para luego disolver 1g de fenolftaleína, finalmente el ácido bórico al 2% se elaboró disolviendo 20 g de HBOs en 900 ml de agua

destilada, añadiendo 20 ml del indicador preparado con verde de bromocresol y rojo de metilo en etanol, llevando la solución a 1000 ml y ajustando el color a violeta con NaOH.

La determinación de nitrógeno se realizó colocando 1 g del estiércol de porcino en un balón micro Kjeldahl, añadiendo 1 g de la mezcla catalizadora y 3 ml de ácido sulfúrico, luego la mezcla se dirigió hasta aclararse, se dejó enfriar y se añadió agua destilada hasta unos 15 ml, después se llevó a la unidad de destilación, se agregó NaOH con fenolfaleína hasta obtener un color rojo claro y se destiló recolectando los vapores en 10 ml de ácido bórico durante 5 minutos, finalmente el destilado se tituló con ácido estandarizado.

Obteniendo los resultados de carbono y nitrógeno se procederá a calcular la relación del C: N del estiércol de porcino utilizando la siguiente formula:

$$C:N = \frac{C}{N}$$

Donde:

C: N: Relación de carbono y nitrógeno.

C: Carbono.

N: Nitrógeno.

D. Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K)

El análisis del NPK del estiércol de porcino se llevó a cabo en el Laboratorio de Suelo, Agua y Ecotoxicología, las muestras serán secadas hasta alcanzar peso constante, con el propósito de eliminar la humedad. Una vez secas, las muestras serán molidas y tamizadas para obtener un material fino y homogéneo, adecuado para los análisis de laboratorio de nitrógeno (N), fosforo (P) y potasio (K).

- Determinación de Nitrógeno (N)

La determinación del nitrógeno (N) en la muestra de estiércol de porcino fue mediante el método de Kjeldhal, donde se comenzó con la preparación de las soluciones de la siguiente manera, la mezcla catalizadora se obtuvo pulverizando por separado 150 g de sulfato de potasio, 10 g de sulfato de cobre pentahidratado y 1 g de selenio, para luego mezclarlos y molerlos en un mortero, el hidróxido de sodio 10 N se preparó disolviendo 400 g de NaOH en 700 ml de agua destilada, dejando enfriar y completando el volumen a 1000 ml para luego disolver 1g de fenolftaleína, finalmente el ácido bórico al 2% se elaboró disolviendo 20 g de HBOs en 900 ml de agua destilada, añadiendo 20 ml del indicador preparado con verde

de bromocresol y rojo de metilo en etanol, llevando la solución a 1000 ml y ajustando el color a violeta con NaOH.

La determinación de nitrógeno se realizó colocando 1 g del estiércol de porcino en un balón micro Kjeldahl, añadiendo 1 g de la mezcla catalizadora y 3 ml de ácido sulfúrico, luego la mezcla se dirigió hasta aclararse, se dejó enfriar y se añadió agua destilada hasta unos 15 ml, después se llevó a la unidad de destilación, se agregó NaOH con fenolfaleína hasta obtener un color rojo claro y se destiló recolectando los vapores en 10 ml de ácido bórico durante 5 minutos, finalmente el destilado se tituló con ácido estandarizado.

- **Determinación de Fósforo (P)**

Para el análisis del Fosforo (P) se realizó mediante el método de Oslen Modificado, las soluciones se prepararon de la siguiente manera, primero se hizo la solución de bicarbonato de sodio 0.5 pesando 42.05 g de bicarbonato, se disolvió en agua destilada y se completó a 1 litro, luego se ajustó el pH a 8.5 con NaOH, después se preparó la solución de molibdato de amonio disolviendo 1 g del reactivo en agua, se añadió 0.024 g de tartrato de antimonio y potasio y luego 16 ml de ácido sulfúrico, completando el volumen a 1 litro, también se preparó el reductor para fósforo disolviendo 1 g de ácido ascórbico por cada litro de la solución de molibdato, finalmente se realizó los estándares de fósforo pesando 4.3934 g de fosfato diácido de potasio previamente secado, se disolvió en agua y se completó a 1 litro para obtener una solución de 1000 ppm, de la cual se prepararon las diluciones.

En la fase de extracción se pesaron 2 g de suelo, se añadió carbón activado y 20 ml de bicarbonato de sodio 0.5 M pH 8.5, luego la mezcla se agitó por 30 minutos y se filtró para obtener el extracto, en la fase de dosaje se preparó la curva patrón colocando 3 ml de las soluciones estándar de 0, 1, 2 y 3 ppm de fósforo y añadiendo 10 ml de la solución de molibdato con reductor, después se preparó el extracto de lectura mezclando 3 ml del extracto de suelo con 10 ml del mismo reactivo, se dejaron reposar las soluciones por 14 minutos y finalmente se midieron las absorbancias a 660 nm.

- **Determinación de Potasio (K)**

La determinación del contenido de potasio (K) se realizó mediante el método de Saturación con Acetato Amonio 1N pH7.0. Para la preparación del Acetato de amonio 1 N pH 7.0, se agregó 40ml de Ácido Acético glacial. Luego 80ml de Hidróxido de Amonio y enrazar en 800ml de Agua destilada y controlar que llegue en pH: 7

agregando 2- 3 gotas de Ácido acético o poco a poco agregar Hidróxido de Amonio una vez optimo el pH indicado enrazar a 1 Litro.

Para preparar el extracto, se pesó 2 g de suelo y se colocó en un vaso de plástico. Luego, se agrego 10 ml de Acetato de amonio 1N a pH 7.0 y se agito la mezcla durante 15 minutos. Después, se filtró la solución obteniendo el extracto, y se realizó diluciones de 1/100. Finalmente, se tomó la lectura de la solución en el espectrofotómetro de absorción.

3.4.1.3. Procesamiento y análisis de datos

Se organizaron los datos obtenidos utilizando Microsoft Excel 365, mediante tablas y gráficos de barras para cada parámetro fisicoquímico, lo que permitió visualizarse de forma clara la variación entre los valores iniciales y finales.

3.4.2. Determinación del periodo de producción de biogás a partir de la dilución del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*) a nivel de laboratorio.

3.4.2.1. Preparación de las muestras

Se estableció tres diluciones con relación estiércol y agua. Además, se instaló dos testigos con tres repeticiones cada uno.

Tabla 6. Valor de relación de estiércol de porcino y agua

Diluciones	Proporción	Relación estiércol: agua
1	Alta	1:2
2	Media	1:3
3	Baja	1:4

Fuente: Barrena et al., 2020

Tabla 7. Muestras evaluadas

Muestras	Repeticiones	Cantidad utilizadas	
		Estiércol (gr)	Agua (ml)
Testigo 1	3	0	3000
Testigo 2	3	3000	0
Dilución 1	3	1000	2000
Dilución 2	3	750	2250
Dilución 3	3	600	2400

Fuente: Elaboración propia

Se trabajó con tres soportes: en el primero se colocó los dos testigos, en el segundo, la dilución 1 y 2 y en el tercero la dilución 3. Cada una de estas condiciones contó con sus respectivas repeticiones.

Para cada dilución, se implementó tres botellas de plástico de 3 L como biodigestores, en las cuales se mezclaron el estiércol con la proporción adecuada de agua. Cada tratamiento contó con tres repeticiones. Cada unidad experimental estuvo conectada a una botella de 600 ml que actuó como gasómetro para medir el biogás producido. Estas botellas, llenas de agua y sin burbujas de aire, estuvieron parcialmente sumergidas en una tina y conectadas a los biodigestores mediante mangueras delgadas selladas con silicona para evitar fugas. A medida que produjo biogás, este desplazó el agua en los gasómetros, permitiendo cuantificar el volumen producido. Las botellas estuvieron calibradas y marcadas en intervalos de 2 ml para garantizar mediciones precisas.

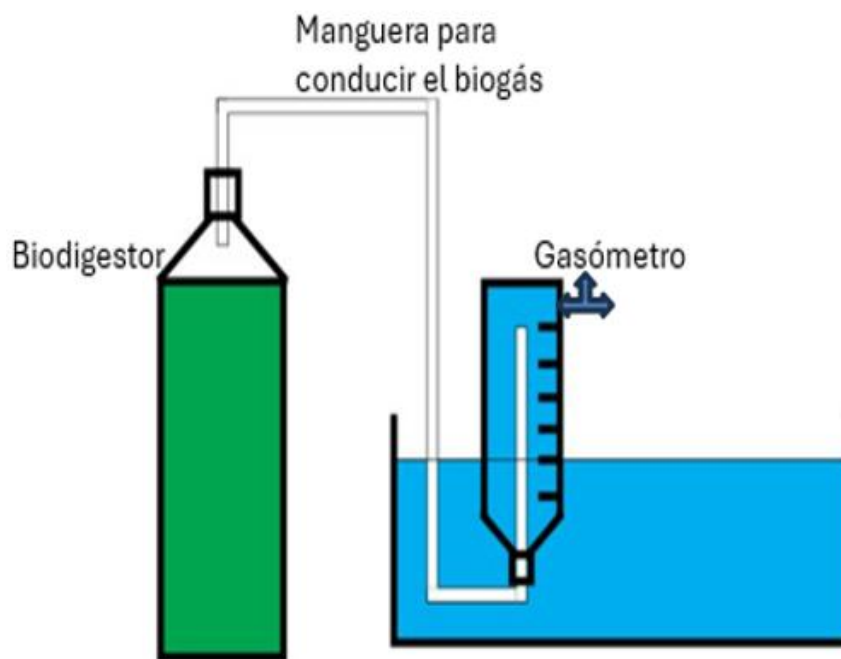


Figura 5. Equipo experimental para producir y medir el volumen de biogás.

Fuente: Elaboración propia

3.4.2.2. Monitoreo del período de producción de biogás

El monitoreo se llevó a cabo diariamente a las 3:00 p.m., con el fin de garantizar la consistencia en la recolección de datos. Se registro el volumen de biogás producido desde el primer día en que se detectó su producción hasta que finalizó por completo.

Este procedimiento permitió determinar con precisión la duración del período de producción de biogás para cada dilución evaluada, incluyendo los dos testigos, proporcionando así información clave sobre el rendimiento del proceso.

Una vez finalizado el proceso de producción de biogás, se procedió a la medición de la cantidad generada en cada dilución, utilizando un analizador de biogás portátil marca *Ortle*, equipado con sensores infrarrojos para la detección de gases como metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), oxígeno (O₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S).

3.4.2.3. Análisis de Datos

El análisis de datos se realizó utilizando Microsoft Excel para evaluar la duración del período de producción de biogás y su comportamiento en función del tiempo y la concentración del sustrato. Los datos del periodo de producción de biogás se realizó un gráfico de barra.

3.4.3. Determinación de la proporción óptima de dilución del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*) en la producción de biogás a nivel laboratorio.

Una vez recopilados los datos de producción de biogás en cada una de las diluciones evaluadas, se procedió a identificar la proporción óptima. Esta se determinó considerando la dilución que produjo la mayor cantidad de biogás y metano en el menor tiempo.

3.4.3.1. Cálculo total de la tasa de rendimiento de las concentraciones

La medición del biogás producido se realizó utilizando el método de desplazamiento de agua, empleando una botella de 600 ml como sistema de recolección. Este procedimiento permitió cuantificar el volumen de biogás producido de manera sencilla y precisa, asegurando condiciones adecuadas para su registro y análisis

La tasa de rendimiento de biogás se calculará en función del volumen producido y el tiempo transcurrido, permitiendo evaluar la eficiencia del proceso. Un mayor volumen de biogás producido en un menor tiempo indicará una mejor eficiencia, lo que ayudó a identificar la proporción óptima.

$$TR = \frac{V}{d}$$

Donde:

TR: Tasa de rendimiento de biogás (ml/día).

V: Volumen de biogás producido (ml).

T: Tiempo transcurrido en días (d).

3.4.3.2. Análisis estadístico

Primero, los datos fueron organizados y procesados utilizando Microsoft Excel y el software estadístico Infostad. Luego, se ejecutó un Análisis de Varianza (ANVA) con un nivel de significancia del 5% para evaluar las hipótesis correspondientes a cada dilución y sus repeticiones. También, se empleó la prueba de Tukey para realizar la separación de medias, lo que permitió determinar cuál de las diluciones analizadas presentó el mejor desempeño y finalmente correlación de Pearson (Tejedor, 2023).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis de la variación de los parámetros fisicoquímicos del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*).

4.1.1. Análisis fisicoquímicos del estiércol de porcino

En la tabla 8, se muestran los resultados del análisis fisicoquímico del estiércol de porcino, evaluado antes del proceso de digestión anaerobia y nuevamente al finalizar la producción de biogás. Las mediciones finales se hicieron por separado para cada dilución y los testigos, lo que permitió comparar cómo variaron parámetros como pH, relación C/N, humedad y temperatura durante el proceso; el pH mostró cambios asociados a la transición entre fases microbianas, mientras que la relación C/N disminuyó debido al consumo de carbono, evidenciando degradación del sustrato, la humedad también varió entre tratamientos, indicando que algunas diluciones mantuvieron mejores condiciones para la actividad microbiana y la temperatura permaneció estable, garantizando un entorno adecuado para la producción de biogás. El contenido de NPK se evaluó solo al finalizar el proceso para determinar su potencial uso agrícola, y los resultados mostraron el digestato conserva nutrientes esenciales. Esto indica que además de producir biogás, el estiércol tratado puede emplearse como abono orgánico, aportando un valor agregado desde un enfoque sostenible.

Tabla 8. Análisis fisicoquímicos del estiércol de porcino.

Parámetros	Valor inicial	Diluciones			
		Testigo 2 (Estiércol)	Dilución 1 (1:2)	Dilución 2 (1:3)	Dilución 3 (1:4)
pH	6.9	6.91	7.35	7.50	7.60
C/N	20.19:1	19:1	11.22:1	14.53:1	16:1
Humedad	68.53 %	68.55 %	80.56 %	84.34 %	90.45 %
Temperatura	25 °C	26 °C	26 °C	26 °C	26 °C
N	-	2.10 %	2.89 %	2.75 %	2.50 %
P	-	1.05 %	1.38 %	1.27 %	1.15 %
K	-	1.47 %	1.99 %	1.72 %	1.45 %

A. Potencial de Hidrogeno (pH)

En la figura 6, muestra la variación del pH del estiércol de porcino durante el proceso de digestión anaerobia en el testigo y las diferentes diluciones evaluadas. Se observa un comportamiento diferenciado entre el estiércol sin diluir y las muestras diluidas, evidenciando la influencia de la dilución en la estabilidad del sistema y en el desarrollo de la actividad microbiana.

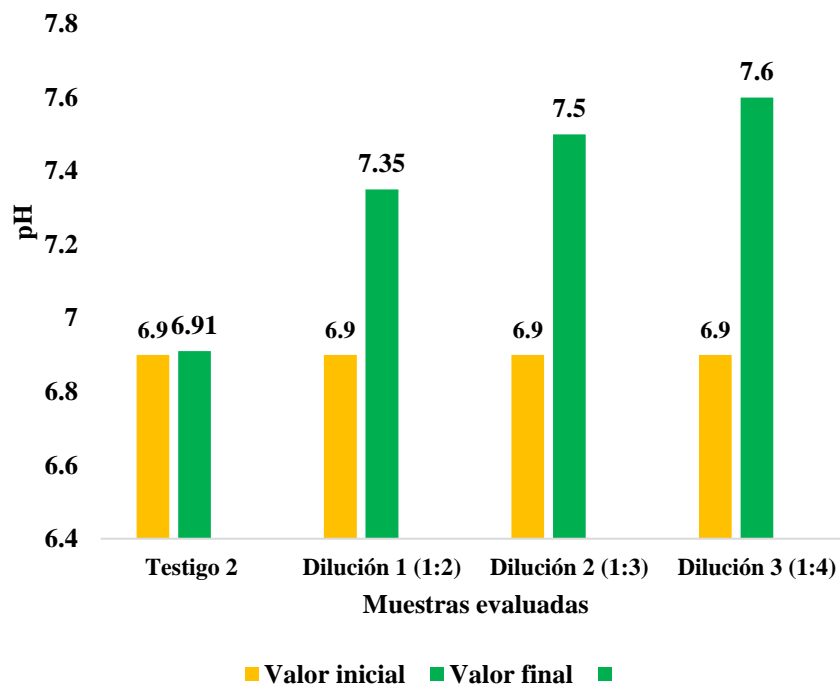


Figura 6. Variación del pH en cada muestra evaluada.

En la figura 6, el pH inicial del estiércol de porcino fue de 6.9, un valor ligeramente ácido pero adecuado para el inicio del proceso anaerobio. Este resultado coincide con lo señalado por Venegas et al. (2022), quienes indican que el pH inicial del estiércol de porcino debe mantenerse entre 6.7 y 7.4 para promover el desarrollo del microorganismo metanogénicos y asegurar la estabilidad del sistema. En este sentido, el valor obtenido en esta investigación se ubica dentro del rango óptimo propuesto por estos autores.

En el testigo 2, donde se utilizó estiércol de porcino sin diluir, el pH se mantuvo prácticamente constante (6.91), lo que evidencia que solo se desarrollaron procesos anaerobios de forma muy limitada. Esta estabilidad se debe a la falta de humedad adicional, ya que el agua es indispensable para activar la actividad microbiana y permitir las variaciones normales del pH que ocurren durante la hidrólisis y la acidogénesis. Tal como indican Mosquera

et al. (2024) Y N'guessan et al. (2025), la dilución del estiércol mejora la disponibilidad del sustrato y facilita que los microorganismos produzcan los ácidos orgánicos responsables de los primeros descensos del pH en un biodigestor. Del mismo modo, Duan et al (2020), indican que, cuando estas transformaciones iniciales son mínimas, el pH tiende a mantenerse estable porque no hay suficiente producción ni consumo de compuestos que modifiquen su valor, esto confirma que, aunque ocurrió una baja actividad anaerobia, el estiércol sin diluir no genera condiciones favorables para iniciar adecuadamente la digestión anaerobia.

Las diluciones sometidas a digestión anaerobia mostraron un incremento progresivo del pH conforme avanzó el proceso. Las diluciones 1:2, 1:3 y 1:4 alcanzaron valores de 7.35, 7.50 y 7.60, respectivamente. Este aumento se dio por la transformación de los ácidos orgánicos generados en las primeras etapas del proceso en gases como metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) durante la fase de metanogénesis. A medida que estos ácidos son consumidos por los microorganismos metanogénesis, el medio pierde acidez y el pH tiende hacia valores neutros o ligeramente alcalinos, lo que refleja que el sistema alcanzó un estado de mayor estabilidad. Esto coincide con los hallazgos de Pegoraro et al. (2023), donde menciona que las bacterias metanogénicas trabajan de manera óptima dentro del rango de 7.0 a 8.0, ya que valores más ácidos o más alcalinos pueden frenar su actividad. Los valores obtenidos entre diluciones se ubicaron dentro de este intervalo, lo que confirma que las condiciones del proceso favorecieron la producción de biogás.

B. Relación C: N

La figura 7 muestra la relación C/N inicial y final del estiércol de porcino en el testigo y en las diferentes diluciones evaluadas durante el proceso de digestión anaerobia. En todas las muestras se observa una disminución de la relación C/N a lo largo del periodo experimental, lo que evidencia que el carbono fue progresivamente consumido por los microorganismos como fuente de energía. Esta reducción indica un adecuado aprovechamiento del sustrato orgánico y el desarrollo de la actividad microbiana, ya que el carbono es transformado principalmente en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2).

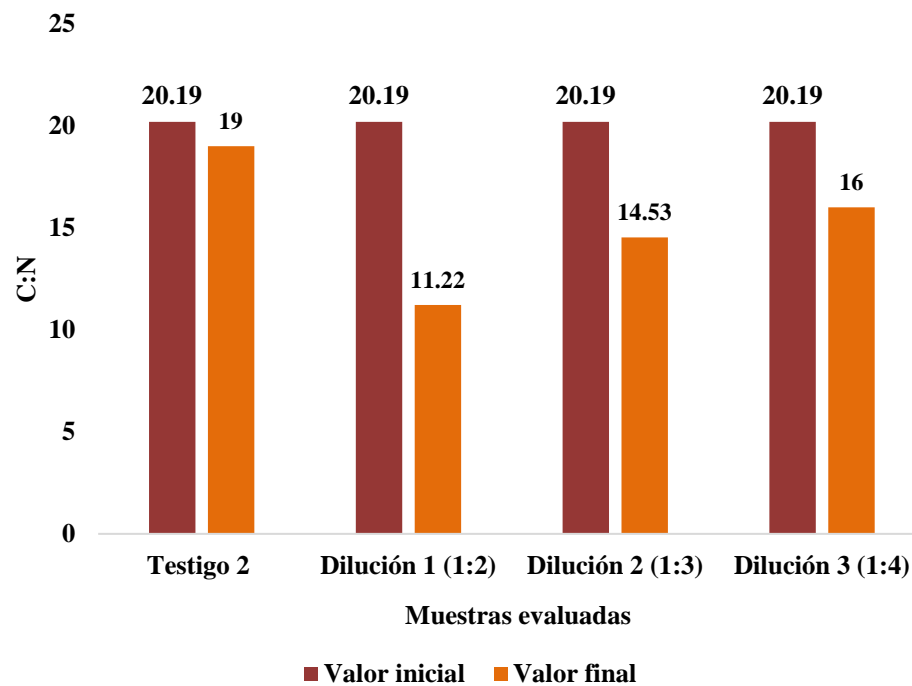


Figura 7. Variación del C: N en cada muestra evaluada.

En la figura 7, se muestra los resultados de la relación C: N inicial del estiércol de porcino fue de 20.19:1, un valor característico de materiales orgánicos frescos que cuentan con suficiente carbono y nitrógeno para iniciar adecuadamente un proceso de digestión anaerobia. Este resultado concuerda con lo señalado por Duan et al (2020), quienes indican que el rango óptimo de C: N para la producción eficiente de biogás en estiércol de porcino se encuentra entre 20:1 y 30:1. El valor obtenido en esta investigación se ubica dentro de este intervalo, lo que demuestra que el sustrato posee una composición adecuada para evitar inhibiciones por exceso de nitrógeno o deficiencias por exceso de carbono, asegurando un proceso estable.

En el testigo 2, compuesto únicamente por el estiércol sin adición de agua, la relación C: N medida al final del experimento disminuyó ligeramente a 19.00, lo que indica una degradación mínima del carbono debido a la limitada actividad microbiana generada por la baja humedad disponible. Coincide con lo reportado por Huarac y More (2022), quienes observaron que el estiércol sin diluir no permite una actividad microbiana adecuada debido a su consistencia espesa y poca disponibilidad de agua. Esto genera un entorno poco favorable para que los microorganismos puedan actuar, limitando así la degradación del carbono y, en consecuencia, la producción del metano.

En cambio, en las diluciones evaluadas, la reducción fue más notoria y dependió directamente del nivel de dilución: la mezcla 1:2 presentó el descenso más pronunciado (11.22), seguida de 1:3 (14.53) y 1:4 (16.00). Esta tendencia muestra que las diluciones con mayor concentración de estiércol favorecieron una biodegradación más intensa del carbono, lo que explica que la disminución de la relación C: N haya sido más marcada en la dilución 1:2.

La disminución de la relación C/N durante la digestión anaerobia ocurre principalmente porque los microorganismos utilizan el carbono como fuente de energía, transformándolo en dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). En cambio, el nitrógeno no se consume ni se elimina del sistema, ya que no se usa para producir energía, sino que es aprovechado por los microorganismos para formar su biomasa, durante este proceso, el nitrógeno permanece en el sistema principalmente en forma amoniacal ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3$). Además, al desarrollarse en condiciones anaerobias, no se presentan procesos como la nitrificación o desnitrificación, por lo que el nitrógeno se mantiene, explicando así la disminución de la relación C/N sin una pérdida significativa de nitrógeno. Este resultado coincide con lo que señalan Mosquera et al. (2024), quienes mencionan que cuando el sustrato tiene suficiente humedad y una adecuada concentración de sólidos, la descomposición orgánica se acelera. Según estos autores, cuando hay suficiente humedad y un balance adecuado de nutrientes, las primeras etapas del proceso anaerobio como la hidrólisis y acidogénesis se desarrollan con mayor facilidad. Esto explica por qué en esta investigación la reducción del carbono fue tan marcada en la solución 1, donde los microorganismos tuvieron un ambiente más favorable para descomponer la materia orgánica.

C. Humedad (%)

La figura 8 muestra los valores iniciales y finales de humedad del estiércol de porcino en el testigo 2 y en las diferentes diluciones evaluadas durante el proceso de digestión anaerobia. Se observa una variación en el contenido de humedad entre el inicio y el final del experimento, asociada a la incorporación de agua en las diluciones y al desarrollo del proceso biológico. La humedad desempeña un papel fundamental en la digestión anaerobia, ya que favorece la solubilización de los compuestos orgánicos y facilita la actividad de los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica y la producción de biogás.

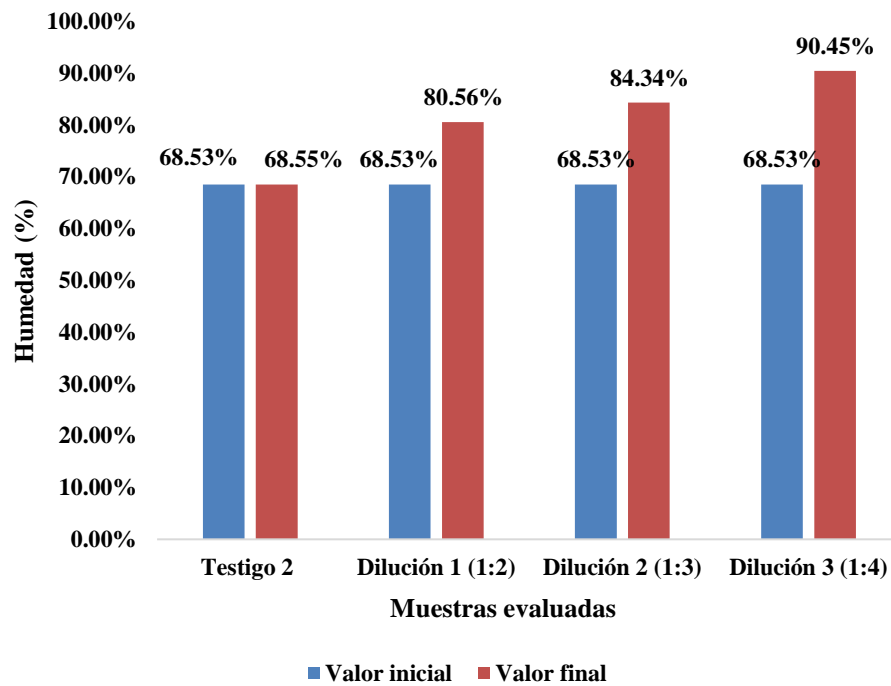


Figura 8. Variación de la humedad en cada muestra evaluada.

En la figura 8, se observa que el estiércol de porcino utilizado en este estudio presentó una humedad inicial de 68.53%, un valor que coincide con lo señalado por Fan et al. (2023), quienes mencionan que el estiércol de porcino recién recolectado debe estar dentro del rango de 65% y 70% de humedad. De este modo, los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango esperado, sin embargo, como menciona los autores este nivel de humedad aún necesita diluirse con agua para lograr una digestión anaerobia más eficiente y favorecer la producción de biogás.

En el testigo 2, conformada únicamente por estiércol, la humedad final alcanzó 68.55 %, valor que prácticamente no varío a lo largo del proceso experimental. Este comportamiento coincide con lo señalado por Huarac y More (2022) y Tancara (2025), quienes destacan que el estiércol de porcino presenta una elevada capacidad de retención hídrica, manteniéndose estable cuando no recibe adicional de agua.

Los valores finales de humedad en las tres diluciones fueron 80.56 % para la dilución 1:2, 84.34 % para la dilución 1:3, y 90.45 % para la dilución 1:4, lo que muestra que el aumento de agua en las mezclas elevó progresivamente la humedad del sustrato, lo que coincide con lo descrito por Vásquez (2023), respecto a que las diluciones más altas generan mezclas más húmedas, pero también más dispersas, reduciendo la concentración de materia

orgánica disponible. Por ello, aunque las relaciones 1:3 y 1:4 alcanzaron humedades mayores, fue la dilución 1:2 la que finalmente ofreció las condiciones más favorables para el proceso, por lo que produjo mayor cantidad de biogás en menos tiempo, también coincide con lo reportado por Cosi (2025), quien trabajando con estiércol porcícola en un biodigestor artesanal obtuvo altos volúmenes de gas manteniendo la humedad entre 75 % y 85 %, demostrando que controlar este parámetro es determinante para el crecimiento microbiano y la eficiencia del proceso. Por tanto, se concluye que no es la mayor humedad la que garantiza mejores rendimientos, sino aquella que se encuentra dentro de un intervalo óptimo que favorece la metanogénesis sin diluir el sustrato en exceso

D. La temperatura

La figura 9, muestra los valores iniciales y finales de temperatura del estiércol de porcino en el testigo 2 y las diferentes diluciones durante la digestión anaerobia. Se observa una variación mínima de la temperatura, manteniéndose dentro de un rango estable adecuado para el desarrollo del proceso anaerobio.

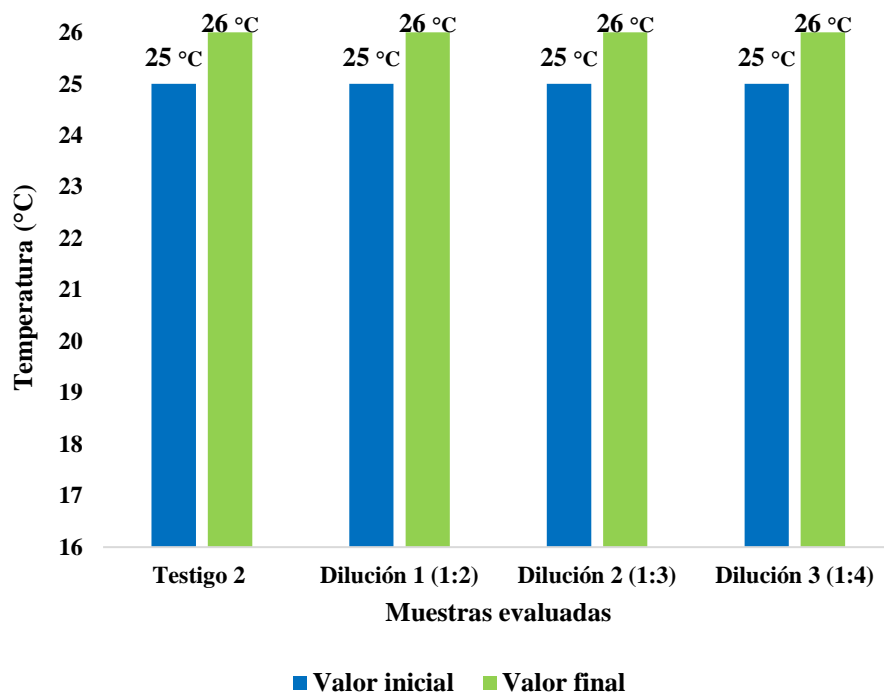


Figura 9. Variación de la temperatura en cada muestra evaluada.

En la figura 9, la temperatura inicial del estiércol de porcino fue de 25 °C, y al finalizar el periodo de evaluación de producción de biogás, todas las diluciones y el testigo 2 mantuvieron un valor uniforme de 26 °C, lo que demuestra que el sistema operó bajo

condiciones térmicas estables dentro del rango mesófilo bajo. De acuerdo con Ganey et al. (2023), trabajar en un intervalo cercano a 25 y 35 °C favorece la actividad microbiana al evitar fluctuaciones que pueden ralentizar la hidrólisis y la acidogénesis, etapas fundamentales en la digestión anaerobia. Asimismo, Mosquera et al. (2024), menciona que los sistemas anaerobios con temperatura controlado o estable suelen mostrar un comportamiento microbiano más eficiente, debido a que las bacterias metanogénicas son especialmente sensibles a los cambios bruscos. En este estudio, el hecho de que tanto el testigo como las diluciones conservan una temperatura uniforme de 26 °C permitió garantizar que las diferencias observadas entre las diluciones se debieron exclusivamente a las variaciones en la composición de las diluciones (relación de estiércol:agua) y no a efectos térmicos, confirmando así la validez de los resultados obtenidos en cada uno de los biodigestores.

E. Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K)

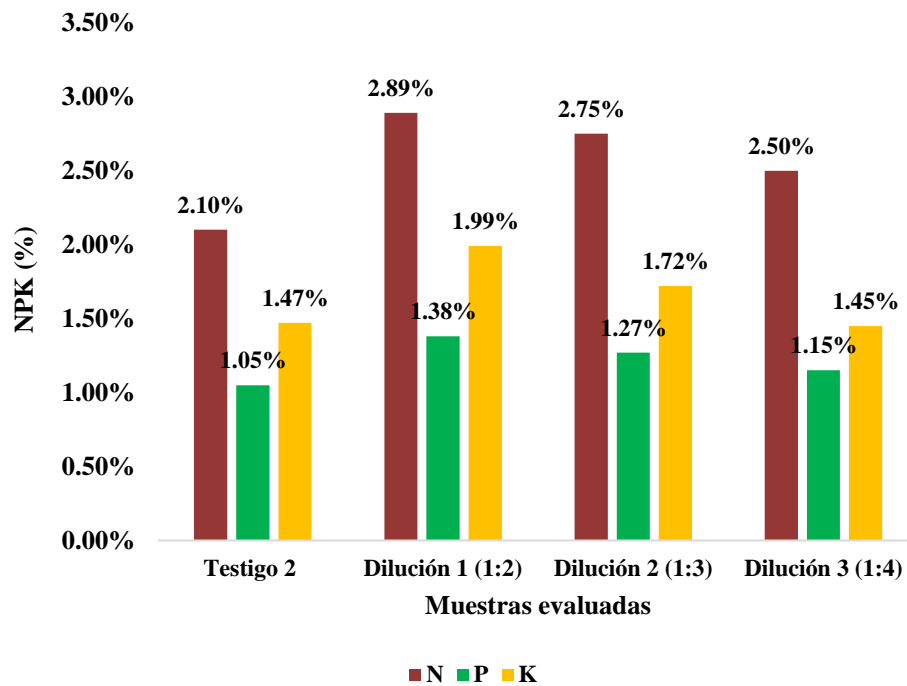


Figura 10. Variación del NPK en cada muestra evaluada.

En la figura 10, se observa el contenido de NPK del estiércol de porcino después de la digestión anaerobia. El testigo 2 presentó valores de 2.10% de nitrógeno, 1.05% de fósforo y 1.47% de potasio. En la primera dilución alcanzaron 2.89 de N, 1.38% de P y 1.99 % de K, mientras que la segunda dilución registro valores 2.75% de N, 1.27 % de P Y 1.72 de K, y la tercera dilución obtuvo 2.50 % de N, 1.15 de P y 1.45 de K. Estos resultados coinciden con los rangos reportados por Tambone et al. (2010), donde menciona que para estiércol de

porcino después de la digestión anaerobia ($N= 2.1 - 2.9 \%$, $P = 1.0 - 1.4 \%$, $K= 1.4 - 2.0 \%$), lo que confirma que las concentraciones obtenidas en este estudio se encuentran dentro de los rangos establecidos. Esta coincidencia demuestra que el digestato producido posee la calidad agronómica necesaria para ser utilizado como abono directo, aportando nitrógeno, fósforo y potasio en niveles apropiados para el crecimiento de los cultivos sin requerir un proceso adicional de compostaje. Es importante resaltar que la primera dilución mostró los valores más altos de NPK, lo cual se considera positivo, ya que una mayor liberación de nutrientes suele asociarse a una mejor degradación de materia orgánica.

4.2. Determinación del periodo de producción de biogás a partir de la dilución del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*) a nivel de laboratorio.

En la Figura 11, se observa el periodo de producción de biogás para cada una de las diluciones evaluadas. Los resultados muestran que el testigo 1 (solos agua) no presentó producción de biogás durante todo el periodo de evaluación, y el testigo 2 (solo estiércol de porcino) presentó un periodo limitado de producción, alcanzando únicamente 13 días, estos resultados indican que ninguno de los testigos presentó condiciones óptimas para una producción de biogás.

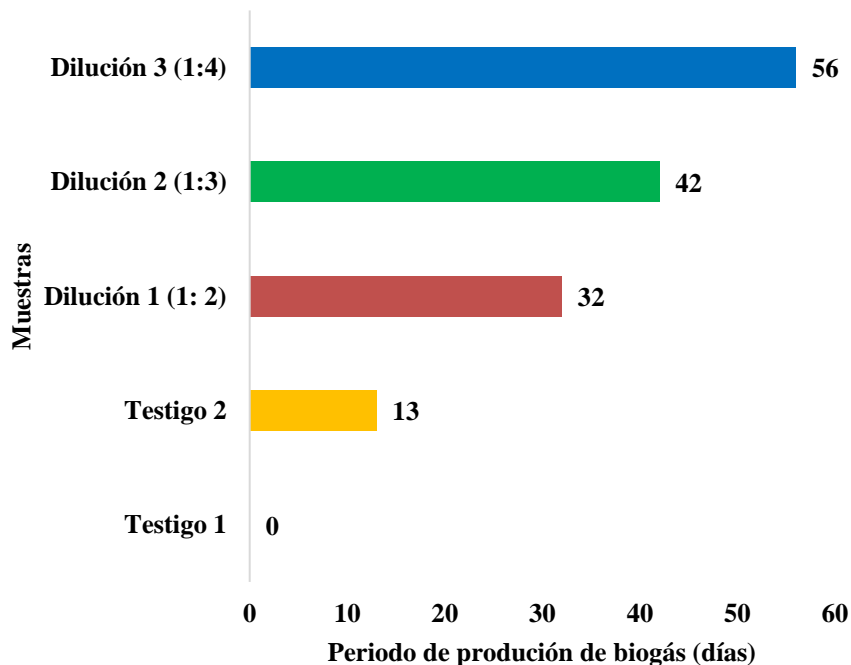


Figura 11. Periodo de producción de biogás según las diferentes diluciones evaluadas.

En cuanto a las diluciones, en la dilución 1 (1:2), la producción de biogás culminó en el día 32, un periodo más corto en comparación con lo reportado por Tancara (2025), quien observó que la producción se mantuvo activa aproximadamente hasta los 42 días bajo condiciones ambientales similares. Esta diferencia puede explicarse principalmente por la capacidad del biodigestor: mientras que Tancara utilizó reactores de 6L, en la presente investigación se trabajó con un volumen de solo 3L. Al tener menos capacidad, el biodigestor tiende a experimentar cambios más rápidos en sus condiciones internas, lo que hace que el proceso se complete en menos tiempo aun cuando se emplee la misma dilución.

En la dilución 2 (1:3) la producción de biogás culminó en el día 42, un resultado que coincide con lo señalado por Castro et al. (2020), quienes reportaron que esta misma proporción permite mantener la producción activa durante cerca de 40 días.

En la dilución 3 (1:4) el periodo de producción de biogás culminó en el día 56. Este resultado coincide con lo reportado por N'guessan et al. (2025), quienes también utilizaron la dilución 1.4 y observaron que la producción se extendió hasta los 56 días en biodigestores mesófilos. Sin embargo, no coincide con lo descrito por Mosquera et al. (2024), quienes emplearon la misma dilución 1.4, pero en un reactor UASB operado de forma continua, logrando mantener la producción activa durante aproximadamente 360 días, debido al mayor nivel de control y eficiencia del sistema.

4.3. Determinación de la proporción óptima de dilución del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*) en la producción de biogás a nivel de laboratorio.

4.3.1. Testigo 1

El testigo 1, compuesto únicamente por agua, no presentó producción de biogás durante el periodo experimental. Esto se debe a la ausencia de materia orgánica biodegradable, por lo que los microorganismos anaerobios no disponen de una fuente de carbono ni energía para desarrollar las etapas del proceso de digestión anaerobia (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis). En consecuencia, no se generó gas alguno, lo cual confirma que la presencia de materia orgánica es indispensable para la producción de biogás. Este resultado concuerda con lo descrito por Ignatowicz et al. (2023), quienes señalan que el tipo de sustrato y su preparación son determinantes para la generación de biogás, ya que los materiales sin contenido orgánico biodegradable no permiten iniciar el proceso de digestión anaerobia.

4.3.2. Testigo 2

En la tabla 9, se muestran los resultados del testigo 2, conformado únicamente por estiércol de porcino, donde se registró una producción total de biogás de 41 ml, equivalente al 100 % del volumen obtenido, de este total, el 14 % (5.74 ml) correspondió al metano (CH_4), el 85.99 % (35.26 ml) a dióxido de carbono (CO_2) y el 0.0006 % sulfuro de hidrógeno (H_2S) un 0.0006 %.

Tabla 9. Volumen total de biogás y composición porcentual de gases en el testigo 2.

Elemento	Volumen (ml)	Porcentaje (%)
Biogás	41	100
Metano	5.74	14
Dióxido de Carbono	35.26	85.9994
Sulfuro de hidrogeno	0.000246	0.0006

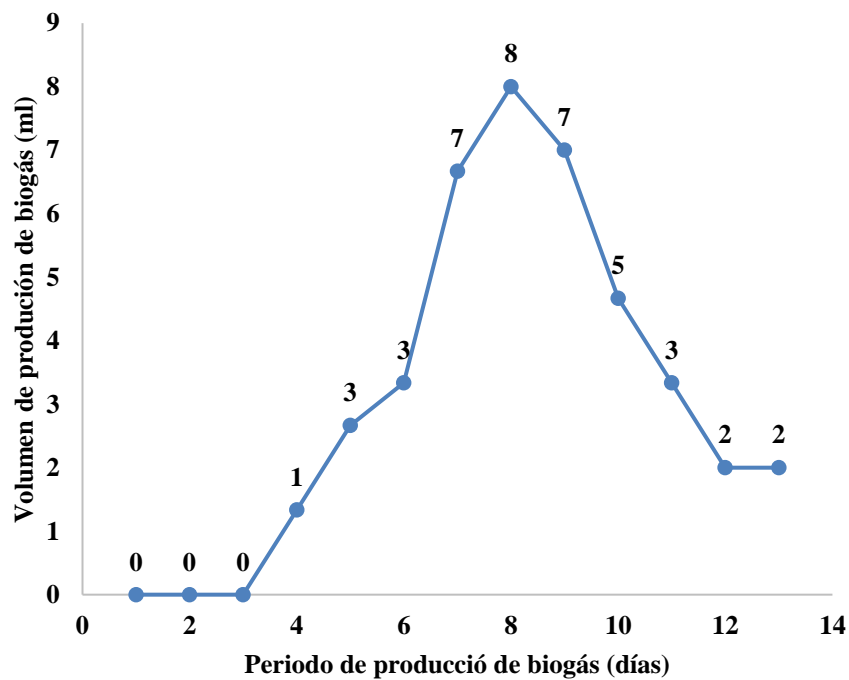


Figura 12. Comportamiento de la producción de biogás durante el periodo experimental en el testigo 2.

El testigo 2, aunque posee estiércol de porcino, la falta de dilución adecuada provocó condiciones desfavorables, como el exceso de sólidos, baja humedad, deficiente homogeneización y limitada difusión de nutrientes y microorganismos. Estas condiciones impidieron el desarrollo adecuado del proceso anaerobio, principalmente de

la fase metanogénica, que requiere un medio húmedo y libre de oxígeno. Este comportamiento coincide con lo señalado por Fan et al. (2023), quienes afirman que, aunque el estiércol porcino posee una humedad natural elevada, es necesario diluirlo con agua para mejorar su degradabilidad y permitir que las etapas de hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis se desarrollen adecuadamente. Bajo estas condiciones deficientes, la actividad microbiana se vio restringida, especialmente la de las arqueas metanogénicas, lo que explica la baja eficiencia observada en la producción de metano.

4.3.3. Dilución 1

En la tabla 10, se muestra datos de la dilución 1, compuesta por estiércol de porcino y agua en una relación de 1:2, donde se registró una producción total de biogás de 552 ml, alcanzando el valor máximo entre las diluciones evaluadas. Este volumen representa el 100 % del biogás producido, del cual el 72 % (397.44 ml) correspondió al metano (CH₄) y el 27.99 % (154.55 ml) al dióxido de carbono (CO₂) y el 0.0005 % sulfuro de hidrógeno (H₂S).

Tabla 10. Volumen total de biogás y composición porcentual de gases en la dilución 1 (1:2).

Elemento	Volumen (ml)	Porcentaje (%)
Biogás	552	100
Metano	397.44	72
Dióxido de Carbono	154.55	27.999
Sulfuro de hidrogeno	0.00276	0.0005

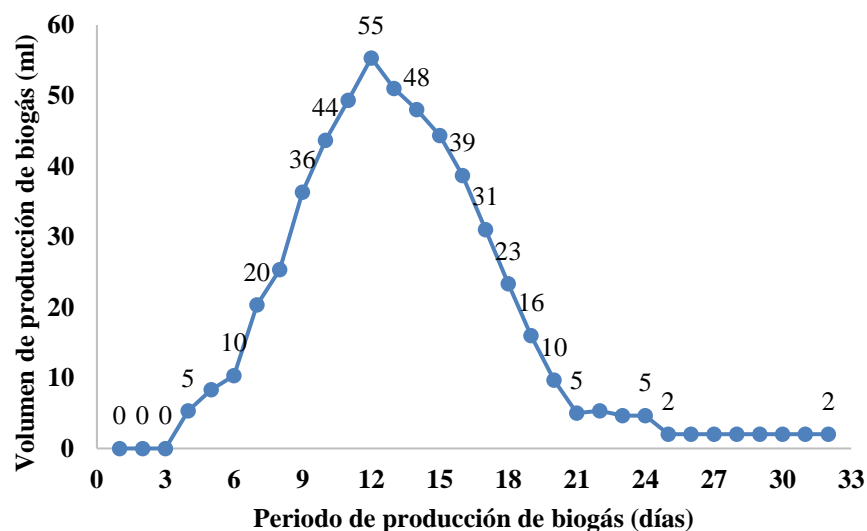


Figura 13. Comportamiento de la producción de biogás durante el periodo experimental en la dilución 1 (1:2).

En la figura 13, se muestra que la producción de biogás inició lentamente durante los tres primeros días, debido a la fase de adaptación microbiana (fase de latencia). Posteriormente, entre los días 5 y 13, se observa una fase de crecimiento exponencial, alcanzando el máximo pico de producción con un valor de 55ml/día en el día 12, lo cual indica una alta actividad metanogénica. A partir del día 14, la producción comenzó a disminuir progresivamente hasta estabilizarse en valores bajos cercanos a 2 ml/día, culminando el proceso de producción de biogás en el día 32, con un volumen total acumulado de 552 ml. Este comportamiento coincide con lo reportado por Tancara Montoya (2025), quien al evaluar el estiércol de porcino bajo la misma proporción de dilución 1:2 obtuvo un comportamiento muy similar, donde una fase inicial lenta, seguida de un incremento progresivo y un pico de 58ml/día en el día 15, con una producción total de 560 ml de biogás en 34 días. Las diferencias observadas entre ambos estudios, tanto en el día de mayor producción como en el volumen acumulado. Son mínimas y pueden explicarse porque los parámetros fisicoquímicos se encuentran dentro de rangos comparables, el autor reporta un pH entre 6.99 entre 7.51, mientras que en esta dilución se registró un pH inicial de 6.9. y final de 7.35, acompañado de una temperatura mesófila estable.

4.3.4. Dilución 2

En la tabla 11, la dilución 2, conformada por estiércol de porcino y agua en una proporción de 1:3, se registró una producción total de biogás de 482 ml (100%), lo que representa una ligera disminución respecto a la dilución 1, del cual el 62 % (298.84 ml) correspondieron a metano (CH₄) y 37.99 % (182.95 ml) a dióxido de carbono (CO₂) y el 0.0005 % sulfuro de hidrógeno (H₂S).

Tabla 11. Volumen total de biogás y composición porcentual de gases en la dilución 2 (1:3).

Elemento	Volumen (ml)	Porcentaje (%)
Biogás	482	100
Metano	298.84	62
Dióxido de Carbono	182.95	37.9995
Sulfuro de hidrogeno	0.00241	0.0005

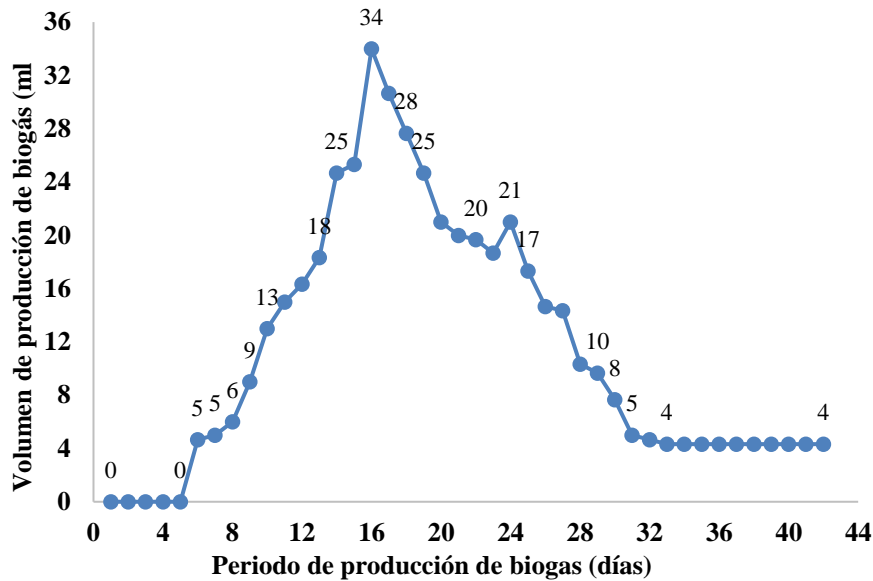


Figura 14. Comportamiento de la producción de biogás durante el periodo experimental en la dilución 2 (1:3).

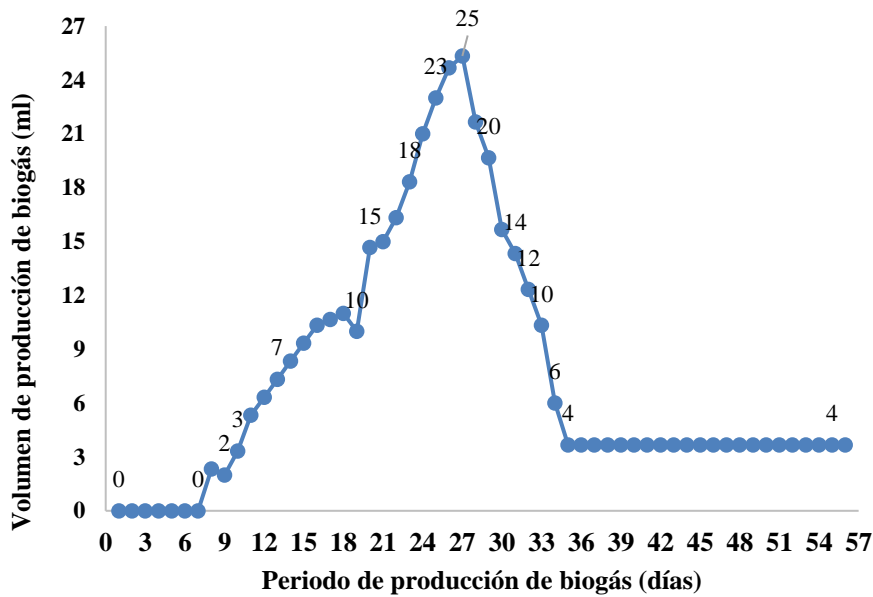
En la figura 14 se aprecia que la producción de biogás en la dilución 2 inicio con una fase de latencia durante los primeros días, ya que los microorganismos anaerobios requieren un tiempo de adaptación cuando trabajan en un medio más diluido, y conforme avanza el proceso, entre los días 6 y 15, se observó una fase de crecimiento exponencial donde se alcanzó un pico máximo de 48 ml/día alrededor del día 14, mientras que después del día 16 la producción comenzó a disminuir de manera progresiva hasta finalizar en el día 42, lo cual coincide con lo reportado por Castro et al (2020), quienes indican que con la dilución 1:3 obtuvieron una producción total de 488 ml durante 40 días, muy similar a los 482 ml registrados con este estudio, y además reportaron un tasa de rendimiento al día de 12.2 ml/día.

4.3.5. Dilución 3

En la dilución 3, conformada por estiércol de porcino y agua en una proporción de 1:4, se registró una producción total de 425 ml de biogás, representando el menor volumen entre las diluciones evaluadas. De este total, 56 % (238 ml) correspondieron a metano (CH_4) y 43.99 % (186.96 ml) a dióxido de carbono (CO_2) y el 0.0005 % sulfuro de hidrógeno (H_2S).

Tabla 12. Volumen total de biogás y composición porcentual de gases en la dilución 3 (1:4).

Elemento	Volumen (ml)	Porcentaje (%)
Biogás	425	100
Metano	238	56
Dióxido de Carbono	186.96	43.99
Sulfuro de hidrogeno	0.0023	0.00054

**Figura 15.** Comportamiento de la producción de biogás durante el periodo experimental en la dilución 3 (1:4)

En la figura 15, muestra que la producción de biogás en esta dilución inició con una fase lenta más prolongada en comparación con las anteriores diluciones, debido a la baja concentración de materia orgánica disponible para los microorganismos anaerobios. Entre los días 8 y 18, se observó una fase de crecimiento moderado, alcanzando el máximo pico de producción (40 ml/día) alrededor del día 16. A partir de este punto, la generación de biogás disminuyó gradualmente hasta estabilizarse hacia el día 56, reflejando un proceso de digestión más lento y con menor rendimiento energético. Este comportamiento contrasta parcialmente con lo reportado por N'guessan et al. (2025), quienes, al utilizar una dilución 1:4 en biodigestores de 1600 L operados durante el mismo periodo, obtuvieron una producción considerable de biogás (22.63 y 16.31 m³) bajo condiciones estables de pH (6.9–7.3), mejorando posteriormente la calidad del biogás mediante un biofiltro que elevó la

concentración de metano hasta 80–82 %. En conjunto, mientras en el presente estudio la mayor dilución redujo el rendimiento por la limitada carga orgánica, N’guessan et al. demostraron que la dilución 1:4 puede ser eficiente cuando se opera en condiciones controladas y a mayor escala.

4.3.6. Comparación de volúmenes de biogás y metano.

Tabla 13. Comparación de los volúmenes de biogás y metano en el testigo y las diluciones.

Muestras	Volumen total de biogás (ml)	Volumen de CH ₄ (ml)
Testigo 2	41	5.74
Dilución 1 (1: 2)	552	397.44
Dilución 2 (1:3)	482	298.84
Dilución 3 (1:4)	425	238

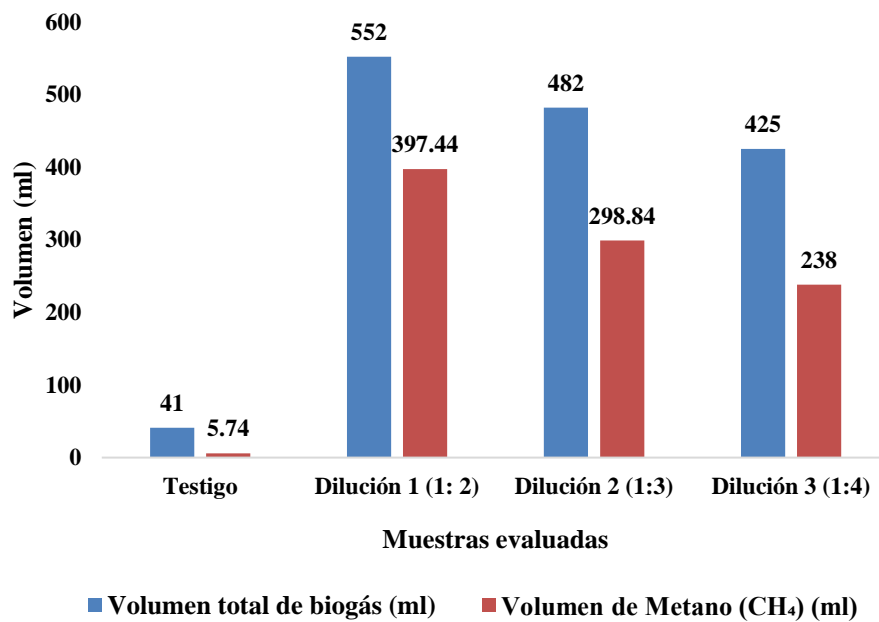


Figura 16. Comparaciones de los volúmenes de biogás y metano en el testigo y diluciones.

En la figura 16, se observa la comparación de las muestras evaluadas, donde el testigo sin dilución presentó la menor producción, con 41 ml de biogás y 5.74 ml de metano (CH₄), evidenciando condiciones insuficientes para la digestión anaerobia; en contraste, la dilución 1 (1:2) alcanzó el mayor rendimiento con 552 ml de biogás y 397.44 ml de metano (CH₄), superando a las dilución 2 (1:3) con 482 ml de biogás y 298.84 ml de metano (CH₄), y la dilución 3 (1:4) con 425 ml de biogás y 238 ml de metano (CH₄). Esto indica que una mayor concentración de materia orgánica favorece la generación de metano. Esto indica que una mayor concentración de materia orgánica favorece la generación de metano. Estos resultados

coinciden parcialmente con Castro et al. (2020), quienes en una dilución 1:3 obtuvieron 488 ml de biogás con 64 % de metano, demostrando que diluciones intermedias mantienen una buena producción. Sin embargo, la marcada disminución observada en la dilución 1:4 concuerda con N'guessan et al. (2025), quienes señalan que las diluciones más altas reducen el rendimiento energético por la baja disponibilidad de sustrato. Por ello, la dilución 1:2 es la más eficiente para maximizar biogás y metano en condiciones de laboratorio.

4.3.7. Tasa de rendimiento del biogás y metano

La tabla 14, muestra la tasa de rendimiento diario de biogás y metano obtenida en el testigo 2 y en las diferentes diluciones de estiércol, donde la dilución 1 (1:2) presentó una mayor tasa de rendimiento, mientras que el testigo 2 presentó los valores más bajos y las diluciones 1:3 y 1:4 evidenciaron una disminución progresiva del rendimiento, indicando que una dilución moderada favorece la producción de biogás y metano.

Tabla 14. Tasa de rendimiento de biogás y metano en el testigo y diluciones

Muestras	Tasa de rendimiento (ml/día)	
	Biogás	Metano
Testigo 2	3.14	1.07
Dilución 1 (1:2)	17.25	12.42
Dilución 2 (1:3)	11.48	7.12
Dilución 3 (1:4)	7.59	4.25

Fuente: Elaboración propia

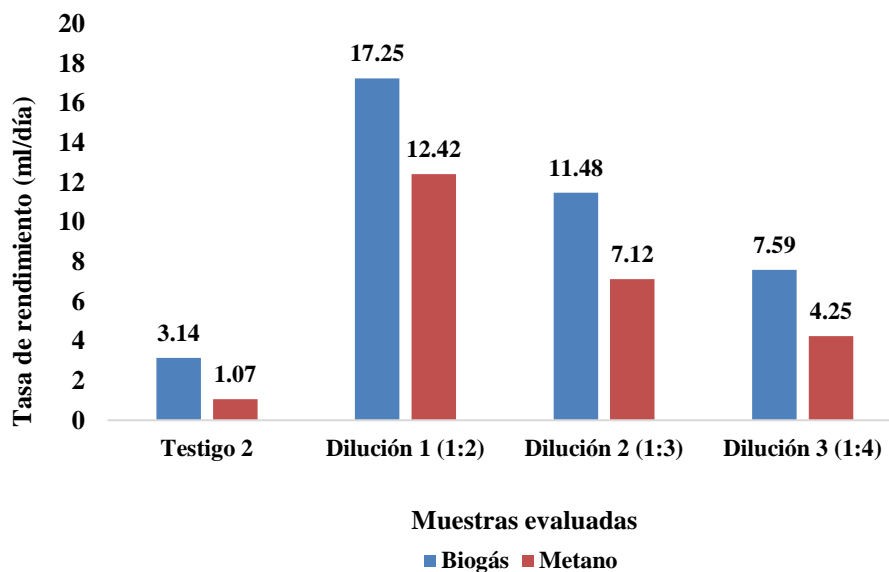


Figura 17. Comparación de la tasa de rendimiento del biogás y metano.

La tabla 14 y figura 17, evidencia que la dilución 1 (1:2) obtuvo la mayor tasa de producción diaria de biogás y metano (17.25 y 12.42 ml/día), mientras que la dilución 2 (1:3) y la dilución 3 (1:4) mostraron reducciones progresivas en ambos gases, lo que demuestra que al aumentar la cantidad de agua disminuye la concentración de materia orgánica disponible para la degradación microbiana y, por tanto, la eficiencia del proceso; este comportamiento concuerda con lo señalado por Castro et al. (2020), quienes indican que mezclas más diluidas reducen la disponibilidad de sustrato y ralentizan la metanogénesis, mientras que proporciones más concentradas favorecen una mayor actividad microbiana y un rendimiento superior, lo cual se refleja en este estudio donde la dilución 1:2 se confirma como la opción más eficiente para maximizar la generación de biogás y metano.

4.4. Análisis estadístico

Tabla 15. Análisis de Varianza (ANOVA)

FV	GL	15 días		30 días		45 días		56 días	
		CM	P valor	CM	P valor	CM	P valor	CM	P valor
Tratamiento	3	84442.31	<0.0001	141582.78	<0.0001	153956.08	0.0001	156796.22	0.0006
Error	8	72.67		185.22		297.78		369.89	
Total	11								

En la tabla 15, el ANOVA muestra que existen diferencias significativas entre las diluciones en todos los tiempos evaluados (15, 30, 45 y 60 días), ya que los valores de p valor fueron menores a 0.05. Esto indica que la producción de biogás varió de manera significativa según la dilución utilizada, demostrando que el nivel de dilución del estiércol influye directamente en el rendimiento del biogás durante todo el proceso.

Tabla 16. Prueba de Tukey

Diluciones	15 días		30 días		45 días		56 días	
	Media	Sig.	Media	Sig.	Media	Sig.	Media	Sig.
D1 (1:2)	397.67	A	548	A	552	A	552	A
D2 (1:3)	137.33	B	428.67	B	481.67	B	481.67	B
D3 (1:4)	44.33	C	301.67	C	385	C	425.33	C
Testigo 2	41	D	41	D	41	D	41	D

La tabla de medias evidencia que cada dilución presentó diferencias estadísticas significativas entre sí, ya que no comparten letras en ningún tiempo de evaluación. La dilución 1:2 obtuvo las medias más altas y se ubicó en el grupo “A”, mientras que la dilución 1:3 se agrupó en “B” y la 1:4 en “C”, confirmando que las diluciones más concentradas generan mayor producción de biogás y que la diferencia entre ellas es estadísticamente significativa.

V. CONCLUSIONES

Los parámetros fisicoquímicos del estiércol de porcino (*Sus scrofa domesticus*) indicaron variaciones significativas durante el proceso de digestión anaerobia, principalmente en el pH, la relación de C: N y la humedad, las cuales estuvieron vinculados a la dilución del sustrato y al desarrollo de la actividad microbiana, interviniendo en la producción de biogás.

El periodo de producción de biogás presento variaciones según la condición del sustrato, se registraron 13 días en el testigo 2 (estiércol sin diluir), 32 días en la dilución 1:2, 42 días en la dilución 1:3 y 56 días en la dilución 1:4, evidenciándose que el grado de dilución del estiércol influye de manera directa en la duración del proceso de digestión anaerobia.

La dilución 1:2 mostró la mayor tasa de rendimiento de biogás y metano, produciendo un mayor volumen diario en comparación con las demás diluciones, por lo que se determinó con la proporción óptima a nivel de laboratorio.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

Medir los parámetros fisicoquímicos del estiércol de porcino antes, durante y después de la digestión anaerobia, para conocer cómo cambian a lo largo del tiempo.

Tener un manejo cuidadoso del biodigestor y gasómetro para evitar fugas del biogás producido, ya que cualquier escape malogra la evaluación diaria de la producción de biogás, alterando los resultados producidos en el gasómetro.

Aplicar dilución 1:2 en estudios a escala mayor, ya que permite obtener un mayor volumen y calidad de biogás, lo que facilita su uso como fuente energética para gas en el hogar o para generación de luz.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abubakar, A. M., Khursheed, A., Tariq, M., & Haruna, N. M. (2023). Microbe-substrate and gas-microbe interaction factors in relation to liquid manure anaerobic digestion and crop productivity Factores de interacción microbio-sustrato y gas-microbio en relación con la digestión anaeróbica del estiércol líquido y la productividad del cultivo. *Revista Científica*, 3(1), e132. <https://doi.org/10.55204/trc.v3i1.e132>
- Acarley, F., & Quipuzco, L. (2020). Producción de metano mediante digestión anaerobia de aguamiel, subproducto del beneficio húmedo del café. *Agroindustrial Science*, 10(1), 7-16. <https://hdl.handle.net/10495/36042>
- Acosta Clavijo, J. M., & Muñoz Santana, L. A. (2020). Implementación de un biodigestor para la obtención de biogas a partir de los excrementos de los animales de granja ubicada en el cantón Salcedo (Bachelor's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi; Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.). <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6834>
- Atienza Lama, I. (2024). Aprovechamiento energético de los residuos agroalimentarios en la región de Huelva. <http://hdl.handle.net/11531/83706>
- Avila Riaños, J. F., & Contreras Ariza, Ó. D. (2024). Diseño de estrategias para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en el Frigorífico Guadalupe SAS con base en los principios de economía circular con una perspectiva de ganadería sostenible. <https://doi.org/10.57998/bdigital/handle.001.2611>
- Barragán Torres, R. A. (2024). *Comparación de tres tratamientos (aerobia, anaerobia y combinado) para la descomposición de materia orgánica en la obtención de biogás y biofertilizante en el Ecuador* (Bachelor's thesis, Babahoyo, Ecuador). <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/17134>

- Barrena Gurbillón, M. Á., Maicelo, J. L., Gamarra Torres, O. A., Oliva, M., Leiva, S. T., Taramona Ruiz, L. A., Huanes, M. Á., & Ordinola, C. M. (2020). *Biogás: Producción y aplicaciones*. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. <https://hdl.handle.net/20.500.14546/59>
- Cadena-Iñiguez, P., Rendón-Medel, R., Aguilar-Ávila, J., Salinas-Cruz, E., Cruz-Morales, F. D. R. D. L., & Sangerman-Jarquín, D. M. (2020). Métodos cuantitativos, métodos cualitativos o su combinación en la investigación: un acercamiento en las ciencias sociales. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(7), 1603-1617. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342017000701603&lng=es&tlng=es
- Cadillo Garay, L. Y., & Ramos Rico, N. R. (2020). Evaluación de la composición del biogás proveniente de residuos orgánicos del camal municipal en un biodigestor tubular, Huallanca, Ancash-2019. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/62696>
- Camargo Vega, L. J., & Cobos Molano, C. (2023). Simulación y modelamiento de la producción secuencial de biogás e hidrógeno a partir de la pulpa de café, por medio de la digestión anaerobia utilizando herramientas computacionales. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9160>
- Carreño-Vesga, J. P. (2023). Pretratamiento de Biomasa Lignocelulósica de los Desechos Agrícolas del Cacao Para la Producción de Biogás en una Finca Cacaotera. <https://repositorio.udes.edu.co/handle/001/8251>
- Condori Quispe, M. F., & Sucasaca Mamani, J. A. (2022). *Obtención de biogás de estiércol porcino y restos vegetales por fermentación semicontinua* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/3311>

- Córdoba, V., Ibarlucía, D., & Santalla, E. (2022). Desarrollo y validación de un mecanismo para remover CO₂ y cuantificar la producción de CH₄ en sistemas de digestión anaeróbica. *Revista RedBioLAC*, 6(1), 40-45. <http://revistaredbiolac.org/index.php/revistaredbiolac/article/view/26>
- Cosi Fuentes, D. P. (2025). Producción de biogás a base de estiércol de cerdo en la región de Tacna. *Ciencia y Educación*, 6(7.1), 39–45. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16411931>
- Duan, N., Wang, H., Zhou, Q., & Zhang, Z. (2019). Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of pig manure: Methane production, mass flow, reactor scale and heating scenarios. *Journal of Environmental Management*, 231, 646–652. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.062>
- Ernholm, L., Ståhl, K., Neimanis, A., Widgren, S., & Sternberg-Lewerin, S. (2023). Understanding the interface between European wild boar (*Sus scrofa*) and domestic pigs (*Sus scrofa domesticus*) in Sweden through a questionnaire study. *Acta Veterinaria Scandinavica*, 65, Article 40. <https://doi.org/10.1186/s13028-023-00705-x>
- Espinoza Felix, N., Cabañas Oyarce, M., & Moreno Cuya, G. T. (2023). El balance carbono/nitrógeno de los residuos de césped y fruta en la aceleración del compostaje, Lurigancho-Lima, 2023. <https://hdl.handle.net/20.500.12952/8891>
- Falcón Ramírez, I. V. (2017). Diseño de sistema productivo sostenible para la obtención de energía, abonos orgánicos y mejoramiento de agua residual, en la granja retama del Distrito de Huánuco. <https://repositorio.unheval.edu.pe/handle/20.500.13080/1723>
- Fan, X., Liu, J., Liu, Z., Zhang, S., Qian, X., & Chen, Y. (2023). *Effects of turning frequency on nitrogen loss and humification during pig-manure composting*. *Agronomy*, 13(12), 2916. <https://doi.org/10.3390/agronomy13122916>
- Geney Reyes, L. M., Rojas Gutiérrez, C. F., & Mendoza Geney, A. J. (2023). Estudio de la viabilidad técnica y ambiental para la valorización de residuos orgánicos producidos en

- la plaza de mercado de Corabastos-Bogotá a través del proceso de digestión anaerobia. <https://digitk.areandina.edu.co/handle/areandina/5653>
- Huarac Cadillo, K. J., & More Peña, M. N. (2022). *Aprovechamiento de estiércol porcino en la producción de biogás obtenido en tres diferentes tratamientos en el Centro Poblado de Retes* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional. <http://hdl.handle.net/20.500.14067/10455>
- Hurtado Villegas, J. (2020). Evaluación del efecto acelerador de microorganismos transformadores de materia orgánica (TMO) en el proceso de compostaje de las deyecciones de bovinos, porcinos y conejos. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/1901>
- Lijarza Galvez, Y. I. (2022). Producción de biogás a partir de la cascara del fruto del cacao (*Theobroma cacao* L.) a nivel de laboratorio. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2352>
- López-Reyes, N., Ábrego-García, A., & Poggi-Varaldo, H. M. (2022). Mecanismos de inhibición de la metanogénesis con lovastatina y análisis de la expresión génica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 58-67. <https://doi.org/10.20937/RICA.54357>
- López Zawada, S., & Moreno Ospina, Y. (2020). Potencialidades agroindustriales y ambientales del biocarbón a partir de la pulpa de café como alternativa sostenible de la economía circular. <https://hdl.handle.net/11059/12116>
- Martínez Torres, E. J. (2023). La transformación de los residuos, una clave para la producción de energía. *Ambiociencias*, (21), 93-110. <https://doi.org/10.18002/ambioc.i21.8186>
- Mazeh, H. (2022). *Planta de Biogás: Construcción y producción a partir de desechos de animales y cultivos por digestión anaeróbica* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

- Meier, C. O. (2024). Evaluación de poblaciones de microorganismos del ciclo del nitrógeno en suelo bajo cultivo de raigrás fertilizado con digeridos anaeróbicos procedentes de la producción de biogás. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/7000>
- Morales Álvarez, P. A. (2024). Propuesta de implementación de pacas biodigestoras para la degradación de los residuos sólidos orgánicos en la Granja Naranja. <https://hdl.handle.net/20.500.14625/37675>
- Mosquera, A. M., Delgado, J. M., Ramón, A. A., Vásquez, J. E., & Peñuela, M. (2024). *Evaluation of Biogas Production from Swine Manure Using a UASB Reactor with Long-Term Operation*. *Energies*, 17(11), 2723. <https://doi.org/10.3390/en17112723>
- Muñoz-Menéndez, M. B., Santos-Herrero, R. F., Contreras-Moya, A. M., Regla-Domínguez, E. R., & Cárdenas-Ferrer, T. (2020). Análisis del proceso de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuos sólidos urbanos de Manta, Ecuador: Artículo de investigación. *Revista Científica Multidisciplinaria SAPIENTIAE*. ISSN: 2600-6030, 3(6), 65-83. <https://publicacionescd.ulead.edu.ec/index.php/sapientiae/article/view/120>
- N'guessan, A. R., Tra Bi, Y. C., Yapo, E. G., Koffi, A. R. H., Yebouet, F. O., Campitelli, A., Aka, B., & Djeni, N. T. (2025). *Enhanced Biogas Production and Pathogen Reduction from Pig Manure Through Anaerobic Digestion: A Sustainable Approach for Urban Waste Management in Abidjan, Côte d'Ivoire*. *Clean Technologies*, 7(4), 89. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol7040089>
- Nikhila, K.P.S.N., Raja, K., Lakshmi, M.S., Kumar, R.V.S., Damini, V., Rao, T.S.C., Supriya, B., & Chakravarthy, M.K. (2024). *Histomorphological studies on the vomeronasal organ in domestic pig (Sus scrofa domesticus)*. *Journal of Veterinary and Animal Sciences*, 55(2), 432–439. <https://doi.org/10.51966/jvas.2024.55.2.432-439>
- Nieto, E. (2018). Tipos de investigación. *Universidad Santo Domingo de Guzmán*, 2, 1-2.

- Ortega Pons, E. (2024). Optimización de la co-digestión anaerobia del alperujo con purines de cerdo (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). <http://hdl.handle.net/2117/414814>
- Padilla Reyes, C. I. (2024). Uso de microorganismos nativos para el proceso de biodegradación de desechos orgánicos provenientes de la producción de animales de la granja PUCE-I (Doctoral dissertation, PUCE Ibarra). <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/44546>
- Pegoraro, V., Bachmeier, O., Lorenzon, C., Conde, B., Ortiz, J., Barbosa, A., & Zubillaga, M. (2023). Cambios en los atributos del suelo por aplicación continua de efluente porcino. *Ciencia del suelo*, 41(2), 261-272. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S185020672023000200261&lng=es&tlng=es
- Peña Ocaña, B. A. (2021). ANÁLISIS DEL MICROBIOMA DEL LAGO CRATÉRICO DEL VOLCÁN EL CHICHÓN: UN ENFOQUE MULTIÓMICO. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/4716>
- Pérez-Kast, R. C., Castro-Cortéz, H. D., Lozano-Tavárez, A., Arreguín-Coronado, A., Urias-Orona, V., & Castro-García, H. (2021). Dieta cetogénica como alternativa en el tratamiento de la obesidad: un estudio de revisión bibliográfica. *Revista Salud Pública y Nutrición*, 20(3), 46-57. <https://doi.org/10.29105/respyn20.3-6>
- Producción de biogás a partir de la mezcla del estiércol del ganado ovino con microorganismos eficientes a escala de un biodigestor, para su utilización como fuente de energía renovable, en las zonas ganaderas del distrito de Ninacaca (2020). <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2626>

- Reyes Castañeda, L. A., & Neria González, M. I. (2024). Efecto de la cetosis en la aterosclerosis. *Revista De divulgación científica IBIO*, 6(1), 166. <https://revistaibio.com/ojs33/index.php/main/article/view/166>
- Sanchez Manayay, J. D. (2023). Diseño de un sistema energético autosustentable mediante la biodigestión de residuos orgánicos para el abastecimiento de energía eléctrica en el mercado Modelo-Chiclayo. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/7230>
- Simón Amorós, M. (2024). Estudio Experimental y Viabilidad Económica de la Digestión Anaerobia de Residuos Agropecuarios. <http://hdl.handle.net/10045/145820>
- Sofokleous, M., Christofi, A., Malamis, D., Mai, S. y Barampouti, EM (2022). Producción de bioetanol y biogás: una vía de valorización alternativa para los residuos verdes. *Chemosphere* , 296 , 133970. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133970>
- Tancara Montoya, Y. R. (2025). *Producción de biogás a partir de estiércol de cuy, pollo y cerdo en el distrito de Inclán*. *Ciencia y Educación*, 6(7.1), 76–82. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16412751>
- Tejedor Tejedor, F. J. (2023). El término de error experimental en los modelos estadísticos de análisis de varianza. Condiciones subyacentes en el ANVA referidas a la variable aleatoria. *Revista Española de Pedagogía*, 37(145), 6. <https://www.revistadepedagogia.org/rep/vol37/iss145/6>
- Triviño Pineda, J. S., Reyes, C. Y., & Sánchez Ramírez, J. E. (2021). Subproductos generados en el tratamiento y valorización de residuos sólidos urbanos dentro del concepto de biorrefinería: una revisión sistemática. *Ingeniería Y Región*, 25, 60–74. <https://doi.org/10.25054/22161325.2783>

- Trujillo Astudillo, J. M., & Quito Heredia, J. P. (2024). *Propuesta de factibilidad de obtener biogás con desechos orgánicos de manera artesanal en hogares de la Ciudad de Guayaquil* (Bachelor's thesis). <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27513>
- Vazquez Gomez, E. A. (2020). *Utilización de vinazas como sustratos en biorreactores UASB y EGSB* (Master's thesis, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas). <https://hdl.handle.net/20.500.12753/1477>
- Vazquez, J. M. (2023). Potencial aprovechamiento de residuos pecuarios para la producción de Biogás como aporte a la diversificación de la matriz energética y como acción de mitigación contra el cambio climático en el Departamento Confluencia, Provincia de Neuquén. <http://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/17103>
- Vanegas, M., Romani, F., & Jiménez, M. (2022). *Pilot-scale anaerobic digestion of pig manure with thermal pretreatment: Stability monitoring to improve the potential for obtaining methane*. *Processes*, 10(8), 1602. <https://doi.org/10.3390/pr10081602>

VIII. ANEXOS

ANEXO A. Datos registrados

Tabla 17. Datos registrados diariamente de la producción de biogás.

Día	Testigo (estiércol)			Promedio	Acumulación	Dilución 1 (1.2)			Promedio	Acumulación	Dilución 2 (1.3)			Promedio	Acumulación	Dilución 3 (1.4)			Promedio	Acumulación
	R1	R2	R3			R1	R2	R3			R1	R2	R3			R1	R2	R3		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	2	0	2	1	1	6	5	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	4	2	2	3	4	9	8	8	8	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	4	2	4	3	7	10	11	10	10	24	5	5	4	5	5	0	0	0	0	0
7	8	6	6	7	14	22	20	19	20	44	5	5	5	5	10	0	0	0	0	0
8	8	8	8	8	22	25	25	26	25	70	7	6	5	6	16	2	2	3	2	2
9	6	7	8	7	29	38	36	35	36	106	10	9	8	9	25	2	2	2	2	4
10	4	6	4	5	34	46	44	41	44	150	14	13	12	13	38	4	3	3	3	8

11	2	4	4	3	37	52	50	46	49	199	16	15	14	15	53	6	5	5	5	13
12	2	2	2	2	39	55	56	55	55	254	17	16	16	16	69	7	6	6	6	19
13	2	2	2	2	41	50	52	51	51	305	19	18	18	18	87	8	7	7	7	27
14	0	0	0	0	41	50	48	46	48	353	25	24	25	25	112	9	8	8	8	35
15	0	0	0	0	41	47	44	42	44	398	26	25	25	25	137	10	9	9	9	44
16	0	0	0	0	41	41	39	36	39	436	35	33	34	34	171	11	10	10	10	55
17	0	0	0	0	41	33	31	29	31	467	30	32	30	31	202	11	11	10	11	65
18	0	0	0	0	41	25	23	22	23	491	28	27	28	28	230	11	11	11	11	76
19	0	0	0	0	41	17	16	15	16	507	25	24	25	25	254	10	10	10	10	86
20	0	0	0	0	41	10	9	10	10	516	22	20	21	21	275	15	14	15	15	101
21	0	0	0	0	41	5	5	5	5	521	20	21	19	20	295	16	15	14	15	116
22	0	0	0	0	41	5	5	6	5	527	20	20	19	20	315	17	16	16	16	132
23	0	0	0	0	41	5	4	5	5	531	19	19	18	19	334	19	18	18	18	151
24	0	0	0	0	41	5	4	5	5	536	22	21	20	21	355	20	22	21	21	172
25	0	0	0	0	41	2	2	2	2	538	18	16	18	17	372	23	24	22	23	195
26	0	0	0	0	41	2	2	2	2	540	15	14	15	15	387	25	24	25	25	219

27	0	0	0	0	41	2	2	2	2	542	15	13	15	14	401	26	25	25	25	245
28	0	0	0	0	41	2	2	2	2	544	10	11	10	10	411	23	22	20	22	266
29	0	0	0	0	41	2	2	2	2	546	10	9	10	10	421	20	20	19	20	286
30	0	0	0	0	41	2	2	2	2	548	8	8	7	8	429	15	16	16	16	302
31	0	0	0	0	41	2	2	2	2	550	5	5	5	5	434	15	14	14	14	316
32	0	0	0	0	41	2	2	2	2	552	5	5	4	5	438	13	12	12	12	328
33	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	5	4	4	4	443	10	11	10	10	339
34	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	5	4	4	4	447	7	6	5	6	345
35	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	5	4	4	4	451	4	4	3	4	348
36	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	5	4	4	4	456	4	4	3	4	352
37	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	5	4	4	4	460	4	4	3	4	356
38	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	5	4	4	4	464	4	4	3	4	359
39	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	5	4	4	4	469	4	4	3	4	363
40	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	5	4	4	4	473	4	4	3	4	367
41	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	5	4	4	4	477	4	4	3	4	370
42	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	5	4	4	4	482	4	4	3	4	374

43	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	378
44	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	381
45	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	385
46	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	389
47	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	392
48	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	396
49	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	400
50	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	403
51	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	407
52	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	411
53	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	414
54	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	418
55	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	422
56	0	0	0	0	41	0	0	0	0	552	0	0	0	0	482	4	4	3	4	425

Tabla 18. Porcentaje de metano (CH₄) en el testigo y las diluciones del estiércol de porcino.

Muestras	Metano (CH ₄) %			Promedio (%)
	R1	R2	R3	
Testigo	14	13	15	14
Dilución 1 (1: 2)	71	73	72	72
Dilución 2 (1:3)	63	61	62	62
Dilución 3 (1:4)	56	54	58	56

Tabla 19. Porcentaje de dióxido de carbono (CO₂) en el testigo y las diluciones.

Muestras	Dióxido de carbono (CO ₂) ppm			Promedio (ppm)	Promedio (%)
	R1	R2	R3		
Testigo	859995	869994	849994	859994	85.9994
Dilución 1 (1: 2)	289995	269994	279995	279995	27.9995
Dilución 2 (1:3)	369994	389994	379994	379994	37.9994
Dilución 3 (1:4)	439994	459996	419995	439995	43.99

Tabla 20. Porcentaje de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en el testigo y las diluciones.

Muestras	Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) ppm			Promedio (ppm)	Promedio (%)
	R1	R2	R3		
Testigo	5.74	5.71	5.69	5.7133	0.000571
Dilución 1 (1: 2)	5.39	5.41	5.36	5.385	0.000538
Dilución 2 (1:3)	5.82	5.71	5.78	5.75	0.000575
Dilución 3 (1:4)	5.44	5.43	5.5	5.47	0.000547

Tabla 21. Porcentaje final del biogás (CH₄, CO₂ y H₂S) en el testigo y las diluciones.

Muestras	% Metano (CH ₄)	Dióxido de carbono (CO ₂)	Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)
Testigo	14	85.99	0.000571
Dilución 1 (1: 2)	72	27.99	0.000538
Dilución 2 (1:3)	62	37.99	0.000575
Dilución 3 (1:4)	56	43.99	0.000547

ANEXO B. Análisis estadístico**Tabla 22.** Análisis de varianza (ANOVA) para la producción de biogás a los 15 días.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	248511.71	3	82837.24	14641.48	<0.0001
Error	45.26	8	5.66		
Total	248556.97	11			

Tabla 23. Prueba de Tukey para la producción de biogás a los 15 días.

Muestras	Medias	n	E.E.	
D1 (1:2)	397.67	3	4.92	A
D2 (1:3)	137.33	3	4.92	B
D3 (1:4)	44.33	3	4.92	C
Testigo	41	3	4.92	D

Tabla 24. ANálisis de varianza (ANOVA) para la producción de biogás a los 30 días.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	418585.72	3	139528.57	4790.50	<0.0001
Error	233.01	8	29.13		
Total	418818.73	11			

Tabla 25. Prueba de Tukey para la producción de biogás a los 30 días.

Muestras	Medias	n	E.E.	
D1 (1:2)	548	3	7.86	A
D2 (1:3)	428.67	3	7.86	B
D3 (1:4)	301.67	3	7.86	C
Testigo	41	3	7.86	D

Tabla 26. Análisis de varianza (ANOVA) para la producción de biogás a los 45 días.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	459826.56	3	153275.52	2845.83	0.0001
Error	430.67	8	53.83		
Total	460257.23	11			

Tabla 27. Prueba de Tukey para la producción de biogás a los 45 días

Muestras	Medias	n	E.E.			
D1 (1:2)	552	3	9.96	A		
D2 (1:3)	481.67	3	9.96		B	
D3 (1:4)	385	3	9.96			C
Testigo	41	3	9.96			D

Tabla 28. Análisis de varianza (ANOVA) final a los 56 días.

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Tratamiento	470047.56	3	156682.52	2468.52	0.0006
Error	507.78	8	63.47		
Total	470555.34	11			

Tabla 29. Producción final acumulada de biogás y prueba de Tukey a los 56 días.

Tratamiento	Medias	n	E.E.			
T1 (1:2)	552	3	11.1	A		
T2 (1:3)	481.67	3	11.1		B	
T3 (1:4)	385	3	11.1			C
Testigo	41	3	11.1			D

ANEXO C. Panel fotográfico**Figura 18.** Recolección del estiércol de porcino.**Figura 19.** Muestras para los análisis fisicoquímicos iniciales.



Figura 20. Medición de la humedad.



Figura 21. Secado de la muestra.

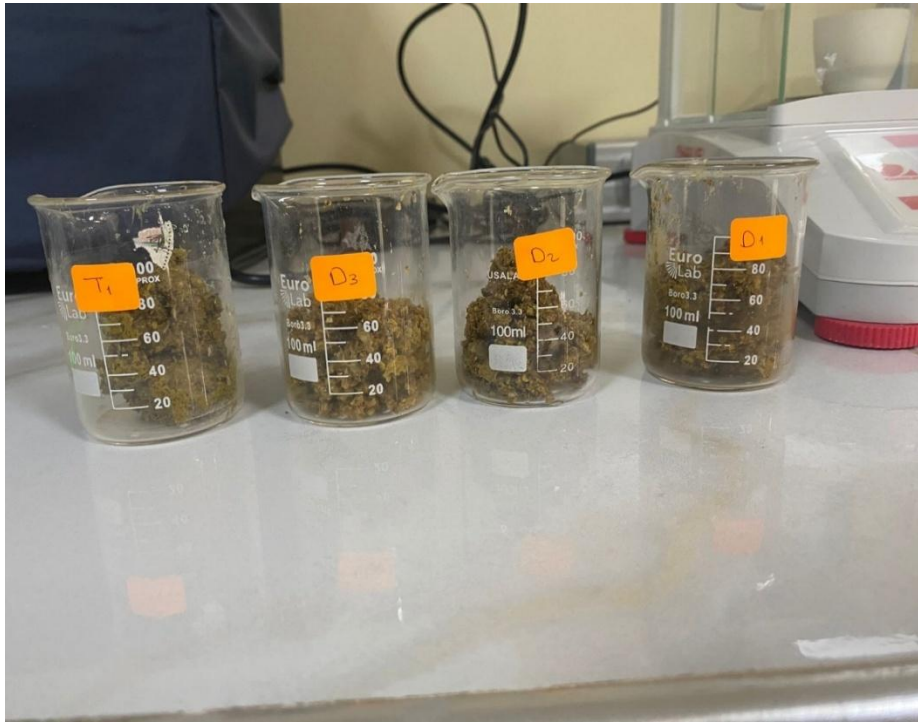


Figura 22. Rotulación de las muestras del testigo y diluciones.



Figura 23. Medición de la relación de C: N.



Figura 24. Medición del potencial de hidrógeno (pH).



Figura 25. Secado de las muestras en la estufa.

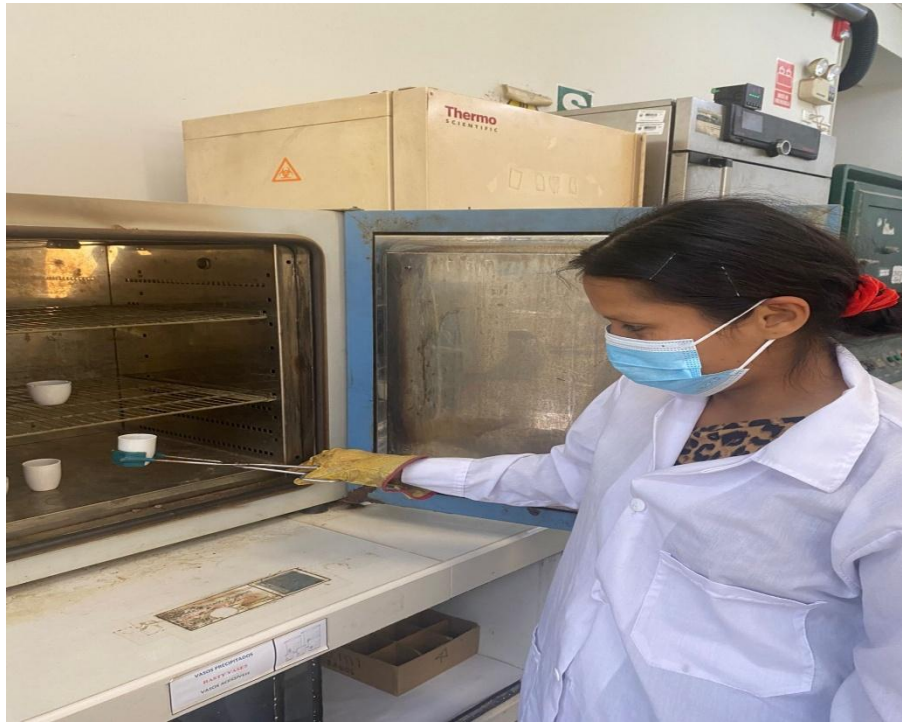


Figura 26. Retiro de las muestras de la estufa.



Figura 27. Peso final después del secado de las muestras.



Figura 28. Pesado del estiércol de porcino para cada dilución.



Figura 29. Dilución para cada relación de estiércol: agua.



Figura 30. Cada dilución introducida en las botellas de 3L.



Figura 31. Instalación de las muestras.



Figura 32. Temperatura ambiente monitoreo.



Figura 33. Verificación de la producción diaria de biogás.



Figura 34. Registro diario de la producción de biogás.



Figura 35. Medición de los gases finales con el analizador portátil de biogás.

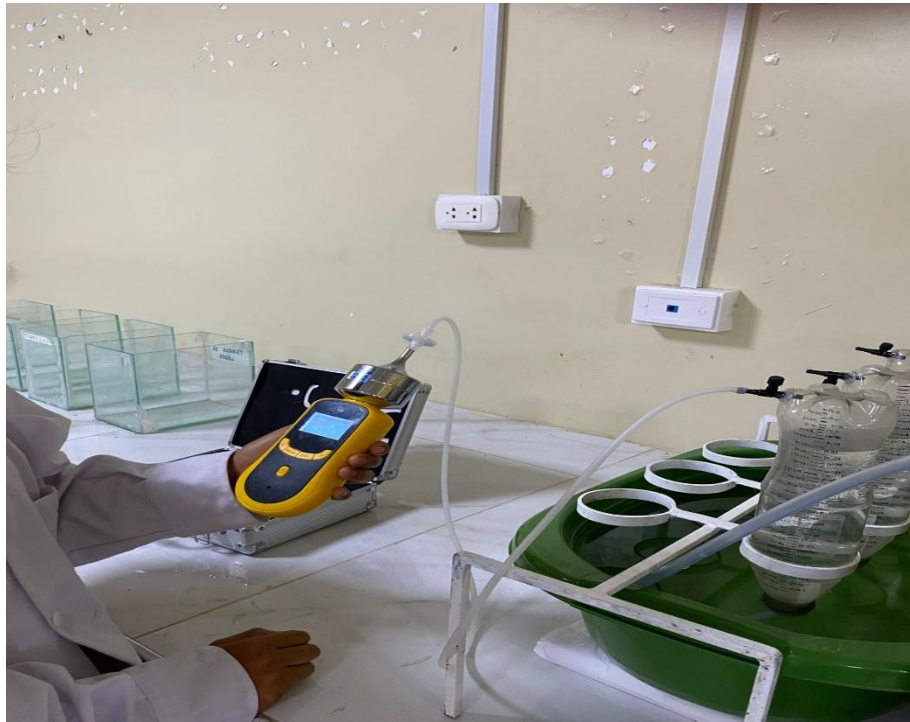


Figura 36. Medición con el analizador portátil de biogás.



Figura 37. Medición de los gases de la Dilución 1 (1:2).



Figura 38. Medición de los gases de la Dilución 2 (1:3).



Figura 39. Medición de los gases de la Dilución 3 (1:4).

ANEXO D. Resultados de análisis fisicoquímicos



ANALISIS ESPECIAL



SOLICITANTE:	GAMARRA OMONTE KETLY MAGALY	FECHA DE REPORTE:	25/07/2025
PROCEDENCIA:	FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES - ESCUELA INGENIERIA AMBIENTAL - UNAS	RECIBO N°	78533
REFERENCIA:	ESTIERCOL DE PORCINO	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE

RESULTADOS DEL ENSAYO SOLICITADO

N°	DATOS		ANALISIS QUIMICO						
			CE	TEMPERATURA	pH	Materia Orgánica	N	C	C/N
			d/1m	T		M.O.	total	Orgánico	
CODIGO DEL LABORATORIO	DATOS DEL SOLICITANTE	1:1	°C	1:1	%	%	%		
1	S25-0891	Mo	4.999	25	6.90	70.27	1.74	35.14	20.19

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.
Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA


Tingo María

[Firma manuscrita]

Dr. HUGO ALFREDO HUAMANI YUPANQUI
Jefe Laboratorio de Análisis de Suelos, Agua y Ecotoxicología



Figura 40. Resultados iniciales de los análisis fisicoquímicos



ANÁLISIS ESPECIAL


1. DATOS

SOLICITANTE:	GAMARRA OMEONTE KETLY MAGALY	MUESTREADO POR:	EL SOLICITANTE
DEPARTAMENTO:	HUANUCO	FECHA DE REPORTE:	12/11/2025
PROVINCIA:	LEONCIO PRADO	RECIBO:	85136
DISTRITO:	RUPA RUPA	MUESTRA:	ESTIERCOL DE PORCINO


2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS SOLICITADO

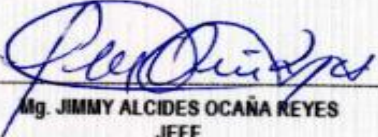
DATOS DE LA MUESTRA		RESULTADOS						
Código	Dato	pH	T (°C)	Humedad Hd (%)	N (%)	P (%)	K (%)	C/N
E25-371-1	TESTIGO	6.91	26	68.55	2.10	1.05	1.47	19.00
E25-371-2	DILUCIÓN 1 (1:2)	7.35	26	80.56	2.89	1.38	1.99	11.22
E25-371-3	DILUCIÓN 2 (1:3)	7.50	26	84.34	2.75	1.27	1.72	14.53
E25-371-4	DILUCIÓN 3 (1:4)	7.60	26	90.45	2.50	1.15	1.45	16.00

Los Resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Queda prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del LASAE.
Los Resultados no pueden ser usados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
TINGO MARIA
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, AGUA Y ECOTOXICOLOGIA





Mg. JIMMY ALCIDES OCAÑA REYES
JEFE




Figura 41. M Resultados finales del análisis fisicoquímico

