



FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS

**VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES POR
DIGESTIÓN ANAERÓBICA EN HUARAL -AUCALLAMA**

**Línea de investigación:
Competitividad industrial, diversificación productiva y prospectiva**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial

Autor

Guevara Ventura, Fernando

Asesora

Bautista Espinoza, Marleni Vilma

ORCID: 0000-0002-9754-173X

Jurado

Sánchez Cáceres, Isaac

Jara Bautista, Lucio

Carlos Reyes, Gabriel Jorge

Lima - Perú

2025

VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES POR DIGESTIÓN ANAERÓBICA EN HUARAL -AUCALLAMA

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%	15%	3%	7%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
2	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
4	docplayer.es Fuente de Internet	1%
5	dspace.udla.edu.ec Fuente de Internet	1%
6	vdocuments.mx Fuente de Internet	1%
7	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC Trabajo del estudiante	<1%
9	Submitted to BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA Trabajo del estudiante	<1%



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS

VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS
AGROINDUSTRIALES POR DIGESTIÓN ANAERÓBICA EN
HUARAL -AUCALLAMA

Línea de Investigación:

Competitividad industrial, diversificación productiva y prospectiva

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial

Autor

Guevara Ventura, Fernando

Asesora

Bautista Espinoza, Marleni Vilma
ORCID: 0000-0002-9754-173X

Jurado

Sánchez Cáceres, Isaac
Jara Bautista, Lucio
Carlos Reyes, Gabriel Jorge

Lima – Perú
2025

Dedicatoria

A la grandiosa tierra de Huaral y al distrito de Aucallama, cuyas espontaneas tierras agrícolas inspiraron este trabajo. Que esta investigación sea un aporte al desarrollo sostenible de sus campos y el bienestar de su gente, transformando sus residuos en energía y esperanza.

Agradecimiento

A la Universidad Nacional Federico Villarreal y a la Facultad de Ingeniería Industrial Y Sistemas por la formación académica brindada.

A mi asesor de tesis, Mg. Ing. Marleni Vilma, y al Dr. Ing. Julian Ccasani por su invaluable guía y rigor en el campo de las energías renovables.

A las empresas y productores agroindustriales de Huaral y Aucallama, especialmente a Boza e INVERGEP SAC por facilitar las instalaciones y muestras para esta investigación.

Al Mg. Ing. Rafael Chuquicondor y al Sr. Osias Pomar, por su constante apoyo técnico y seguimiento experimental.

A los agricultores del valle, a mis padres, hermanos en especial a Ing. Wilter Guevara, inspiraron este proyecto de economía circular y por su apoyo incondicional.

ÍNDICE

RESUMEN	viii
ABSTRACT.....	ix
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción y formulación del problema.....	4
<i>1.1.1. Problema general.....</i>	<i>5</i>
<i>1.1.2. Problemas específicos.....</i>	<i>6</i>
1.2. Antecedentes.....	6
1.3. Objetivos.....	8
<i>1.3.1. Objetivo general.....</i>	<i>8</i>
<i>1.3.2. Objetivo específico.....</i>	<i>9</i>
1.4. Justificación.....	9
1.5. Hipótesis.....	11
<i>1.5.1. Hipótesis General.....</i>	<i>11</i>
<i>1.5.2. Hipótesis específico.....</i>	<i>11</i>
II. MARCO TEÓRICO	12
III. MÉTODO	37
3.1. Tipo de investigación.....	37
3.2. Ámbitos temporal y espacial.....	37
3.3. Variables.....	38
3.4. Población y muestra.....	38

3.4.1. Población.....	38
3.4.2. Muestra.....	38
3.5. Instrumentos.....	39
3.6. Procedimientos.....	40
3.7. Análisis de Datos	42
3.8. Consideraciones éticas	50
IV. RESULTADOS	51
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	59
VI. CONCLUSIONES.....	61
VII. RECOMENDACIONES	62
VIII. REFERENCIAS.....	63
IX. ANEXOS	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirólisis: revisión de procesos y productos.....	18
Tabla 2. Composición del biogás según el tipo de residuo.....	22
Tabla 3. Consumo de biogás en aplicaciones domésticas e industriales	23
Tabla 4. Propiedades Fisicoquímicas del metano	33
Tabla 5. Proporciones de residuos por tratamiento experimental.....	39
Tabla 6. Resumen Estadístico	43
Tabla 7. Factores experimentales y niveles evaluados	44
Tabla 8. Distribución de los valores de las Variables según el diseño de Box-Behnken	44
Tabla 9. Prueba de Kruskal-Wallis	45
Tabla 10. Niveles de concentración de los factores experimentales.....	48
Tabla 11. Niveles experimentales para el análisis multifactorial	49
Tabla 12. Resumen de producción por tratamiento	51
Tabla 13. Resumen de contrastes de hipótesis.....	53
Tabla 14. Comparaciones por parejas de Tratamiento.....	54
Tabla 15. Contrastes ortogonales	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de aprovechamiento energético de residuos sólidos con contenido de carbono.....	14
Figura 2. Proceso de gasificación: zonas de oxidación, reducción y formación de productos gaseosos.	14
Figura 3. Diagrama de un sistema de gasificación y aprovechamiento energético del gas de síntesis.....	15
Figura 4. Diagrama de operaciones	42
Figura 5. Gráfico caja y Bigotes	45
Figura 6. Boxplot con puntos individuales para los tres tratamientos.	46
Figura 7. Distribución Gráfica de Proporciones Relativas de Tratamientos Orgánicos en 15 Muestras.....	46
Figura 8. Comparación Gráfica de Proporciones Relativas Observadas y Promedio de Tratamientos Orgánicos en 15 Muestras.....	47
Figura 9. Diagrama Triangular de la Composición Relativa de Tres Tratamientos	47
Figura 10. Medida de volumen de biogás por tratamiento	53
Figura 11. Comparaciones por parejas de Tratamiento (rango promedio)	56

RESUMEN

Objetivo: La investigación tuvo como objetivo valorar energéticamente los residuos agroindustriales de la zona de Huaral-Aucallama mediante la generación de biogás por digestión anaeróbica. **Método:** el estudio de tipo aplicado-experimental empleó un diseño completamente al azar con 45 unidades experimentales distribuidas en tres tratamientos: residuos de fresa, agua residual agroindustrial y porcinaza, evaluados durante 30 días en condiciones controladas (18-21°C). **Resultados:** Los resultados demostraron que la porcinaza presentó el mayor rendimiento con 8,249.40 mL/UE, superando significativamente a los residuos de fresa (5,233.13 mL/UE) y agua residual (1,691.07 mL/UE), el análisis estadístico mediante reveló diferencias altamente significativas entre tratamientos, confirmadas por pruebas de contrastes ortogonales que identificaron a la porcinaza como el sustrato más eficiente. **Conclusiones:** Se concluye que los residuos agroindustriales de la zona poseen un potencial energético viable, siendo la porcinaza el sustrato óptimo para la producción de biogás, lo que representa una alternativa sostenible para la valorización energética en contextos agroindustriales rurales.

Palabras clave: biogás, digestión anaeróbica, residuos agroindustriales, valorización energética.

ABSTRACT

Objective: This research aimed to assess the energy potential of agro-industrial waste from the Huaral-Aucallama area through biogas generation via anaerobic digestion. **Method:** This applied-experimental study employed a completely randomized design with 45 experimental units distributed across three treatments: strawberry waste, agro-industrial wastewater, and pig manure, evaluated over 30 days under controlled conditions (18-21°C). **Results:** The results demonstrated that pig manure exhibited the highest yield at 8,249.40 mL/EU, significantly surpassing strawberry waste (5,233.13 mL/EU) and wastewater (1,691.07 mL/EU). Statistical analysis revealed highly significant differences between treatments, confirmed by orthogonal contrast tests, which identified pig manure as the most efficient substrate. **Conclusions:** It is concluded that the agro-industrial waste of the area has a viable energy potential, with pig manure being the optimal substrate for biogas production, which represents a sustainable alternative for energy valorization in rural agro-industrial contexts.

Keywords: biogas, anaerobic digestion, agro-industrial waste, energy valorization.

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la actividad agroindustria rural y las cadenas de procesamiento de alimentos en la zona del norte del Perú es una de las fuentes de ingreso más importantes para la población sin embargo esta actividad genera importantes volúmenes de residuos orgánicos como resultado de sus actividades, los cuales, en muchos casos, son dispuestos de manera inadecuada, generando impactos ambientales negativos como la contaminación de suelos y fuentes hídricas, emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y proliferación de vectores que afectan la salud pública (Ruiz, 2024).

En el Perú los desechos provenientes de la industria azucarera, cafetalera, frutícola, avícola, ganadera, entre otras suelen ser manejados de forma informal, mediante su disposición en vertederos, acumulación en campo o prácticas de quema, generando serios impactos ambientales: generando emisiones como el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2), malos olores, y proliferación de vectores pudiendo ocasionar enfermedades a la población (Galván et al., 2023)

La implementación de un sistema de digestión anaeróbica para tratar los residuos agroindustriales es una posibilidad generada en otras sociedades para el incremento del potencial energético especialmente la producción de metano a raíz de la fermentación anaeróbica de los residuos agropecuarios.

La escasa infraestructura tecnológica para la implementación de biodigestores hace limitada su implementación en esta zona del norte chico limitaciones en los recursos financieros para la su operacionalizaron de biodigestores, y un marco normativo aún incipiente en cuanto a la gestión y valorización de estos subproductos.

Sin embargo, el potencial energético que se puede obtener de los residuos generados en Huaral - Aucallama por la magnitud de residuos eliminados permitirá evaluar la viabilidad económica y proponer estrategias de gestión que integren a productores de agroindustria y autoridades.

En el Capítulo I: Introducción, se plantea el problema de investigación asociado al inadecuado manejo de residuos orgánicos y la necesidad de alternativas sostenibles de aprovechamiento energético, además, se desarrollan los antecedentes, la formulación del problema, el objetivo general y los objetivos específicos, la justificación del estudio y la delimitación geográfica y temporal, destacando la relevancia ambiental, económica y social de promover la valorización energética en la agroindustria local.

El Capítulo II: Marco teórico aborda los fundamentos científicos y técnicos que sustentan la investigación, incluyendo los conceptos relacionados con la energía y sus fuentes, la composición de los residuos agroindustriales, el proceso de digestión anaeróbica y la producción de biogás como fuente renovable, asimismo, se incluyen los principales factores que influyen en la eficiencia del proceso, los tipos de digestores y los parámetros energéticos de evaluación.

Por su parte, el Capítulo III: Metodología describe el tipo y diseño de investigación, las variables e indicadores analizados, el área de estudio y los procedimientos experimentales aplicados para la recolección, tratamiento y análisis de los residuos, también se detallan los métodos empleados para medir la producción de biogás y evaluar su rendimiento energético, garantizando la validez y confiabilidad de los resultados.

El Capítulo IV: Resultados presenta los hallazgos obtenidos del proceso experimental, organizados según los objetivos específicos planteados, se incluye la identificación de los residuos agroindustriales predominantes en la zona de estudio, la cuantificación detallada del volumen de biogás generado por cada tratamiento, y el análisis comparativo del rendimiento entre los diferentes sustratos evaluados. Asimismo, se muestran los resultados del análisis estadístico que demuestran las diferencias significativas entre tratamientos.

El Capítulo V: Discusión de resultados analiza e interpreta los hallazgos a la luz del marco teórico y los antecedentes de investigación, estableciendo relaciones entre los datos obtenidos y los objetivos planteados, se examina el potencial energético de cada residuo en comparación con estudios previos, se discuten las implicaciones técnicas de los resultados y se explican las posibles causas de las diferencias observadas en la producción de biogás entre tratamientos.

El Capítulo VI: Conclusiones sintetiza los principales hallazgos de la investigación, respondiendo a los objetivos planteados inicialmente, se establecen las contribuciones al conocimiento científico y se destacan las implicaciones prácticas del estudio para el desarrollo energético local, recogiendo de manera estructurada los logros obtenidos en cada fase de la investigación.

El Capítulo VII: Recomendaciones propone lineamientos específicos para la implementación de sistemas de digestión anaeróbica en la zona de estudio, así como sugerencias para futuras investigaciones que permitan profundizar en el potencial bioenergético de los residuos agroindustriales identificados, considerando aspectos técnicos, económicos y de gestión.

Finalmente, se presentan las Referencias bibliográficas consultadas y los Anexos que incluyen los instrumentos de recolección de datos, registros detallados de producción de biogás, documentación fotográfica del proceso experimental y otros materiales complementarios que sustentan el desarrollo de la investigación.

1.1. Descripción y formulación del problema

La acumulación y manejo inadecuado de los residuos orgánicos es un problema global y creciente, en 2022 se estimó que aproximadamente 1 050 millones de toneladas de alimentos fueron desperdiciadas a nivel mundial (AP, 2024), este desperdicio, junto con la fracción orgánica de los residuos urbanos, contribuye significativamente a las emisiones de metano cuando se descomponen sin control (United Nations Environment Programme [UNEP], 2024).

A escala mundial, la generación de residuos sólidos municipales se estimó en cerca de 2,1 mil millones de toneladas al año para el año 2020 (Reuters, 2024), en muchas ciudades del Sur Global, la fracción orgánica representa entre el 60% y 70% de los residuos sólidos urbanos, lo cual implica un alto potencial de mitigación de gases de efecto invernadero y de valorización energética si se implementan tecnologías adecuadas (UNEP, 2024).

En el Perú, según el Ministerio de Economía y Finanzas la generación anual de residuos sólidos municipales alcanzó aproximadamente 8 450 715 toneladas (Ministerio de Economía y Finanzas [MEF], 2023), de ese total, cerca del 77,6 % corresponde a fracciones con potencial de valorización (orgánicos y reciclables), aunque la valorización efectiva fue muy baja: en 2024 se reportaron alrededor de 8 994 762 toneladas generadas, de las cuales solo 2,8% aproximadamente fueron valorizadas (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2025).

A nivel regional, la actividad agrícola es esencial, en 2021, el cultivo de fresa en el norte chico peruano había consolidado aproximadamente 3 200 a 3 500 hectáreas de siembra a nivel nacional, de las cuales el 75% se concentra en el Norte Chico (Agencia Agraria de Noticias, 2021), este volumen de área sugiere flujos importantes de residuos de cosecha y descarte (pulpa, tallos, frutos no comercializables) susceptibles de valorización energética, además, se estimó que las áreas frutales en el valle podrían sumar aproximadamente 7 954,53 hectáreas, lo que sugiere flujos importantes de residuos de cosecha y descarte susceptibles de valorización, no obstante, la documentación pública sobre generación diaria exacta de residuos orgánicos por el distrito de Aucallama es limitada, por lo que se recomienda realizar un inventario primario de generación (kg/día) en campo (Galván, 2018).

Estos datos evidencian una contradicción operativa: aunque existe suficiente masa orgánica (a nivel global, nacional y local) para justificar inversiones en tecnologías de valorización energética, la implementación real (plantas, biodigestores y otros sistemas) es aún marginal, esta situación conduce a la pérdida de un recurso energético valioso y a emisiones innecesarias de metano, en el contexto de Aucallama – Huaral, donde la fresa parece ser el residuo predominante, la tecnología de digestión anaeróbica representa una oportunidad concreta para convertir toneladas de descarte en m³ de biogás y kWh útiles, disminuyendo costos energéticos y reduciendo la huella ambiental local.

1.1.1. Problema general

¿Cuál es el potencial de valorización energética de los residuos agroindustriales de la zona Huaral–Aucallama mediante la producción de biogás por digestión anaeróbica?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Qué tipos de residuos agroindustriales predominan en la zona de Huaral–Aucallama y poseen mayor potencial para la generación de biogás mediante digestión anaeróbica?
- ¿Cuál es el volumen de biogás que se obtiene a partir de la digestión anaeróbica de los residuos agroindustriales presentes en la zona de Aucallama–Huaral?
- ¿Qué tipo de tratamiento o combinación de residuos agroindustriales permite obtener el mayor volumen de biogás mediante digestión anaeróbica en Aucallama–Huaral?

1.2. Antecedentes

Astoquilca y Huapaya (2024) realizaron una investigación con objetivo determinar el potencial de generación de biogás utilizando residuos orgánicos como materia prima provenientes del Mercado N.º 2 de Barranco, para promover su valorización energética y contribuir a la reducción del impacto ambiental generado por la acumulación de desechos orgánicos, el estudio fue cuantitativo, descriptivo y experimental, realizándose una caracterización de los residuos durante un periodo de catorce días, se extrajeron muestras representativas diarias, las cuales fueron sometidas a un proceso de secado y análisis de sólidos volátiles, con el fin de estimar el volumen de biogás potencialmente generable a partir de la degradación anaeróbica del material orgánico recolectado, los resultados mostraron que el mercado tiene un potencial de generación de 707.40 m³ de biogás por mes, volumen que podría abastecer aproximadamente el 27.32 % del consumo eléctrico del establecimiento, se concluyó que la digestión anaeróbica representa una alternativa sostenible para el tratamiento de residuos orgánicos, al permitir la generación de energía renovable, reducir la emisión de gases de efecto invernadero y minimizar los costos asociados a la disposición final, el estudio aporta con

demostrar, mediante evidencia empírica, la eficiencia y viabilidad técnica del proceso de digestión anaeróbica como mecanismo de valorización energética.

Gutiérrez (2020) en su estudio tuvo como objetivo proponer un modelo de gestión sustentable de residuos agroindustriales para la producción de químicos en biorrefinerías en Arequipa, para lo cual se adoptó una metodología descriptiva y de revisión comparativa, los investigadores estructuraron un modelo de gestión sustentable basado en el acopio de biomasa verde proveniente de agricultores locales que luego sería procesada para obtener etanol, ácido láctico y químicos intermedios tales como olefinas, aditivos de combustibles, solventes verdes, poliacrilatos, resinas y nylon, asimismo, la propuesta consideró la generación de biogás y fertilizantes, destinándose el biogás a cubrir parcialmente la demanda energética de la biorrefinería y los fertilizantes como mecanismo de compensación a los agricultores por la entrega de sus residuos, el periodo de evaluación del modelo se estimó en dos años, proyectándose que los productos obtenidos serían comercializados en la industria química de solventes, pinturas y derivados, entre las conclusiones, el estudio enfatizó que el modelo es viable ambiental, económica y socialmente, el estudio aporta con demostrar la importancia de la valorización de residuos agroindustriales como insumo energético y químico, evidenciando que estos subproductos pueden integrarse en procesos tecnológicos como la digestión anaeróbica.

Sánchez (2023), tuvo como objetivo promover la economía circular en las industrias agroalimentarias mediante la optimización de la digestión anaerobia como tecnología de valorización de residuos orgánicos, se empleó una metodología experimental basada en la implementación de innovaciones tecnológicas que mejoraron la eficiencia energética, económica y ambiental del proceso, entre los principales resultados, se logró incrementar en más del 20% el rendimiento energético gracias a la incorporación de un material poroso que

actúa como soporte bacteriano, asimismo, se desarrollaron tres métodos de basados en SYBR Green para la detección y cuantificación de los géneros *Methanoculleus*, *Methanobacterium* y *Methanosarcina*, demostrando ser herramientas rápidas, precisas y reproducibles para el control del proceso anaerobio, se concluyó que la aplicación de estos avances permite fortalecer la sostenibilidad y competitividad de las industrias agroalimentarias al reducir emisiones contaminantes y optimizar la producción de biogás, este antecedente aporta con evidencia de la innovación tecnológica en la eficiencia del proceso de digestión anaerobia y en la valorización energética de residuos agroindustriales.

Rodríguez et al. (2022) realizaron un estudio con el objetivo de optimizar el uso del purín porcino como fertilizante orgánico mediante la evaluación de su valor agronómico, los efectos de su tratamiento y la reducción de emisiones gaseosas, se aplicó una metodología experimental que incluyó procesos de separación, digestión anaerobia y microfiltración, además de la aplicación de tratamientos con bioactivador, biochar, ácido sulfúrico (H_2SO_4) y cloruro férrico ($FeCl_3$), los resultados demostraron que los tratamientos con H_2SO_4 y $FeCl_3$ redujeron en más del 90% las emisiones de amoníaco (NH_3) y óxido nitroso (N_2O), mientras que el biochar logró mitigar las emisiones en un 66% y mejorar la retención de nitrógeno en el suelo, se concluyó que dichos tratamientos incrementan la eficiencia del nitrógeno y disminuyen el impacto ambiental del purín porcino, este antecedente aporta a la tesis al evidenciar el potencial de los residuos agroindustriales para generar valor energético y ambiental mediante la digestión anaeróbica y procesos tecnológicos sostenibles.

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Valorar energéticamente los residuos agroindustriales de la zona de Huaral–Aucallama mediante la generación de biogás a través de la digestión anaeróbica.

1.3.2. *Objetivo específico*

- Identificar los residuos agroindustriales predominantes en la zona de Huaral–Aucallama con potencial para valorización energética mediante digestión anaeróbica.
- Medir y cuantificar el volumen de biogás obtenido mediante la digestión anaeróbica de los residuos agroindustriales de la zona de Aucallama – Huaral.
- Evaluar que tratamiento de residuos agroindustriales permite obtener mayor cantidad de biogás en zona de Aucallama- Huaral

1.4. Justificación

La presente investigación se justifica teóricamente en la necesidad de fortalecer el conocimiento científico sobre los procesos de valorización energética de residuos agroindustriales, un campo clave dentro de la ingeniería ambiental y las energías renovables, la digestión anaeróbica constituye un proceso biotecnológico mediante el cual microorganismos degradan materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando biogás (mezcla de metano y dióxido de carbono) y digestato (biofertilizante), teóricamente, el estudio se apoya en los principios de la bioenergía circular, que promueve el aprovechamiento integral de los residuos como recurso energético, reduciendo su impacto ambiental, asimismo, permite validar modelos de conversión energética sostenible aplicables en contextos rurales o semiurbanos como Aucallama, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7 y 13).

En el ámbito práctico, esta investigación aporta soluciones reales al problema de acumulación y disposición inadecuada de residuos agroindustriales, que generan impactos negativos como malos olores, proliferación de vectores y contaminación de suelos y aguas, la

identificación del tratamiento que produce mayor volumen de biogás permitirá orientar a productores, asociaciones agrícolas y pequeñas industrias hacia el aprovechamiento energético de sus residuos, promoviendo una economía más limpia y autosostenible, además, la generación de biogás puede sustituir el consumo de combustibles fósiles, reducir costos energéticos y mejorar la calidad de vida de las familias y microempresas locales.

La justificación socio economía, este proyecto mejora la vida de la comunidad, el presente trabajo se justifica como una investigación para tener un amplio conocimiento sobre el uso adecuado de los Residuos orgánicos como valorización Energética es viable hoy en día generando biogás como principal propósito generando Renovable energía y como subproductos los fertilizantes orgánicos, este sistema independiza a la reducción de contaminación ambiental, disminuye los gases de Efecto Invernadero y tiene mayor beneficio a la economía circular en la Agroindustria.

Metodológicamente, el estudio emplea un diseño adecuado para evaluar tratamientos experimentales con diferentes mezclas de residuos y condiciones controladas, esta estructura garantiza la validez estadística de los resultados y permite aplicar técnicas de análisis de varianza (ANVA) y contrastes ortogonales para determinar diferencias significativas entre tratamientos. Así, el estudio no solo contribuye con datos empíricos sobre la eficiencia de la digestión anaeróbica, sino también con un modelo replicable para investigaciones futuras en bioenergía o gestión de residuos orgánicos.

Desde el enfoque tecnológico, la investigación tiene un valor estratégico al fomentar la aplicación de tecnologías limpias y de bajo costo para la producción de biogás a partir de residuos agroindustriales locales, la digestión anaeróbica es una alternativa tecnológica que integra sostenibilidad ambiental con innovación energética, permitiendo transformar desechos en fuentes renovables de energía, su implementación en Aucallama – Huaral representa un paso

hacia la transición energética descentralizada, al demostrar que tecnologías simples (biodigestores artesanales o modulares) pueden generar resultados eficientes sin requerir alta inversión, además, el estudio aporta conocimiento técnico sobre los parámetros operativos óptimos (temperatura, tiempo de retención, proporciones de mezcla), lo cual constituye un aporte directo al desarrollo tecnológico regional y nacional.

1.5.Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

Los diferentes tratamientos de residuos agroindustriales influyen significativamente en la generación de biogás mediante digestión anaeróbica en Huaral-Aucallama.

1.5.2. Hipótesis específico

- El residuo agroindustrial predominante de la zona de Aucallama–Huaral produce un volumen distinto de biogás respecto a otros residuos evaluados.
- Los tratamientos de residuos agroindustriales influyen en la cantidad de biogás obtenida
- Al menos uno de los tratamientos permite obtener mayor volumen de biogás.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1. Valorización energética

2.1.1.1. Concepto de valorización energética. Los desechos orgánicos, que comúnmente se envían a vertederos, poseen un alto potencial para producir energía mediante tecnologías como la digestión anaeróbica, facilitando la creación de biogás que puede sustituir a los combustibles fósiles en procesos industriales (Zambrano, 2018).

2.1.1.2. Tipos de energía. La energía puede clasificarse de acuerdo con su fuente de origen en dos grandes categorías: energías convencionales y energías renovables, las primeras provienen de recursos fósiles como el petróleo, el gas natural y el carbón, cuya explotación masiva ha impulsado el desarrollo industrial, pero también ha generado impactos ambientales significativos, como el incremento de gases de efecto invernadero y la degradación de ecosistemas, en contraste, las energías renovables se obtienen de recursos naturales inagotables o que se regeneran a una escala temporal humana, como la radiación solar, el viento, el agua, la biomasa y el calor geotérmico, su aprovechamiento representa una alternativa sostenible frente al agotamiento de los combustibles fósiles y la crisis climática global (Díaz, 2024).

Entre las energías renovables, la energía de la biomasa adquiere relevancia por su doble función: la reducción de residuos orgánicos y la generación de biocombustibles limpios, la biomasa se refiere a la materia orgánica de origen vegetal, animal o microbiano que puede transformarse en energía mediante procesos termoquímicos (combustión, gasificación, pirólisis) o biológicos (fermentación, digestión anaeróbica), este tipo de energía no solo aprovecha subproductos agroindustriales y desechos ganaderos, sino que también contribuye al cierre de ciclos productivos bajo un enfoque de economía circular, en consecuencia, la diversificación

energética hacia fuentes renovables como la biomasa resulta esencial para garantizar la seguridad energética y la mitigación del cambio climático (Rubio, 2025).

2.1.1.3. Aportes de la generación de valorización energética. La valorización energética desempeña una función crucial en la bioeconomía circular, ya que facilita la transformación de residuos orgánicos y fracciones que no se pueden reciclar en recursos útiles como energía y biofertilizantes. Esta estrategia no solo disminuye la cantidad de residuos que se envían a la eliminación final, sino que también ayuda a reducir los gases de efecto invernadero y a sustituir en parte los combustibles fósiles.

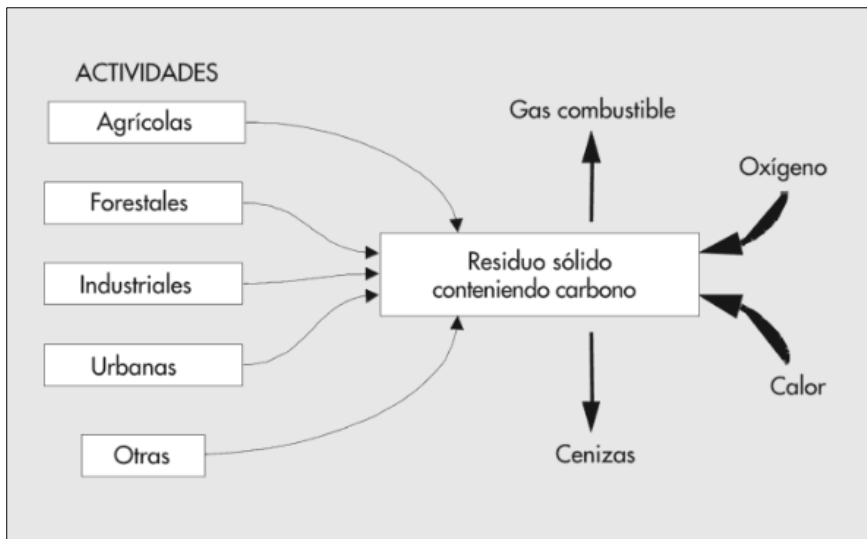
En su trabajo, Barandiaran (2022) sugiere que la valorización energética de los residuos sólidos municipales en Ferreñafe puede ser incorporada como un componente de un modelo de gestión sostenible, transformando la fracción orgánica en electricidad y apoyando una economía circular que favorece el uso de recursos sobre su desecho.

Por otra parte, Riveros (2018) indica que la implementación de tecnologías de valorización energética, junto con el reciclaje, puede disminuir hasta un 91 por ciento los efectos ambientales relacionados con la disposición tradicional de residuos sólidos municipales. Este hallazgo demuestra que la valorización energética es no solo una opción técnica factible, sino también una táctica alineada con los principios de sostenibilidad y circularidad.

Así, la valorización energética se establece como una herramienta fundamental dentro de la bioeconomía circular, al producir energía renovable, disminuir emisiones y cerrar ciclos de materiales, lo cual está en sintonía con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 7, 12 y 13.

Figura 1

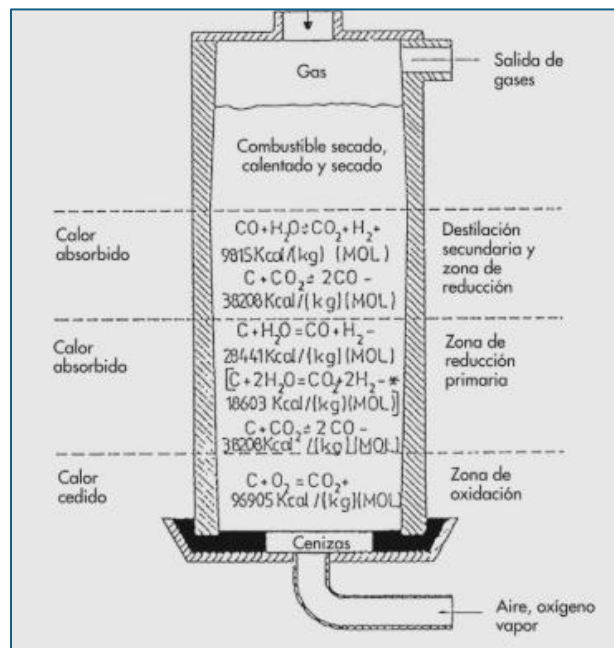
Esquema de aprovechamiento energético de residuos sólidos con contenido de carbono



Nota. Adaptado de *La gasificación: Tratamiento y valorización energética de residuos* por Castells y Velo (2012)

Figura 2

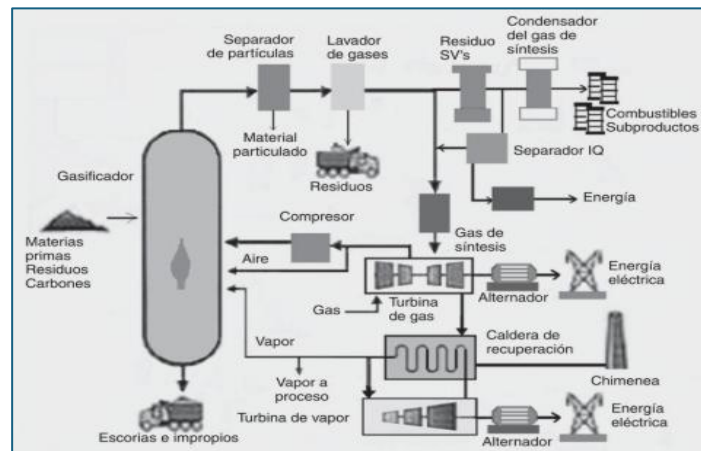
Proceso de gasificación: zonas de oxidación, reducción y formación de productos gaseosos.



Nota. Adaptado de *La gasificación: Tratamiento y valorización energética de residuos* por Castells y Velo (2012)

Figura 3

Diagrama de un sistema de gasificación y aprovechamiento energético del gas de síntesis.



Nota. Adaptado de *La gasificación: Tratamiento y valorización energética de residuos* por Castells y Velo (2012)

2.1.2. Residuos agroindustriales

2.1.2.1. Clasificación de residuos agroindustriales. La creación y manejo de desechos en los hogares continúan siendo un desafío tanto social como ambiental según Sandoval (2020) que necesita ser abordado mediante programas que intenten minimizar su producción, reutilizar los desechos generados y disminuir la acumulación y las emisiones que se producen en los vertederos.

- **Residuos orgánicos:** Son materiales de origen biológico susceptibles de descomposición natural, como restos de alimentos, residuos agrícolas, estiércol, hojas, cáscaras, subproductos agroindustriales y otros desechos biodegradables, estos residuos contienen compuestos como carbohidratos, proteínas y lípidos, que pueden ser transformados por microorganismos, lo que los convierte en una fuente aprovechable para procesos como el compostaje y la biodigestión anaerobia (Rubio, 2025).
- **Capacidad metanogénica:** Es el potencial que tiene un residuo orgánico para generar metano (CH_4) durante el proceso de digestión anaerobia. Se expresa como el volumen

máximo de metano que puede producirse por unidad de materia orgánica (por ejemplo, mL CH₄/g de sólidos volátiles), este parámetro permite evaluar la eficiencia energética de un sustrato y determinar qué tipos de residuos son más adecuados para producir biogás de manera óptima (Rubio, 2025).

- **Residuos de frutas:** Los desechos de frutas son uno de los subproductos agroindustriales más comunes en las naciones de América Latina, debido a la gran producción y consumo de frutas frescas y procesadas. Estos desechos incluyen cáscaras, pulpas, semillas, tallos y jugos sobrantes que se eliminan en la elaboración de jugos, mermeladas, néctares, deshidratados y otras industrias asociadas. Se calcula que entre el 25 % y 40 % de la producción de frutas se transforma en desecho, lo que produce un volumen significativo que, si no se maneja de manera adecuada, puede traer consigo efectos ambientales adversos (Ghosh et al., 2016).

Desde la perspectiva composicional, los desechos de frutas se distinguen por tener un elevado contenido de carbohidratos solubles (glucosa, fructosa, sacarosa), fibras como la celulosa y hemicelulosa, y en ciertos casos, cantidades importantes de pectinas y almidones. Asimismo, tienden a tener un contenido significativo de humedad, que varía entre 70 % y 90 %, lo que los hace ser un sustrato muy biodegradable y adecuado para la digestión anaeróbica (Boukroufa et al., 2015). Según Budiyo et al. (2010) la porción orgánica de los desechos de frutas se hidroliza con facilidad, lo que facilita una conversión rápida en ácidos grasos volátiles y luego en biogás.

Específicamente, desechos como la piel de plátano, la piel de naranja, la pulpa de mango o las semillas de uva exhiben distintas propiedades fisicoquímicas que influyen en su desempeño en los biodigestores. Por ejemplo, la piel de la naranja posee

aceites esenciales y limoneno, compuestos que podrían tener un efecto inhibitor sobre los microorganismos metanogénicos si están en concentraciones elevadas. No obstante, al combinarse con otros desechos agroindustriales, estos efectos se reducen, resultando en un proceso de digestión anaeróbica más estable (Mata et al., 2014).

- **Porcinaza:** La porcinaza, definida como el excremento generado por la cría de cerdos, es uno de los desechos agroindustriales más abundantes en las áreas rurales y periurbanas, a causa del continuo aumento de la industria porcina a escala global (Moller, et al., 2024). Este residuo se produce a partir de la combinación de excretas sólidas y líquidas, sobrantes de alimentos no ingeridos, agua de limpieza y, en ocasiones, materiales de cama como aserrín o paja (Sommer, 2009), su estructura diversa lo hace un sustrato muy relevante para la digestión anaeróbica, dado que une una alta concentración de materia orgánica con un contenido significativo de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio (Tambone, 2010).

Desde el punto de vista químico, la porcinaza contiene un elevado porcentaje de sólidos volátiles biodegradables, lo que garantiza su capacidad como fuente de biogás. No obstante, la relación carbono/nitrógeno (C/N) tiende a ser relativamente baja, oscilando entre 8 y 14, lo que puede conducir a la acumulación de amoníaco libre en situaciones de digestión anaeróbica (Hansen et al., 2006). El exceso de nitrógeno puede obstaculizar la actividad de los microorganismos metanogénicos si no se controla a través de la co-digestión con sustratos que contengan carbono, como desechos de frutas o recortes de poda, según Moller et al. (2004) el estiércol de cerdo presenta una biodegradabilidad media frente a otros tipos de estiércoles de animales, sin embargo, su alta carga orgánica lo vuelve apto para procesos de digestión anaeróbica en sistemas de mezcla total.

En relación con la generación de biogás, la porcinaza puede producir entre 300 y 450 litros de biogás por cada kilogramo de sólidos volátiles incorporados, con un porcentaje de metano que varía entre el 55 % y el 65 %, dependiendo de las condiciones operativas del biodigestor (Lehtomäki et al., 2007). Estos valores se encuentran en un rango competitivo en relación a otros estiércoles y convierten este residuo en una fuente factible de energía renovable en comunidades rurales con una fuerte actividad porcina.

- **Pirólisis:** El pirólisis se refiere a la descomposición de materiales a alta temperatura sin oxígeno, resultando en la generación de productos en formas gaseosas, líquidas y sólidas (Angeles, et al., 2021) Esta técnica permite la recuperación de recursos, así como mejora el transporte, almacenamiento y uso de los desechos, además de ser económica y fácil de operar. Por consiguiente, la pirólisis se ve como una de las alternativas más ecológicas para el tratamiento y aprovechamiento de residuos.

Tabla 1

Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirólisis: revisión de procesos y productos

Tipo	Condición	Líquidos (bio-aceites)	Sólidos (biochar)	Gas (syngas)	Velocidad de calentamiento
Torrefacción	(<300°C), tiempo de exposición (>2h)	20%	75%	5%	< 1°C/s
Pirólisis lenta	(300–550°C), tiempo de resistencia (horas o días)	30% (70% agua)	35%	35%	1 – 1.8 °C/s
Pirólisis rápida	(425–600°C), Tiempo de resistencia del vapor (<2s)	75% (25% agua)	12%	13%	10 – 1000 °C/s
Pirólisis flash	(750–1000°C), (0.5s)	-			>1°C/s

Nota. Adaptado de “Valorización energética de residuos orgánicos mediante pirólisis:

revisión de procesos y productos” por Angeles, et al., 2021 *Rev. de investig. agro producción sustentable (2): 26-36.*

2.1.2.2. Composición general de los residuos. Los residuos orgánicos de origen agroindustrial, pecuario y doméstico presentan una composición heterogénea que influye directamente en su potencial energético y en la eficiencia de su tratamiento biológico. En términos generales, estos residuos están conformados por materia orgánica biodegradable, macronutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio), humedad y micronutrientes que favorecen la actividad microbiana. El nitrógeno (N) y el fósforo (P) son componentes esenciales para el metabolismo bacteriano, ya que intervienen en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos durante los procesos de digestión anaeróbica. No obstante, una concentración excesiva de nitrógeno puede generar acumulación de amoníaco, que inhibe la actividad metanogénica, por lo que es necesario mantener un equilibrio adecuado en la relación carbono/nitrógeno (C/N) (Rubio, 2025).

En cuanto a la materia orgánica, esta representa la fracción más aprovechable para la conversión energética, ya que actúa como el principal sustrato para la producción de biogás. Su contenido depende del tipo de residuo: en la porcicultura y ganadería predomina la materia volátil (carbohidratos, lípidos y proteínas), mientras que en residuos vegetales y agrícolas predominan la celulosa y lignina, cuya degradación es más lenta. El potencial energético teórico de un residuo está determinado por la proporción de sólidos volátiles (SV) y su poder calorífico, siendo los estiércoles y residuos agroindustriales de alto contenido orgánico los más eficientes para la generación de biogás. En este contexto, las aguas residuales agroindustriales, provenientes del lavado y procesamiento de productos agrícolas, constituyen un recurso energético subutilizado que puede transformarse en biogás o biometano, disminuyendo simultáneamente la carga contaminante vertida a los cuerpos hídricos (Rubio, 2025).

- **Nitrógeno, fósforo, materia orgánica**

Los residuos agroindustriales contienen una serie de elementos nutritivos esenciales para los microorganismos involucrados en el proceso de digestión anaeróbica. Entre estos elementos, el nitrógeno (N), el fósforo (P) y la materia orgánica son fundamentales para la eficiencia y sostenibilidad del proceso (ONUPAA, 2019).

- **Nitrógeno (N):** es un macronutriente esencial para los microorganismos en el proceso de digestión anaeróbica, ya que constituye un componente clave en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos. Este elemento puede estar presente en los residuos agroindustriales en forma de compuestos orgánicos (principalmente proteínas) y amoníaco (NH_3), que se libera durante la descomposición de la materia orgánica. Un exceso de nitrógeno en el sustrato puede llevar a una acumulación de amoníaco, lo que genera un efecto tóxico en los microorganismos metanogénicos, inhibiendo la producción de metano y reduciendo la eficiencia del proceso. Por otro lado, una relación C/N balanceada (aproximadamente entre 20:1 y 30:1) es crucial para mantener un ambiente óptimo para las bacterias metanogénicas y maximizar la conversión de materia orgánica en biogás (ONUPAA, 2019).
- **Fósforo (P):** es otro macronutriente esencial que juega un papel clave en el metabolismo microbiano, especialmente en la síntesis de ATP (adenosín trifosfato), que es fundamental para el transporte de energía dentro de las células. En el proceso de digestión anaeróbica, el fósforo está presente principalmente en forma de fosfatos, que son utilizados por los microorganismos para su crecimiento y reproducción. Aunque el fósforo es necesario en pequeñas cantidades, un exceso en el sustrato puede generar problemas en el proceso, al interferir con la actividad de los microorganismos debido a la formación de sales insolubles que afectan la biodisponibilidad de nutrientes. La

gestión adecuada de los niveles de fósforo en el sustrato es, por lo tanto, esencial para el buen funcionamiento de los sistemas anaeróbicos (ONUPAA, 2019).

- **Materia orgánica:** es la fracción de los residuos agroindustriales que puede ser degradada por los microorganismos en el proceso de digestión anaeróbica, generando biogás como producto final. Está compuesta principalmente por carbohidratos, proteínas, grasas y lignina. La descomposición de esta materia orgánica es el objetivo principal del proceso anaeróbico. La cantidad y calidad de la materia orgánica en los residuos determinan la cantidad de sólidos volátiles (SV), que son los componentes biodegradables que serán transformados en biogás. Los residuos con un alto contenido de materia orgánica biodegradable, como los estiércoles animales o los residuos de frutas, son particularmente adecuados para la producción de biogás, ya que contienen una mayor proporción de sustratos fermentables que las bacterias metanogénicas pueden utilizar para generar metano (ONUPAA, 2019).

Es importante señalar que la composición química de la materia orgánica varía considerablemente entre los tipos de residuos, lo que influye en la eficiencia del proceso de digestión. Por ejemplo, los residuos vegetales ricos en celulosa y lignina presentan una mayor resistencia a la degradación en comparación con los residuos ricos en azúcares o proteínas, que se descomponen más fácilmente y generan biogás de manera más eficiente. La pretratación de residuos, como el triturado o ensilado, puede mejorar su biodisponibilidad y facilitar la degradación de los componentes más complejos, aumentando la producción de biogás.

- **Potencial energético teórico**

- **Digestión anaeróbica**

- La digestión anaerobia es un proceso de fermentación microbiana que ocurre sin oxígeno y produce una suspensión acuosa o "lodo", que alberga a los microorganismos encargados de descomponer la materia orgánica, y una combinación de gases (sobre todo

dióxido de carbono y metano), denominada "biogás". Los restos de comida, que tienen una elevada humedad, son el tipo de biomasa residual que se usa preferentemente como materia prima para este tratamiento (Lorenzo, 2005).

Tabla 2

Composición del biogás según el tipo de residuo

Componente	Residuos agrícolas	Lodos de depuradora	Residuos industriales	Gas de vertedero
Metano (CH₄)	50-80 %	50-80 %	50-70 %	45-65 %
Dióxido de carbono (CO₂)	20-50 %	20-50 %	30-50 %	34-55 %
Agua (H₂O)	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrógeno (H₂)	0-2 %	0-5 %	0-2 %	0-1 %
Sulfuro de hidrógeno (H₂S)	100-700 ppm	0-1 %	0-8 %	0.5-100 ppm
Amoníaco (NH₃)	Trazas	Trazas	Trazas	Trazas
Monóxido de carbono (CO)	0-1 %	0-1 %	0-1 %	Trazas
Nitrógeno (N₂)	0-1 %	0-3 %	0-1 %	0-20 %
Oxígeno (O₂)	0-1 %	0-1 %	0-1 %	0-5 %
Compuestos orgánicos	Trazas	Trazas	Trazas	5 ppm (terpenos, ésteres...)

Nota. La tabla muestra los principales componentes del biogás generado a partir de residuos agrícolas, lodos de depuradora, residuos industriales y gas de vertedero. Se observa que el metano varía entre 45 y 80 %, siendo el componente energético clave, mientras que gases como el sulfuro de hidrógeno y compuestos traza representan impurezas que deben ser tratadas antes de su aprovechamiento energético (Acosta, et al., 2005)

Tabla 3*Consumo de biogás en aplicaciones domésticas e industriales*

Equipo/Dispositivo	Detalle	Consumo
Cocina	Quemador Ø 2"	0,32 m ³ /h
Cocina	Por persona/día	0,33 m ³ /día
Cocina	02 quemadores inyector Ø2,0" ¹	0,50 m ³ /día
Horno	Cocina doméstica	0,44 m ³ /hora
Refrigerador	Quemador inyector Ø1,1 ¹	0,077 m ³ /h
Refrigerador	Porte mediano	2,20 m ³ /día
Motor	Ciclo Otto	0,45 m ³ /HP-hora
Ducha a gas	Para baño	0,80 m ³
Incubadora	Espacio interno	0,60 m ³ /h
Campana de rayos infra-rojos	1.500 Kcal inyector Ø2,0 ¹	0,162 m ³ /h
Calentamiento de agua	100 °C	0,08 m ³ /t
Electricidad	1 Kw/h	0,62 m ³ /h

Nota. La figura evidencia que el metano constituye el componente energético principal del biogás, mientras que el dióxido de carbono y otras impurezas, como el sulfuro de hidrógeno, reducen su calidad y requieren depuración para un mejor aprovechamiento. Adaptado de *La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I* (p. 40), por Acosta, et al., 2005, ICIDCA. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1).

- **Agua residual agroindustrial:**

Son aquellos efluentes líquidos generados durante el lavado, procesamiento y transformación de productos agrícolas. Estas aguas contienen una alta carga orgánica, compuesta por compuestos como azúcares, almidones, grasas, proteínas y sólidos suspendidos provenientes de la materia prima procesada. Su composición varía dependiendo del tipo de producto agrícola tratado, como frutas, hortalizas, cereales, o raíces. Además, estas aguas suelen contener pesticidas o fertilizantes utilizados en la producción agrícola, lo que añade una componente tóxica que debe ser tratada adecuadamente (Rosales, 2021).

El tratamiento de las aguas residuales agroindustriales es fundamental no solo para cumplir con las normativas ambientales, sino también para recuperar energía a partir de su contenido orgánico, a través de procesos como la digestión anaeróbica. El aprovechamiento

energético de estas aguas, en lugar de simplemente tratar y eliminar los contaminantes, representa una forma de economía circular que puede contribuir a la producción de biogás y al ciclo de reutilización de nutrientes en la agricultura, reduciendo el impacto ambiental de las industrias agroalimentarias (ONUPAA, 2019).

2.1.2.3. Digestión anaeróbica

Es un proceso biológico en el que la materia orgánica es descompuesta por microorganismos en un ambiente sin oxígeno, resultando en la producción de **biogás** y un efluente sólido denominado **digestato**, que puede ser utilizado como **biofertilizante**. Este proceso se lleva a cabo en cuatro etapas principales y está influenciado por diversos factores operacionales que afectan su eficiencia (Rosales, 2021).

- **El metano como producto energético**

El metano (CH_4) es el principal componente energético del biogás generado durante la digestión anaeróbica. Representando alrededor del 50% al 70% del biogás producido, el metano posee un alto poder calorífico de aproximadamente 35.8 MJ/m^3 , lo que lo hace adecuado para ser utilizado en aplicaciones energéticas como cocción doméstica, generación eléctrica, calefacción y como biocombustible en vehículos. La producción de metano depende de la materia orgánica biodegradable presente en los residuos, así como de las condiciones operativas del proceso. Una adecuada purificación del biogás, eliminando impurezas como el dióxido de carbono (CO_2) y el sulfuro de hidrógeno (H_2S), permite que el metano se utilice de manera más eficiente en aplicaciones energéticas (Rosales, 2021).

- **Etapas principales:**

La digestión anaeróbica consta de cuatro etapas metabólicas fundamentales, cada una mediada por diferentes grupos de microorganismos que trabajan en sinergia para descomponer la materia orgánica y producir biogás.

- **Hidrólisis:** Es la primera etapa del proceso, en la cual los compuestos orgánicos complejos, como carbohidratos, proteínas y lípidos, se descomponen en monómeros simples (azúcares, aminoácidos, ácidos grasos) por la acción de enzimas hidrolíticas. Esta fase es crítica, ya que la eficiencia del proceso depende en gran medida de la capacidad para liberar los sustratos disponibles para las siguientes etapas (Rosales, 2021).
- **Acidogénesis:** En esta fase, los productos de la hidrólisis (monómeros simples) son convertidos por bacterias ácido génicas en ácidos grasos volátiles, alcoholes y gases como hidrógeno y dióxido de carbono. Este paso produce compuestos que serán utilizados en la siguiente etapa para la generación de metano (Rosales, 2021).
- **Acetogénesis:** Durante la acetogénesis, los productos de la acidogénesis, como los ácidos grasos volátiles, son convertidos por bacterias acetogénicas en acetato, además de generar hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2). El acetato es crucial para la metanogénesis, ya que es el principal sustrato para la producción de metano.
- **Metanogénesis:** En la fase final, los microorganismos metanogénicos convierten el acetato y el hidrógeno en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). Este proceso es el más importante para la producción de biogás, ya que el metano es el componente de mayor valor energético (Rosales, 2021).

Factores que influyen: El rendimiento de la digestión anaeróbica depende de varios factores operacionales que deben ser cuidadosamente controlados para asegurar la eficiencia del proceso y maximizar la producción de biogás. Los factores más influyentes son:

- **Temperatura:** La temperatura afecta la actividad de los microorganismos y, por ende, la eficiencia de la digestión. Los sistemas pueden operar en condiciones mesofílicas (30-40°C) o termofílicas (50-60°C). Los procesos mesofílicos son más estables y más fáciles de controlar, mientras que los termofílicos pueden aumentar la velocidad de degradación de los sustratos, pero son más susceptibles a fluctuaciones de temperatura (ONUPAA, 2019).
- **pH:** El pH óptimo para la actividad de las bacterias metanogénicas es ligeramente alcalino, entre 6.8 y 7.5. Un pH demasiado ácido o alcalino puede inhibir el proceso y reducir la producción de biogás (ONUPAA, 2019).
- **Relación carbono/nitrógeno (C/N):** La relación C/N debe mantenerse en un rango ideal de 20:1 a 30:1. Si la relación es demasiado alta (exceso de carbono) o demasiado baja (exceso de nitrógeno), se pueden producir acumulaciones de amoníaco, que inhiben la actividad de los microorganismos metanogénicos (ONUPAA, 2019).
- **Tiempo de retención hidráulica (TRH):** El TRH es el tiempo que los residuos permanecen dentro del digestor. Un TRH adecuado permite una mayor descomposición de la materia orgánica, favoreciendo una mayor producción de biogás. Si el TRH es muy corto, el proceso puede ser incompleto; si es demasiado largo, la eficiencia de la planta disminuye (ONUPAA, 2019).
- **Mezcla de sustratos:** La co-digestión de diferentes tipos de residuos (por ejemplo, estiércol y residuos vegetales) puede mejorar la eficiencia de la digestión, ya que

optimiza la relación C/N y aumenta la biodisponibilidad de nutrientes para los microorganismos (ONUPAA, 2019).

- **Tipos de digestores:**

El tipo de digestor anaeróbico utilizado tiene un gran impacto en la eficiencia del proceso de digestión, dependiendo de la escala de operación y el tipo de residuo a procesar. Los principales tipos de digestores son (ONUPAA, 2019):

- **Digestores discontinuos (batch):** En este tipo de digestor, el sustrato se introduce en lotes y el proceso de digestión se lleva a cabo de manera continua hasta que el sustrato es completamente degradado. Este tipo es más utilizado en ensayos de laboratorio o en instalaciones de pequeña escala. Aunque es fácil de operar, su eficiencia es limitada debido a la variabilidad de los lotes y la necesidad de realizar ciclos de carga y descarga.
- **Digestores continuos (CSTR y UASB):** Los digestores de flujo continuo son más apropiados para grandes instalaciones industriales. El digestor CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor) es uno de los más comunes, ya que permite una mezcla constante del sustrato, lo que favorece la homogeneización del proceso. El digestor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) es utilizado principalmente para el tratamiento de aguas residuales de alta carga orgánica. Estos digestores pueden manejar grandes volúmenes de residuos y mantener un proceso más estable a lo largo del tiempo.

2.1.2.4. Co-digestión de residuos

La codigestión anaeróbica significa que dos o más materiales orgánicos se mezclan en un biodigestor, que es un contenedor que utiliza bacterias para descomponerlos y hacer biogás. El objetivo es hacer que el proceso funcione mejor y mejorar más biogás que si solo se usara un material. Este método intenta usar materiales que tengan cualidades diferentes pero buenas

juntas, lo que ayuda a mantener la cantidad correcta de carbono y nitrógeno, el nivel de agua y los nutrientes que los microbios necesitan para crecer (Mata et al., 2014). Co-Instrumento funciona mediante el uso de diferentes sustancias que tienen diferentes propiedades químicas.

1). - Zheng, Liu y Chen (P Estos microbios ayudan a descomponer los desechos en sustancias más simples que pueden usarse como energía o fertilizante. - La complementariedad ayuda a evitar problemas con la digestión causados por amoníaco o ácidos grasos que no son comunes en otros alimentos.

El co-instrumento ayuda a obtener más metano de biogás porque mezcla piezas fáciles de desgarrar con piezas difíciles de desplazar, lo que hace que el biogás dure más y funcione mejor (Li, et al. 2011). Este proceso también ayuda con la gestión de residuos, ya que puede tratar los desechos desde diferentes lugares al mismo tiempo, haciendo que los biodigestores funcionen mejor y más barato.

Co-Instrument es una forma de hacer cosas que son buenas para el medio ambiente y la economía. Evitar la forma incorrecta de deshacerse de los desechos ayuda a reducir el estrés en los vertederos y las fuentes de agua. Y al mismo tiempo, es un mejor fertilizante al tener una cantidad más uniforme de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio (Yenigün y Demirel, 2013).

- **Ventajas técnicas**

La co-digestión anaeróbica es una forma de romper la materia orgánica sin oxígeno que tiene muchos beneficios que han sido probados por muchos estudios y muestran cómo se puede utilizar en la gestión de la agricultura y los residuos. - Algunos beneficios del uso de la digestión anaeróbica son: - Ayuda a diferentes tipos de bacterias a trabajar juntos y a hacer productos más útiles. - Utiliza la menor cantidad de energía y aprovecha

al máximo los desechos. - Reduce los efectos nocivos del amoníaco, lo que puede dañar el medio ambiente y la salud humana.

Los diferentes tipos de materiales que se mezclan crean un buen ambiente para las bacterias que los descomponen. Esto se debe a que la bacteria puede usar diferentes tipos de azúcares y otras sustancias para crecer y trabajar juntos. Las bacterias que hacen esto se llaman bacterias hidrolíticas, acidez, acetogénicas y metanogénicas. Trabajan en diferentes etapas para convertir los materiales en gases y líquidos. Mata et al., 2014, la oración significa que diferentes tipos de desechos tienen diferentes efectos en el proceso de fermentación. Los desechos que tienen muchos carbohidratos pueden hacer que la fermentación ocurra rápidamente, pero los desechos que tienen muchas proteínas o grasas pueden hacer que la fermentación ocurra lenta y constantemente, lo que es mejor para el proceso.

El segundo punto es que la codigestión mejora el proceso de mejorar el metano al dar a los microbios más alimentos y asegurarse de que tengan la cantidad correcta de carbono y nitrógeno. - Algunos experimentos han encontrado que mezclar estiércol y restos de comida hace más biogás que usar solo un tipo de desechos. - La cantidad de biogás producido es mayor cuando se combinan los restos de estiércol y alimentos que cuando se usan por separado (Li, 2011). La oración significa que cuando el estiércol de animales como los cerdos tiene mucho carbono, hace que el nitrógeno sea menos dañino para los microbios que lo descomponen. Esto ayuda a los microbios a funcionar mejor y hace que el estiércol sea más seguro.

La codigestión ayuda a reducir la inhibición del amoníaco, que es un problema común al digerir el estiércol y los desechos de proteínas. Los altos niveles de amoníaco que no son utilizados por la bacteria pueden evitar que hagan biogás, o incluso hacer que el proceso deje de funcionar (Yenigün y Demirel, 2013). Zheng, et al. (2015) encontraron

que agregar desechos a los siglos conjuntos o materiales de alto carbohidrato puede reducir la cantidad de nitrógeno y mantener el sistema funcionando bien.

2.1.3. Producción de biogás

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complicado donde los microorganismos descomponen material orgánico sin la presencia de oxígeno, generando un gas conocido como biogás. El biogás típicamente está formado en su mayoría por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), en proporciones que oscilan entre el 50 y el 70 % de CH_4 y del 30 al 50 % de CO_2 , además de trazas de otros gases como sulfuro de hidrógeno (H_2S), hidrógeno (H_2) y amoníaco (NH_3) (Angelidaki et al., 2018).

La presencia de nitrógeno, fósforo y materia orgánica en los residuos agroindustriales es un elemento fundamental para valorar su capacidad de uso en digestión anaeróbica, así como para establecer su utilidad agrícola como fertilizante después del procedimiento. Estos componentes constituyen el fundamento del reciclaje de nutrientes en sistemas de bioenergía y agricultura sostenible, puesto que facilitan el cierre de ciclos productivos, disminuyendo la dependencia de recursos externos y reduciendo los efectos ambientales vinculados a su inadecuada disposición. el nitrógeno está en su mayoría en forma de proteínas y compuestos amínicos, y puede ser liberado como amonio (NH_4^+) o amoníaco libre (NH_3) durante la digestión anaeróbica. Este último puede provocar inhibiciones en la metanogénesis si se concentra por encima de ciertos niveles críticos. De acuerdo con Hansen et al. (2006), los niveles de amoníaco libre superiores a 3 g/L pueden afectar de manera significativa el desarrollo de los metanógenos acetoclásticos. Sin embargo, en cantidades apropiadas, el nitrógeno es un nutriente esencial para el crecimiento microbiano y también ayuda a mejorar el valor fertilizante del digestato final.

El fósforo está presente en las fracciones tanto minerales como orgánicas de los desechos, y cumple una función esencial en la síntesis de ATP y en la estabilidad de las membranas celulares de los microorganismos. En el proceso de digestión anaeróbica, la mayor parte del fósforo se queda en el digestato en una forma accesible para las plantas, haciendo que este subproducto sea un insumo agrícola muy relevante. Según Tambone et al. (2010), el fósforo presente en el digestato de residuos agroindustriales es más soluble y estable, lo que mejora su uso agronómico en relación con la aplicación directa de estiércol crudo.

La materia orgánica en los residuos agroindustriales es la principal fuente de energía para los microorganismos anaerobios, y su nivel de degradabilidad influye directamente en la generación de biogás. La porción que se degrada rápidamente está formada por carbohidratos solubles, lípidos y proteínas, mientras que la porción más resistente se relaciona con compuestos lignocelulósicos y lignina. Según Moller et al. (2004) la materia orgánica presente en estiércoles y desechos agroindustriales tiene una tasa de degradación moderada, lo que garantiza una producción constante de metano a lo largo del tiempo, asimismo, la materia orgánica que no se convierte en biogás queda en el digestato como enmienda para el suelo, mejorando su estructura y su capacidad para retener agua.

La proporción de nitrógeno, fósforo y materia orgánica establece la viabilidad técnica de la digestión anaeróbica y la calidad del digestato resultante. Por ejemplo, en desechos con alto contenido de nitrógeno, como la porcínaza, hay un peligro de inhibición por amoníaco si no se controla a través de co-digestión con materiales ricos en carbono. En contraste, los residuos con bajo contenido de nitrógeno, como los de frutales, pueden beneficiarse de la combinación con estiércoles animales para lograr una relación C/N óptima entre 20 y 30, promoviendo así una mayor producción de biogás y un digestato equilibrado en nutrientes (Zhao et al., 2010).

- **Biodigestión:**

Es un proceso biológico natural mediante el cual diversos microorganismos descomponen materia orgánica, como residuos agrícolas, estiércol, restos de alimentos o aguas residuales, en un ambiente anaeróbico (sin presencia de oxígeno), durante este proceso, la materia orgánica se transforma principalmente en biogás, compuesto en su mayoría por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), y en digestato, un residuo semilíquido rico en nutrientes que puede utilizarse como fertilizante. La biodigestión permite aprovechar residuos orgánicos para generar energía renovable, reducir emisiones contaminantes y disminuir el impacto ambiental de los desechos, por lo que se considera una tecnología clave dentro de los sistemas de gestión sostenible y economía circular (Dwyer, y Efrón, 2017).

- **Biogás:**

Mezcla de gases producida por la degradación anaerobia de residuos orgánico, está compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), además de trazas de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno y vapor de agua, su alto contenido de metano le confiere poder calorífico, lo que permite su uso como fuente renovable de energía para calefacción, cocción, generación eléctrica o como combustible vehicular tras su purificación, se considera una alternativa sostenible porque aprovecha desechos orgánicos y reduce emisiones contaminantes.

Tabla 4*Propiedades Fisicoquímicas del metano*

Propiedades físicas	Propiedades químicas
Masa molecular: 16,04 g/mol	Casi inerte debido a la elevada estabilidad de los enlaces C-H
Punto de ebullición: -161° C	Baja polaridad
Punto de fusión: -183° C	No se ve afectado por ácidos o bases fuertes
Densidad relativa del gas (referencia; aire=1): 0.6	No se afecta por oxidantes como el permanganato
Temperatura de autoignición: 537° C	
Solubilidad en agua (m/100ml a 20° C): 3.3	

- **Poder calorífico del metano (energía contenida por m³)**

El poder calorífico del metano es uno de los parámetros clave para evaluar la viabilidad energética del biogás producido en el proceso de digestión anaeróbica, el metano (CH₄), que constituye aproximadamente entre 50% y 70% del biogás, posee un alto valor energético, con un poder calorífico teórico de 35.8 MJ/m³, similar al del gas natural. Este valor puede variar ligeramente dependiendo de la pureza del metano y la cantidad de impurezas presentes en el biogás, como el dióxido de carbono (CO₂) y el sulfuro de hidrógeno (H₂S), que reducen su poder calorífico.

El poder calorífico del metano es fundamental para su uso como fuente de energía renovable en diversas aplicaciones. La energía contenida por metro cúbico de metano es comparable con la de otros combustibles fósiles, lo que hace que el biogás sea una opción atractiva para sustituir gas natural en usos térmicos y eléctricos. Además, permite medir la eficiencia energética de un sistema de digestión anaeróbica, ya que cuanto mayor es la producción de metano, mayor será la cantidad de energía recuperable del proceso (Dwyer, y Efrón, 2017).

- **Usos del biogás enriquecido en metano**

El biogás generado a partir de residuos orgánicos tiene múltiples aplicaciones energéticas, principalmente debido a su contenido de metano (CH₄). Este gas, una vez purificado y concentrado, puede utilizarse en diversas formas que van desde el consumo doméstico hasta la producción de electricidad y biocombustibles (Dwyer, y Efrón, 2017).

Cocción: En muchas comunidades rurales, el biogás se utiliza en cocinas de gas, reemplazando los combustibles tradicionales como la leña o el gas propano. Este uso es particularmente relevante en áreas donde el acceso a fuentes de energía convencionales es limitado, contribuyendo a la reducción de la deforestación y mejorando la salud pública al reducir la exposición al humo de la biomasa (Dwyer, y Efrón, 2017).

Generación eléctrica: El biogás también puede ser utilizado en generadores eléctricos, proporcionando una fuente de energía limpia y sostenible para pequeñas comunidades, industrias o instalaciones agrícolas. Mediante la combustión del biogás en motores de combustión interna o turbinas, se puede generar electricidad, lo que mejora la autonomía energética y puede incluso contribuir al suministro de electricidad a la red (Dwyer, y Efrón, 2017).

Biocombustibles: A través de un proceso de purificación y conversión, el biogás puede transformarse en biometano, un gas que es prácticamente idéntico al gas natural. El biometano tiene aplicaciones similares, incluyendo su uso como combustible vehicular (en vehículos adaptados a gas natural) o su inyección en la red de gas natural. Esto no solo ayuda a reducir las emisiones de gases contaminantes,

sino que también ofrece una alternativa renovable y más económica a los combustibles fósiles, estos usos del biogás enriquecido en metano constituyen una solución sostenible para la valorización energética de residuos, promoviendo la economía circular y reduciendo la dependencia de fuentes de energía convencionales (Dwyer, y Efrón, 2017).

2.1.4. Parámetros de evaluación energética y eficiencia

- **Producción específica de biogás ($\text{m}^3/\text{kg SV}$)**

La producción específica de biogás es uno de los principales indicadores para evaluar la eficiencia de un proceso de digestión anaeróbica. Este parámetro se refiere a la cantidad de biogás generado por cada kilogramo de sólidos volátiles (SV) presentes en el sustrato alimentado al digester. La producción específica de biogás se expresa en unidades de volumen de biogás producido por unidad de materia orgánica biodegradable ($\text{m}^3/\text{kg SV}$), este valor varía según el tipo de residuo, la relación C/N, el tiempo de retención y las condiciones operativas del digester. Para residuos como estiércoles, residuos agrícolas o residuos orgánicos urbanos, los valores típicos de producción pueden variar entre $0.2 \text{ m}^3/\text{kg SV}$ y $0.6 \text{ m}^3/\text{kg SV}$. La evaluación de este parámetro es esencial para determinar la viabilidad energética de un proyecto de digestión anaeróbica, ya que indica la eficiencia en la conversión de materia orgánica en biogás (Dwyer, y Efrón, 2017).

- **Poder calorífico del biogás**

Es un indicador importante para valorar la cantidad de energía que puede ser aprovechada de este gas. Dado que el biogás es una mezcla de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), el poder calorífico se calcula principalmente en función del

contenido de metano, que es el principal componente energético, un biogás típico puede tener un poder calorífico de entre 20 a 25 MJ/m³, dependiendo de su composición, la cantidad de metano en el biogás influye directamente en su potencial para ser utilizado en aplicaciones energéticas, como la generación de electricidad o cocción doméstica, el poder calorífico del biogás se ve afectado por la pureza del metano, la concentración de impurezas (como el CO₂ y H₂S), y las condiciones de purificación que el gas haya recibido. Cuanto más alto sea el contenido de metano y menos impurezas haya en el biogás, mayor será su eficiencia energética y su aplicabilidad en procesos térmicos (Dwyer, y Efrón, 2017).

- **Rendimiento energético en biodigestores de laboratorio y a escala piloto**

El rendimiento energético de los biodigestores se refiere a la eficiencia con la que los sistemas de digestión anaeróbica convierten la materia orgánica en biogás aprovechable. Este rendimiento puede ser evaluado en biodigestores de laboratorio o en escala piloto para obtener datos que sirvan para el diseño y operación de plantas a gran escala. La medición del rendimiento energético implica la comparación entre la energía contenida en el sustrato inicial y la energía recuperada en forma de biogás, en biodigestores de escala piloto, que simulan condiciones operativas de plantas industriales, se suelen realizar pruebas con diferentes tipos de residuos y diferentes condiciones de operación (tiempo de retención, temperatura, pH, mezcla de sustratos). Los resultados obtenidos en estos ensayos permiten ajustar y optimizar los parámetros operacionales del sistema para maximizar el rendimiento energético, de manera que el proceso sea económicamente viable y ambientalmente sostenible (Dwyer, y Efrón, 2017).

III.MÉTODO

3.1.Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada por que el diseño que se utilizo es Experimental, las variables fueron modificadas para encontrar una solución al problema planteado, motivo por el cual se realizó este estudio, es un cambio en las condiciones de operación de un sistema o proceso, que se hace con el objetivo de medir el efecto del cambio en una o varias propiedades del producto o resultado (Gutiérrez y de la Vara, 2008).

Entonces también se enmarca en el diseño Cuantitativo –correlacional, porque nuestros resultados fueron en números y relacionaron las variables, señalan que los estudios cuantitativos pueden clasificarse según la existencia (o no) de intervenciones realizadas por los investigadores en: experimentales y no experimentales (Branca y Cuenca, 2024).

Asimismo, pertenece al diseño longitudinal porque un estudio como longitudinal radica en los cambios en el tiempo del fenómeno investigado, por lo que requieren al menos dos momentos diferentes en que van a ser obtenidos los mismos datos (Martínez y Espinal, 2023).

3.2.Ámbitos temporal y espacial

3.2.1. *Ámbito temporal*

La recolección de datos se realizó durante 30 días.

3.2.2. *Ámbito espacial*

La investigación se realizó en Boza, Aucallama en la Provincia de Huaral, Lima - Perú, una región agroindustrial rural destacada por su alta producción de frutas y vegetales. Se planteó la implementación de tecnologías para la valorización energética, tal como la digestión anaeróbica, con el fin de manejar los residuos orgánicos en esta área rural.

3.3. Variables

Variable independiente: Digestión Anaeróbica

Variable dependiente: Valorización Energética

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

La población del estudio está conformada por el total de residuos agroindustriales orgánicos generados en la localidad de Boza, distrito de Aucallama, durante el periodo actividad agropecuaria comprendido entre junio hasta diciembre. Estos residuos provienen principalmente del procesamiento de frutas (como mandarina, palta, fresa, entre otros) y hortalizas, actividades predominantes en la zona.

3.4.2. Muestra

El muestreo es intencionado, basado en la disponibilidad y viabilidad de los residuos para el proceso experimental.

$$N = T \times R$$

N = Número Total De Unidades Experimentales

T = Número De Tratamientos

R = Número De Repeticiones Por Tratamiento

Es un diseño DCA (Diseño Completamente al Azar) lineal de grado cero (Anexo A)

La muestra estuvo compuesta por tres tipos de residuos orgánicos: residuos de fruta (fresa), agua residual y porcinaza, recolectados en la zona de Aucallama, provincia de Huaral, se determinó 15 tratamientos diferentes, cada uno con proporciones variables de porcinaza,

agua residual y residuos de fruta, según se detalla en la Tabla 5, cada tratamiento se repitió 3 veces, totalizando 45 unidades experimentales, la cantidad total de residuos orgánicos utilizados fue de 20.5 kg, distribuidos en 16 kg de porcinaza, 1.800 kg de agua residual y 2.700 kg de residuos de fruta, manteniendo las proporciones establecidas para cada tratamiento y garantizando la homogeneidad experimental. Las condiciones de temperatura se controlaron entre 18°C y 21°C durante un periodo de 30 días, con mediciones diarias de producción de biogás.

Tabla 5

Proporciones de residuos por tratamiento experimental

Nº de Tratamiento	X1: Porcinaza (ml)	X2: Agua residual (ml)	X3: Residuos de fruta (g)
1	1000	180	90
2	1000	120	180
3	750	180	180
4	1000	120	180
5	750	120	180
6	750	60	90
7	1500	60	270
8	1000	120	90
9	1500	120	90
10	1500	180	270
11	750	120	270
12	1000	60	180
13	1000	180	180
14	1000	120	270
15	1500	60	180

3.5. Instrumentos

Material de laboratorio

- Vaso de precipitación (vidrio o plástico)
- Probeta graduada
- Tubos de ensayo
- Pipetas graduadas o automáticas
- Matraz aforado
- Bureta

- Termómetro de laboratorio
- pH-metro
- Conductímetro
- Balanza gramera

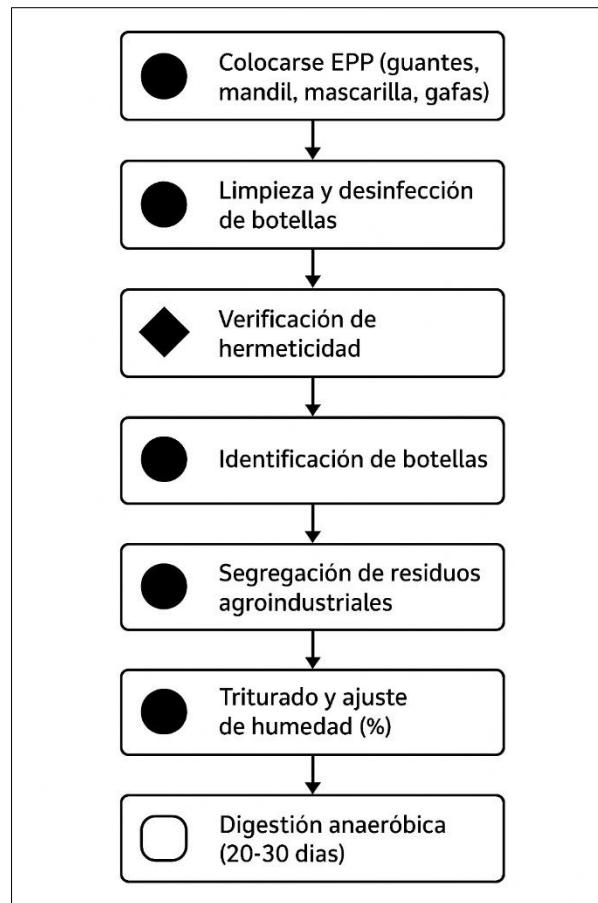
Material del biodigestor

- Manguera de ¼ pulgada
- Botella de 3000 ml o 3 L
- Botella calibrada de 50 ml
- Tapones de jebe microporoso

3.6.Procedimientos

- Medidas de seguridad previas al experimento: Antes de iniciar el experimento, se recomienda utilizar guantes de nitrilo, mascarilla, gafas de seguridad y mandil de laboratorio, con el fin de prevenir el contacto directo con materiales orgánicos en descomposición y posibles emisiones de gases, asimismo, el área de trabajo debe estar bien ventilada y contar con un sistema de control de temperatura.
- Preparación de las botellas o biodigestores: Se limpiaron y desinfectaron las botellas utilizadas como biodigestores para evitar contaminación cruzada, luego se verificó su hermeticidad mediante pruebas de presión y se adaptaron válvulas de salida para la medición del biogás, cada botella fue identificada según el tipo de tratamiento asignado.
- Acondicionamiento de las levaduras (inóculo): Se preparó el inóculo a partir de un biodigestor activo o porcinaza aclimatada, asegurando que las levaduras y bacterias metanogénicas se encontraran en fase activa de digestión, este inóculo fue homogeneizado y mantenido en condiciones mesofílicas antes de ser incorporado a los biodigestores experimentales.

- Selección de residuos orgánicos: Se inició con la segregación y recolección de residuos agropecuarios en la zona de Boza, asegurando su frescura para prevenir descomposición prematura, posteriormente, se preparó el sustrato triturando los residuos y ajustando la relación de humedad, manteniendo el contenido de sólidos entre 8% y 12% para optimizar la digestión anaeróbica.
- Diseño de tratamientos: Se establecieron 15 corridas experimentales que involucraron los factores tipo de residuo, relación sustrato/agua, concentración del sustrato y pH inicial, aplicadas en 45 biodigestores a escala de laboratorio.
- Carga y operación de biodigestores: Los biodigestores fueron cargados con la mezcla adecuada de sustrato e inóculo, manteniendo condiciones mesofílicas (18–21 °C) y un pH cercano a 7. Se especificó un tiempo de retención hidráulica (TRH) entre 20 y 30 días, operando bajo un régimen discontinuo o semicontinuo, según los objetivos del tratamiento, el sellado fue hermético para evitar pérdidas de gas.
- Monitoreo del proceso: Durante todo el proceso, se registraron los volúmenes de biogás, su composición, el pH y otros parámetros fisicoquímicos relevantes, los datos obtenidos fueron procesados mediante el software estadístico para analizar la significancia de las variables y con regresión estadística para identificar tendencias y correlaciones entre los factores experimentales.

Figura 4*Diagrama de operaciones*

3.7. Análisis de Datos

Previo a la formulación del modelo estadístico, se realizó un análisis descriptivo de las variables. Las medidas de sesgo y curtosis estandarizadas se encontraron dentro del rango aceptado para la normalidad (-2 a +2), lo cual respalda el uso de modelos lineales paramétricos. Además, el coeficiente de variación permitió evaluar la homogeneidad de los tratamientos.

Tabla 6*Resumen Estadístico*

	Relación porcinaza, agua residual	Agua Residual	Residuos de Frutas
Recuento	15	15	15
Promedio	1.2	4.0	6.0
Desviación Estándar	0.0755929	1.51186	2.26779
Coefficiente de Variación	6.29941%	37.7964%	37.7964%
Mínimo	1.1	2.0	3.0
Máximo	1.3	6.0	9.0
Rango	0.2	4.0	6.0
Sesgo Estandarizado	0	0	0
Curtosis Estandarizada	-0.851382	-0.851382	-0.851382

Nota. El resumen estadístico mostró que los datos presentan una distribución simétrica, con sesgo igual a cero. No obstante, la curtosis negativa y la diferencia en los coeficientes de variación entre las variables indican una dispersión desigual. Por ello, se descartó el uso de pruebas paramétricas y se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, adecuada para comparar grupos con varianzas diferentes y sin necesidad de normalidad.

Atributos de la Superficie de Respuesta

- Clase de diseño: Superficie de Respuesta
- Nombre del Diseño: Diseño de Box-Behnken

Diseño Base

- Número de factores experimentales: 3
- Número de bloques: 1
- Número de respuestas: 1
- Número de corridas: 15, incluyendo 3 puntos centrales por bloque
- Grados de libertad para el error: 5

- Aleatorizar: Sí

Tabla 7

Factores experimentales y niveles evaluados

Factores	Bajo	Alto	Unidades	Continuo
Relación porcina: agua	1.1	1.3	ml	Sí
Agua Residual: agua	2	6	%	Sí
Residuos de Frutas: agua	3	9	%	Sí

Nota. Ha creado un diseño de Box-Behnken el cual estudiará los efectos de 3 factores en 15 corridas. El diseño deberá ser ejecutado en un solo bloque. El orden de los experimentos ha sido completamente aleatorizado. Esto aportará protección contra el efecto de variables ocultas.

Tabla 8

Distribución de los valores de las Variables según el diseño de Box-Behnken

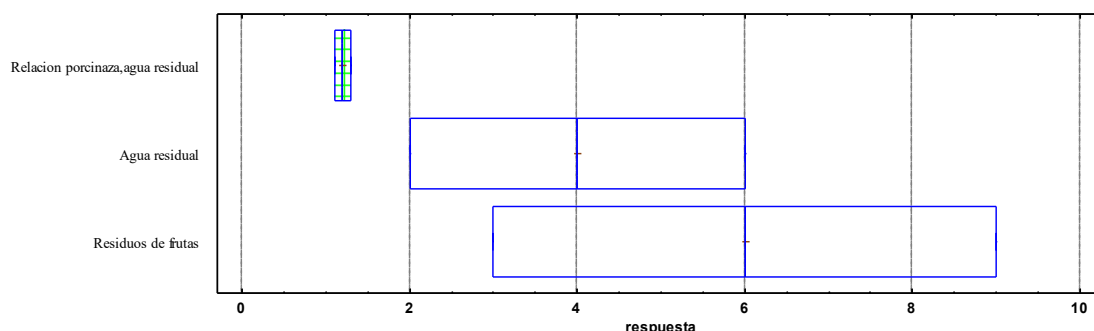
N° de Tratamientos	Variable		
	X1	X2	X3
1	1.2	6	3
2	1.2	4	6
3	1.3	6	6
4	1.2	4	6
5	1.3	4	6
6	1.3	2	3
7	1.1	2	9
8	1.2	4	3
9	1.1	4	3
10	1.1	6	9
11	1.3	4	9
12	1.2	2	6
13	1.2	6	6
14	1.2	4	9
15	1.1	2	6

Tabla 9*Prueba de Kruskal-Wallis*

	Tamaño de Muestra	Rango Promedio
relación porcinaza, agua residual	15	8.0
Agua residual	15	26.8667
Residuos de frutas	15	34.1333

Estadístico = 32.4605 Valor-P = 8.93893E-8

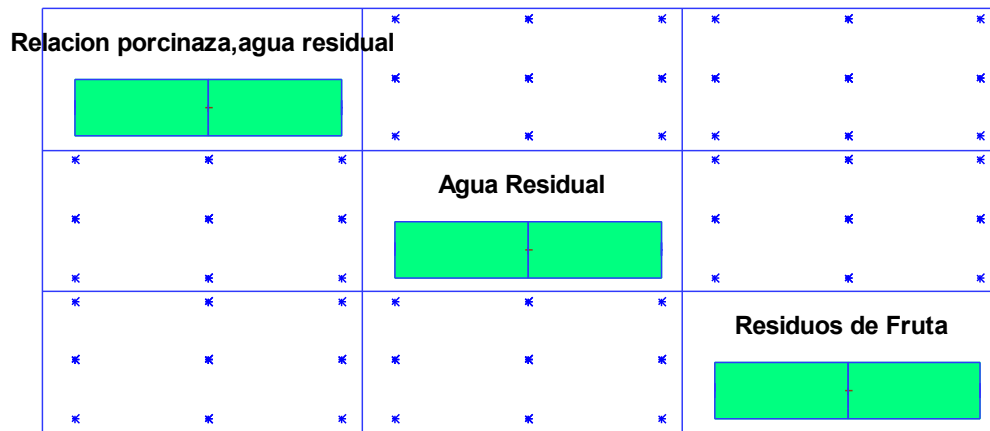
Nota. La prueba de Kruskal-Wallis mostró que existen diferencias estadísticamente significativas entre al menos uno de los tratamientos evaluados (estiércol con agua, agua residual y residuo de fruta). Esto significa que las medianas de los tratamientos no son iguales, lo que indica que el tipo de tratamiento influye en el resultado medido. Debido a que los datos no cumplían con la normalidad, esta prueba no paramétrica fue adecuada y confirma que hay efectos diferenciados entre los tratamientos aplicados. se generaron diagramas de caja y bigotes, que permitieron identificar visualmente las medianas distintas entre tratamientos.

Figura 5*Gráfico caja y Bigotes*

Nota. Dicha interpretación se observó diferencias significativas en las medianas de los tratamientos. El tratamiento con desechos de frutas mostró la mediana más alta y mayor variabilidad en la respuesta en comparación con los demás.

Figura 6

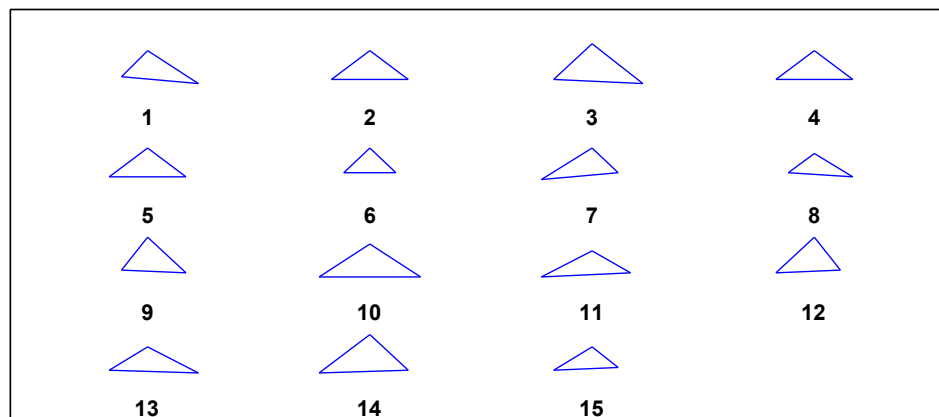
Boxplot con puntos individuales para los tres tratamientos.



Nota. El gráfico muestra que los residuos de frutas presentan mayor dispersión de datos, mientras que la relación porcinaza–agua residual tiene menor variabilidad. Esto refuerza que los residuos de frutas tuvieron mayor efecto en la variable evaluada.

Figura 7

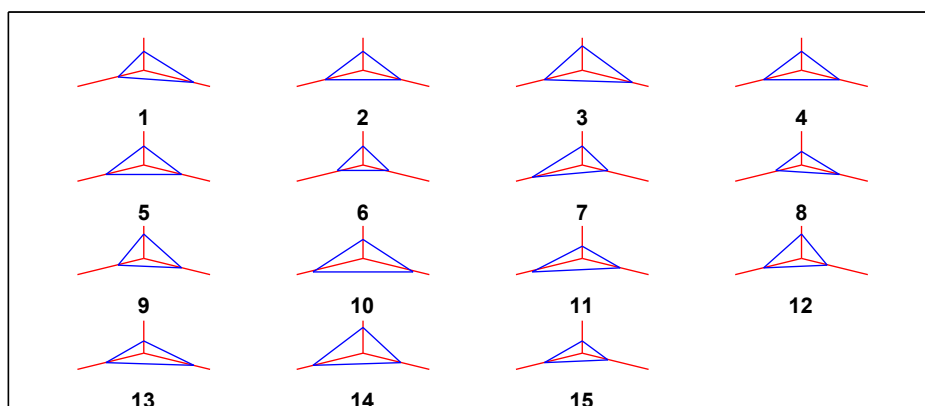
Distribución Gráfica de Proporciones Relativas de Tratamientos Orgánicos en 15 Muestras



Nota. Representación gráfica de las proporciones relativas de tres tratamientos (Relación porcinaza–agua residual, Agua residual y Residuos de frutas) en 15 muestras individuales. Cada triángulo muestra la distribución específica de los tres componentes por muestra, indicando variabilidad en la formulación de las mezclas. La diversidad en la forma de los triángulos refleja las diferencias en las proporciones empleadas, lo que puede estar asociado a la variabilidad observada en los resultados experimentales.

Figura 8

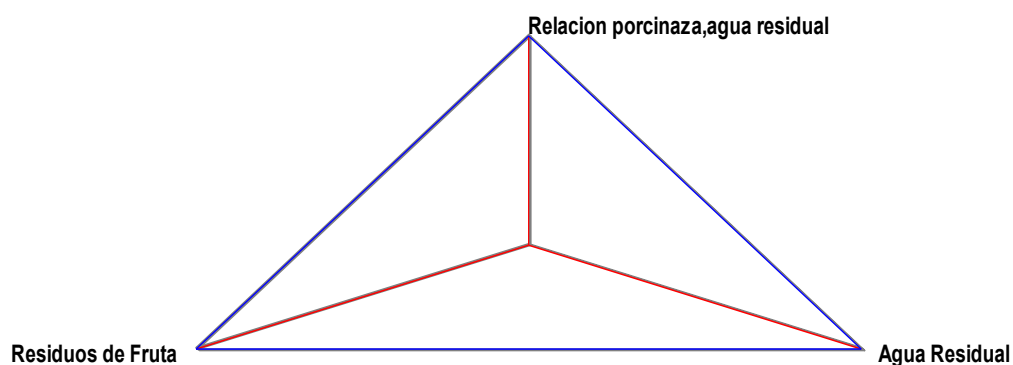
Comparación Gráfica de Proporciones Relativas Observadas y Promedio de Tratamientos Orgánicos en 15 Muestras



Nota. Comparación entre las proporciones observadas (línea azul) y promedio (línea roja) de tres tratamientos orgánicos en 15 muestras. Se evidencia mayor variabilidad en agua residual y residuos de frutas, y mayor estabilidad en la relación porcínaza–agua residual. Este gráfico confirma visualmente los resultados estadísticos obtenidos.

Figura 9

Diagrama Triangular de la Composición Relativa de Tres Tratamientos



Nota. Diagrama triangular que representa la distribución relativa de los tres tratamientos evaluados: relación porcínaza–agua residual, agua residual y residuos de frutas. Cada vértice indica una composición pura, mientras que el triángulo interno (rojo) representa una composición pura.

combinación específica de estos tratamientos. Esta representación es útil para visualizar las proporciones relativas y sus posibles efectos sobre los parámetros evaluados.

Se realizó de acuerdo con Barrena (2019) una investigación en la Universidad Nacional de Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM) Chachapoyas-Perú el cual emplearon la estadística de BOX BEHNKEN para la elaboración de sus datos e obtener los resultados para su experimento, el experimento consta de las variables independientes el cual fueron en relación estiércol: agua, % (volumen /volumen) de agua de desagüe con respecto biodigestores y %(peso/volumen) de cascara de papa.

Tabla 10

Niveles de concentración de los factores experimentales

Concentración	Relación de porcinaza: con agua de riego	Agua residual (%(vol./vol.)	Residuos de frutas (%(peso/vol.)
Alta (+)	1:1	6	9
Media (0)	1:2	4	6
Baja (-)	1:3	2	3

Nota. En base a los que se calculó la cantidad de estiércol, agua de desagüe y cascara de papa tomado de Valor de las variables independientes a evaluar con el diseño estadístico de Box- Behnken

Tabla 11*Niveles experimentales para el análisis multifactorial*

N° de Experimento	Variable		
	X1	X2	X3
1	+	+	+
2	+	+	0
3	+	0	+
4	0	+	+
5	+	+	-
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	0	0
9	0	0	0
10	0	-	-
11	-	-	0
12	+	0	-
13	-	0	+
14	0	-	+
15	-	-	-

Nota. Cada experimento se realizó en base a la actual tabla que vendría a hacer la distribución de los valores para las tres variables.

Según los datos mostrados del resumen estadístico podemos destacar que se observaron valores de sesgo estandarizado iguales a cero, lo cual indica que las distribuciones de datos son simétricas. Sin embargo, la curtosis estandarizada fue negativa (-0.85), lo que sugiere que la distribución de los datos es más plana que una distribución normal (menos concentración en la media y colas más ligeras). Aunque estos valores por sí solos no descartan completamente la normalidad, al combinarse con la alta variabilidad entre las variables (coeficientes de variación muy diferentes), se considera que no se cumplen todos los supuestos necesarios para aplicar una prueba paramétrica, por ello, se optó por utilizar la prueba de Kruskal-Wallis, que es una alternativa no paramétrica apropiada cuando no se puede asegurar la normalidad ni la homogeneidad de varianzas.

3.8.Consideraciones éticas

- Manejo responsable de los residuos: Todos los residuos agroindustriales utilizados (porcinaza, agua residual, residuos de frutas) serán recolectados y manipulados bajo condiciones seguras e higiénicas, evitando la contaminación del ambiente y cuidando la salud del personal involucrado.
- Cumplimiento de normativas ambientales y sanitarias: El proyecto se desarrollará cumpliendo las regulaciones nacionales y locales relacionadas con la disposición de residuos y el tratamiento anaeróbico, asegurando que los procedimientos sean ambientalmente sostenibles y legalmente adecuados.
- Seguridad del personal de investigación: Se implementarán medidas de bioseguridad (uso de guantes, mascarillas, lentes protectores) para proteger la salud del investigador y de los asistentes que participen en la recolección, preparación y manipulación de los materiales.
- Uso ético de los datos: Los datos obtenidos en la investigación se tratarán con integridad, reportándose los resultados de forma veraz, sin manipulación, asegurando la transparencia y la reproducibilidad del estudio.
- Minimización del impacto ambiental: El proceso experimental se diseñará para minimizar cualquier tipo de impacto ambiental (emisiones, lixiviados, olores), procurando que los subproductos del estudio sean manejados adecuadamente o dispuestos según la normativa vigente.

IV. RESULTADOS

4.1. Identificar los diversos residuos agroindustriales que predominan en la zona de Aucallama- Huaral para el desarrollo del proyecto.

El muestreo y diagnóstico de campo en la zona permitió identificar tres grupos de residuos agroindustriales con disponibilidad suficiente para ser considerados en el proyecto:

- Residuos frutales: Predominantemente fresa.
- Aguas residuales agroindustriales: Efluentes de procesos.
- Porcinaza (estiércol porcino): Residuo de origen pecuario con generación estable a lo largo del año en unidades productivas locales; presenta alta carga orgánica y nutrientes.

4.2. Medir y cuantificar el volumen de biogás obtenido mediante la digestión anaeróbica de los residuos agroindustriales de la zona de Aucallama – Huaral.

Este objetivo permite cuantificar la producción total de biogás generada por cada unidad experimental y tipo de tratamiento, considerando el rendimiento acumulado durante todo el periodo de digestión, los datos presentados provienen del registro diario de producción de biogás para las 45 unidades experimentales (detalle Anexo E), agrupadas en tres tratamientos: agua residual, residuos de fruta (fresa) y porcinaza.

Tabla 12

Tabla resumen de producción por tratamiento

Grupo de tratamiento	N (UE)	Volumen total (mL)	Media por UE (mL)
Agua residual	15	25,366	1,691.07
Residuos de fruta (fresa)	15	78,498	5,233.13
Porcinaza	15	123,741	8,249.40

Los resultados descriptivos permiten cuantificar la producción total de biogás generada por los tres tipos de sustratos evaluados, se observa que:

- El tratamiento con agua residual produjo el menor volumen acumulado, con un promedio de 1,691.07 mL por unidad experimental, lo que representa un nivel bajo de generación de biogás.
- Los residuos de fruta (fresa) alcanzaron una producción intermedia, con 5,233.13 mL por unidad, más de tres veces lo obtenido con agua residual.
- La porcina registró el mayor aporte de biogás, con 8,249.40 mL por unidad experimental, lo que confirma su elevada capacidad metanogénica.

La diferencia entre el menor y mayor valor promedio es de 6,558.33 mL, lo que evidencia claramente que el tipo de sustrato influye de manera directa sobre la cantidad de biogás producido, desde una perspectiva cuantitativa, los resultados permiten establecer que:

- La porcina es el sustrato más eficiente para la producción de biogás,
- Los residuos de fruta representan un sustrato moderadamente eficiente.
- El agua residual muestra un rendimiento limitado en términos de generación energética.

En conjunto, el análisis confirma que la disponibilidad de sustratos agroindustriales en la zona de Aucallama – Huaral representa un potencial significativo para la producción de biogás, especialmente cuando se emplean residuos orgánicos con alto contenido de materia biodegradable, como la porcina y las frutas.

4.3. Evaluar que tratamiento de residuos agroindustriales permite obtener mayor cantidad de biogás en zona de Aucallama- Huaral

4.3.1. Análisis de varianza

El análisis de varianza se aplicó para determinar si existían diferencias significativas entre los tres tratamientos evaluados. Los resultados indicaron diferencias altamente significativas:

Tabla 13

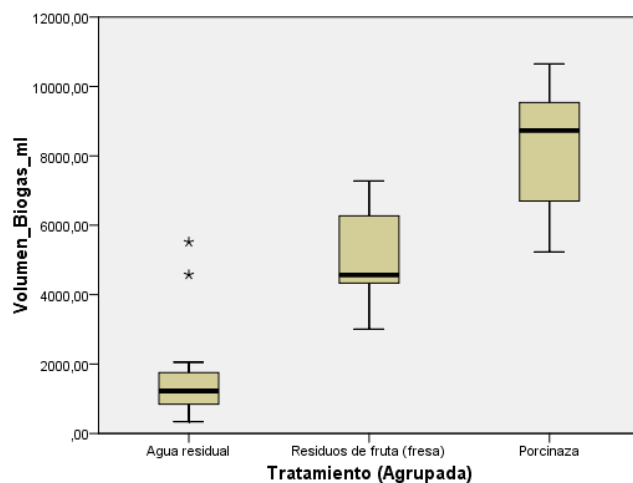
Resumen de contrastes de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de Volumen biogás ml es la misma entre categorías de Tratamiento (Agrupada).	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	0.000	Rechace la hipótesis nula.

Nota. Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,050.

Figura 10

Medida de volumen de biogás por tratamiento



La prueba de Kruskal-Wallis mostró un valor de significancia de $p = 0.000$, lo que indica que existen diferencias estadísticamente significativas en el volumen de biogás producido entre los tres tratamientos evaluados, en otras palabras, los tipos de residuos agroindustriales no generan el mismo volumen de biogás; al menos uno de los tratamientos supera de manera consistente a los otros.

El rechazo de la hipótesis nula permite concluir que el tipo de residuo tiene un efecto directo sobre la producción de biogás, esto valida el siguiente paso del análisis, identificar cuál de los tratamientos presentó el mayor rendimiento, con base en las comparaciones múltiples realizadas posteriormente.

4.3.2. Comparaciones múltiples

Tabla 14

Comparaciones por parejas de Tratamiento

Sample 1- Sample 2	Estadístico de prueba	Desv. Error	Desv. Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ^a
Agua residual- Residuos de fruta (fresa)	14.400	4.796	3.003	0.003	0.008
Agua residual- Porcinaza	-27.200	4.796	-5.672	0.000	0.000
Residuos de fruta (fresa)- Porcinaza	-12.800	4.796	-2.669	0.008	0.023

Nota. Cada fila prueba la hipótesis nula que las distribuciones de la Muestra 1 y la Muestra 2 son iguales.

Se visualizan las significaciones asintóticas (pruebas bilaterales). El nivel de significación es de ,05.

a. Los valores de significación se han ajustado mediante la corrección Bonferroni para varias pruebas.

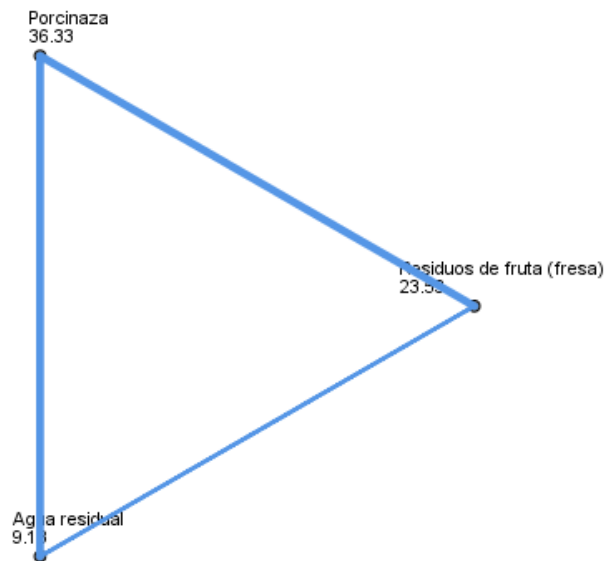
Con el fin de identificar específicamente qué tratamientos difieren entre sí en la producción de biogás, se realizaron comparaciones múltiples por pares utilizando la corrección de Bonferroni, manteniendo un nivel de significancia de 0.05, los resultados se presentan en la Tabla 13, los análisis mostraron diferencias estadísticamente significativas en las tres comparaciones realizadas, en primer lugar, al comparar agua residual vs. residuos de fruta, se obtuvo un valor ajustado de $p = 0.008$, lo que indica que ambos tratamientos producen cantidades significativamente diferentes de biogás, el signo positivo del estadístico de prueba revela que los residuos de fruta generan mayor volumen de biogás que el agua residual.

En segundo lugar, la comparación entre agua residual y porcina arroja un resultado altamente significativo ($p = 0.000$), el estadístico negativo indica que la porcina supera ampliamente al agua residual en la producción de biogás, siendo esta diferencia la más marcada entre las tres evaluaciones, finalmente, la comparación entre residuos de fruta y porcina también fue significativa ($p = 0.023$), mostrando que la porcina produce un volumen mayor de biogás respecto a los residuos de fruta. Aunque esta diferencia es menor que la observada frente al agua residual, sigue siendo estadísticamente relevante, en conjunto, las comparaciones múltiples confirman un orden claro en la eficiencia de los tratamientos, estos resultados confirman la existencia de tres niveles claramente diferenciados de producción:

- producción baja: agua residual.
- producción intermedia: residuos de fruta.
- producción alta: porcina.

Figura 11

Comparaciones por parejas de Tratamiento (rango promedio)



Cada nodo muestra el rango promedio de la muestra de Tratamiento ...

La Figura 10 presenta la comparación gráfica de los rangos promedios obtenidos para cada uno de los tratamientos evaluados: agua residual, residuos de fruta y porcinaza, el tratamiento con porcinaza registra el rango promedio más alto (36.33), lo que indica que fue el tratamiento que produjo consistentemente mayores valores de biogás en comparación con los otros dos tipos de residuos, en segundo lugar, los residuos de fruta alcanzan un rango promedio intermedio (23.30), mostrando un rendimiento moderado en la generación de biogás, finalmente, el tratamiento con agua residual presenta el rango promedio más bajo (9.10), evidenciando que este tipo de residuo es el menos eficiente para la producción de biogás dentro del conjunto evaluado, en conjunto, la figura confirma visualmente los resultados obtenidos: $\text{porcinaza} > \text{residuos de fruta} > \text{agua residual}$,

4.3.3. Contrastes ortogonales

Con el fin de profundizar en las diferencias identificadas, se aplicaron contrastes ortogonales, los cuales permiten evaluar comparaciones específicas, dado que el experimento cuenta con nueve tratamientos, se aplicaron ocho contrastes ortogonales, los cuales permiten realizar comparaciones específicas entre tratamientos y grupos de tratamientos, a continuación, se presentan únicamente las hipótesis evaluadas y sus interpretaciones.

Tabla 15

Contrastes ortogonales

Contraste	Hipótesis Planteada	Descripción	Estadístico	Decisión	Interpretación
H1	$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$	Comparar los tres primeros tratamientos (bajo nivel de frutas).	F = 173.40	Se acepta H1 Se rechaza H0	Existen diferencias altamente significativas entre al menos dos de los tratamientos con bajo nivel de frutas.
H2	$(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)/3 = (\mu_4 + \mu_5 + \mu_6)/3$	Bajo vs Medio contenido de agua residual.	F = 110.97	Se acepta H1 Se rechaza H0	El contenido de agua residual tiene un efecto altamente significativo, siendo las medias de los grupos bajo y medio notablemente diferentes.
H3	$(\mu_1 + \mu_4 + \mu_7)/3 = (\mu_3 + \mu_6 + \mu_9)/3$	Bajos vs Altos niveles de porcina.	F = 54.00	Se acepta H1 Se rechaza H0	El nivel de porcina influye significativamente en la respuesta, mostrando una clara diferencia entre los niveles bajo y alto.
H4	$\mu_1 = \mu_9$	Comparar extremos del experimento (TRT1 vs TRT9).	t = -52.33	Se acepta H1 Se rechaza H0	Los tratamientos extremos (TRT1 y TRT9) son significativamente diferentes, lo que confirma un amplio rango de efecto de los tratamientos.
H5	$(\mu_2 + \mu_5 + \mu_8)/3 = (\mu_3 + \mu_6 + \mu_9)/3$	Fruta media vs Fruta alta.	F = 6.21	Se acepta H1 Se rechaza H0	Existe una diferencia significativa entre los niveles medio y alto de fruta, aunque su magnitud es menor en comparación con otros factores.
H6	$\mu_1 + \mu_2 = \mu_7 + \mu_8$	Mezcla natural vs Residual modificada.	t = -221.37	Se acepta H1 Se rechaza H0	La modificación del residuo tiene un efecto extremadamente significativo en la variable de respuesta.
H7	$(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3)/3 = (\mu_7 + \mu_8 + \mu_9)/3$	Bloque de frutas naturales vs Residuos diversos.	t = -89.76	Se acepta H1 Se rechaza H0	La composición general del bloque de frutas naturales es significativamente diferente a la del bloque con residuos diversos.
H8	$\mu_4 = \mu_6$	Efecto del tipo de agua (120 mL vs 60 mL).	t = 64.65	Se acepta H1 Se rechaza H0	La cantidad de agua aplicada (120 mL vs 60 mL) produce un efecto significativamente diferente.

El análisis mediante contrastes ortogonales revela que entre los factores con mayor impacto se destaca la comparación entre la mezcla natural y la residual modificada, la cual presenta el valor de estadístico t más elevado (-221.37), reflejando una diferencia extremadamente marcada entre estas dos condiciones experimentales, igualmente notable

resulta la variabilidad detectada entre los tres primeros tratamientos con bajo nivel de frutas, donde el estadístico F de 173.40 evidencia heterogeneidad significativa dentro de este grupo específico.

El contenido de agua residual emerge como otro factor determinante, mostrando un efecto altamente significativo al contrastar los niveles bajo y medio, con un valor F de 110.97 que confirma la importancia de este parámetro en la respuesta experimental, en la misma línea, la cantidad de agua aplicada (120 mL vs 60 mL) demuestra influencia significativa, respaldada por un estadístico t de 64.65.

El análisis de los niveles de porcina revela diferencias consistentes entre las concentraciones bajas y altas, con un estadístico F de 54.00 que sustenta la relevancia de este factor, cabe destacar que la comparación entre los niveles medio y alto de fruta, si bien alcanza significancia estadística ($F = 6.21$), presenta una magnitud de efecto considerablemente menor en comparación con los demás factores analizados.

La significativa diferencia detectada entre los tratamientos extremos del experimento (TRT1 vs TRT9), con un estadístico t de -52.33, confirma la existencia de un amplio rango de efecto entre las condiciones experimentales evaluadas, complementariamente, la comparación entre el bloque de frutas naturales y el bloque con residuos diversos ($t = -89.76$) refuerza la importancia de la composición general en la determinación de la respuesta.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo general de valorar energéticamente los residuos agroindustriales de Huaral-Aucallama mediante digestión anaeróbica se cumplió satisfactoriamente al demostrar que los residuos locales tienen un potencial energético significativo, particularmente la porcinaza que mostró la mayor producción de biogás (8,249.40 mL/UE), este hallazgo se alinea con lo reportado por Astoquilca y Huapaya (2024) respecto a la viabilidad técnica de la digestión anaeróbica, pero este estudio amplía este conocimiento al cuantificar específicamente el potencial de residuos agroindustriales en un contexto rural costero peruano, los resultados confirman que la zona de estudio posee recursos subutilizados que pueden transformarse en energía renovable, contribuyendo así a la valorización energética de residuos.

Con respecto al objetivo de identificar los residuos agroindustriales predominantes en Huaral-Aucallama con potencial para valorización energética permitió establecer tres grupos clave: residuos frutales (fresa), aguas residuales agroindustriales y porcinaza, este resultado coincide con lo reportado por Gutiérrez (2020), quien identificó que los residuos agroindustriales pueden integrarse eficientemente en procesos de valorización energética, sin embargo, el presente estudio cuantifica específicamente la disponibilidad local, proporcionando así una base para implementar proyectos de digestión anaeróbica en la zona.

Con respecto al objetivo de medir y cuantificar el volumen de biogás obtenido, se reveló que la porcinaza generó 8,249.40 mL por unidad experimental, superando significativamente a los residuos de fresa (5,233.13 mL) y aguas residuales (1,691.07 mL), estos resultados se alinean con Astoquilca y Huapaya (2024), quienes también cuantificaron el potencial de biogás desde residuos orgánicos, aunque en contexto urbano, el presente estudio corrobora sus hallazgos sobre la viabilidad técnica de la digestión anaeróbica, pero amplía la evidencia al

demostrar que en contextos agroindustriales, la porcina representa el sustrato con mayor potencial, casi quintuplicando la producción respecto a las aguas residuales.

Con respecto al objetivo de evaluar qué tratamiento de residuos agroindustriales produce mayor cantidad de biogás en Aucallama–Huaral, los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis evidenciaron diferencias altamente significativas entre los tres tratamientos evaluados ($p = 0.000$), demostrando que el tipo de sustrato influye directamente en el rendimiento obtenido, las comparaciones múltiples confirmaron un orden claro de eficiencia: la porcina generó significativamente más biogás que los residuos de fruta ($p = 0.023$) y que el agua residual ($p = 0.000$), mientras que los residuos de fruta mostraron un rendimiento intermedio y el agua residual el más bajo. Los contrastes ortogonales reforzaron este patrón, indicando que factores como el nivel de porcina, el contenido de agua residual y la modificación del residuo tienen efectos estadísticamente significativos en la producción.

Estos hallazgos coinciden con Rodríguez et al. (2022), quienes destacan el alto potencial energético de los residuos porcinos, y con Sánchez (2023), quien resalta la importancia de la composición del sustrato en la optimización del biogás, sin embargo, el presente estudio aporta mayor precisión al cuantificar la magnitud de las diferencias entre tratamientos y demostrar estadísticamente la superioridad de la porcina bajo condiciones locales, en conjunto, se confirma que la porcina es el sustrato más eficiente para la producción de biogás en Aucallama–Huaral.

VI. CONCLUSIONES

- 6.1. Se demostró que los residuos agroindustriales de Huaral-Aucallama poseen un potencial energético viable mediante digestión anaeróbica, con la porcinaza como el sustrato más eficiente (8,249.40 mL/UE), seguido de los residuos de fresa (5,233.13 mL/UE) y las aguas residuales (1,691.07 mL/UE), validando así la factibilidad técnica de la valorización energética en la zona.
- 6.2. Se identificaron tres residuos agroindustriales predominantes en Huaral-Aucallama con potencial para valorización energética: residuos de fruta, aguas residuales agroindustriales y porcinaza, siendo este último el de mayor disponibilidad y carga orgánica, lo que constituye una base sólida para el desarrollo de proyectos de bioenergía en la zona.
- 6.3. La cuantificación del volumen de biogás permitió establecer que la porcinaza genera 8,249.40 mL por unidad experimental, superando significativamente a los otros sustratos, y que existe una diferencia de 6,558.33 mL entre el tratamiento más y menos eficiente, demostrando la marcada influencia del tipo de sustrato en la producción de biogás.
- 6.4. Los análisis estadísticos realizados demostraron que el tipo de residuo agroindustrial influye significativamente en la producción de biogás, la porcinaza mostró el rendimiento más alto, superando de forma significativa a los residuos de fruta y al agua residual, según la prueba de Kruskal-Wallis y las comparaciones múltiples ajustadas, se concluye que la porcinaza es el sustrato más eficiente para la generación de biogás en las condiciones locales del estudio, constituyéndose en la alternativa con mayor potencial energético para su aplicación en proyectos de biodigestión anaerobia en la zona.

VII. RECOMENDACIONES

- 7.1. Se recomienda implementar un plan de valorización energética escalonado que priorice el uso de porcinaza como sustrato principal, complementado con residuos de fresa durante temporadas de cosecha, para maximizar la producción de biogás en la zona de Huaral-Aucallama.
- 7.2. Se sugiere realizar un estudio complementario que evalúe la variación estacional en la disponibilidad de los residuos identificados, particularmente de la fresa, para determinar la sostenibilidad temporal del suministro de sustratos a lo largo del año.
- 7.3. Se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo que permita correlacionar las variables operativas (pH, temperatura, relación C/N) con la producción de biogás, optimizando así los parámetros del proceso de digestión anaeróbica.
- 7.4. Se propone desarrollar diseños de mezclas co-digeridas (porcinaza + residuos de fresa) en diferentes proporciones, basándose en los contrastes ortogonales, para evaluar sinergias que puedan incrementar el rendimiento de biogás más allá de los tratamientos individuales.

VIII. REFERENCIAS

- Agencia Agraria de Noticias (12 de mayo de 2021). Área instalada de fresa crecería 30% este año. Agraria.pe. <https://agraria.pe/index.php/noticias/area-instalada-de-fresa-creceria-30-este-ano-24351>
- AP. (2024, March 27). Millions go hungry as a billion meals binned every day, says UN report. AP News. <https://apnews.com/article/18018b352ac6bd7be9925e15511254ac>
- Astoquilca, N. y Huapaya, B. (2024). *Análisis del potencial de generación de biogás para afrontar la inadecuada gestión de residuos orgánicos: caso Mercado N°2 – Barran.* [Trabajo de pregrado, Universidad Peruana Ciencias Aplicada]. Repositorio Academico UPC. <http://hdl.handle.net/10757/674101>
- Barrena, M. (2019). *Biogas: producción y aplicaciones.* Repositorio de la Universidad le Cordon Bleu. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14546/59>
- Branca y Cuenca. (2024). *Los diseños estructurados y la investigación cuantitativa Aportes para su enseñanza desde el trabajo social.* Universidad Nacional de la Plata. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/169012/Documento_completo_PDF.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Díaz, J. (2024). *Sistemas de energías renovables 2.a edición 2024.* España: Ediciones Paraninfo, S.A.
- Dwyer, B., Efrón, A. (2017). *Eficiencia energética en la supply chain - 1ra edición: Economía circular en la práctica.* Colombia: Ecoe Ediciones.
- Galván, T. (2018). *Estimación de la Producción de Biogás para la Generación Energética a partir de los Residuos Sólidos Orgánicos generados en el Gran Mercado Mayorista de*

Lima (Tesis). Repositorio UNFV.

<https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/2043>

Galván, S., Sosa, L., Faitani, N. y Bielsa, R. (2023). Transición energética en América Latina y el Caribe. Desafíos y oportunidades para las tecnologías de valorización energética de residuos sólidos: Energy Transition in Latin America and the Caribbean. Challenges and opportunities for waste-to-energy technologies. *Revista Estudios Ambientales - Environmental Studies Journal*, 11(1), 4-23. <https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v11i1.1707>

Greasham, R., y Inamine, E. (1989). *Nutritional improvement of processes*. Washington DC,EEUU:American Society for Microbiology.

Gutiérrez, H. y de la Vara, R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w19537w/analisis_y_diseno_experimentos.pdf

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2025). Guía: Manejo de residuos sólidos urbanos en el Perú [Guía]. Ministerio de Educación / Ministerio del Ambiente. <https://www.minedu.gob.pe/educacion-ambiental/pdf/2025/guias/guia-mares.pdf>

Ministerio de Economía y Finanzas [MEF]. (2023). Programa de Incentivos a la Mejora de la Gestión Municipal [Presentación]. Ministerio del Ambiente y Ministerio de Economía y Finanzas. https://www.mef.gob.pe/contenidos/presu_publico/migl/MINAM_PPT.pdf

Reuters. (2024, February 28). Harmful waste generation set to jump, U.N. warns. Reuters. <https://www.reuters.com/business/environment/harmful-waste-generation-set-jump-un-warns-2024-02-28/>

Rodríguez, R., Méndez, P., López, M., y Soto, J. (2022). *Optimización del uso del purín porcino como fertilizante orgánico mediante tratamientos de mitigación de emisiones*

gaseosas. Universidad de Santiago de Compostela. Recuperado de <https://minerva.usc.es/xmlui/handle/10347/26651>

Ruiz, S. (2024). Automatización y control digital de la digestión anaerobia de una planta de biogás. <http://dspace.umh.es/handle/11000/33022>

Rubio, E. (2025). Gestión integral de residuos. España: RA-MA S.A. Editorial y Publicaciones.

Rosales, V. (2021). Consecuencias del modelo agroindustrial en la salud - Agrotóxicos. Editorial Dunken.

Sánchez, C. (2023). *Tratamientos físico-químico-biológicos para optimizar la valoración energética de residuos orgánicos*. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores: Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (UTF/ARG/020/ARG) - Colección Documentos Técnicos N° 12. Food y Agriculture Org..

United Nations Environment Programme [UNEP]. (2024). Food Waste Index Report 2024: Think Eat Save — Tracking progress to halve global food waste. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/resources/publication/food-waste-index-report-2024>

Anexo F
DATA estadística

U E	UE _ID	Tratami ento	Volu men Bioga smi	Dia _1	Dia _2	Dia _3	Dia _4	Dia _5	Dia _6	Dia _7	Dia _8	Dia _9	Dia _10	Dia _11	Dia _12	Dia _13	Dia _14	Dia _15	Dia _16	Dia _17	Dia _18	Dia _19	Dia _20	Dia _21	Dia _22	Dia _23	Dia _24	Dia _25	Dia _26	Dia _27	Dia _28	Dia _29	Dia _30	
U E- 1	1.00	Residuos de fruta (fresa)	4334	150	150	150	100	100	100	100	100	100	100	100	140	150	150	150	150	150	150	150	150	150	190	190	160	170	165	175	180	180	185	
U E- 2	1.00	Residuos de fruta (fresa)	4565	200	200	200	100	190	190	200	100	100	200	220	120	140	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	140	135	130	130	125	115	130	
U E- 3	1.00	Residuos de fruta (fresa)	5740	200	200	250	200	190	190	100	190	140	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	190	180	170	180	170	190	200	
U E- 4	1.00	Residuos de fruta (fresa)	5555	200	200	210	200	190	190	100	190	190	100	120	140	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	190	195	195	190	180	185	190	
U E- 5	1.00	Residuos de fruta (fresa)	7010	100	100	100	100	150	150	160	150	150	160	160	160	210	270	270	280	280	280	280	290	290	300	300	330	345	350	340	320	325	310	
U E- 6	1.00	Residuos de fruta (fresa)	6714	100	100	100	100	100	100	200	100	100	220	220	220	250	250	250	250	250	250	250	270	270	280	280	315	325	335	340	310	300	280	
U E- 7	1.00	Residuos de fruta (fresa)	4415	100	100	100	110	110	110	110	110	110	110	110	110	125	125	140	140	140	140	170	190	210	210	210	190	195	180	200	210	170	180	
U E- 8	1.00	Residuos de fruta (fresa)	6350	100	100	100	100	100	100	250	100	100	250	250	250	250	250	260	260	260	260	260	260	260	260	260	280	270	260	240	230	220	210	
U E- 9	1.00	Residuos de fruta (fresa)	4330	100	100	100	100	110	110	110	110	110	110	110	110	150	150	150	150	150	180	180	180	180	180	180	170	180	170	150	190	170	190	
U E- 10	1.00	Residuos de fruta (fresa)	4189	90	90	90	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	120	150	150	150	180	180	180	180	180	180	180	185	190	195	200	210	200
U E- 11	1.00	Residuos de fruta (fresa)	4565	100	100	100	100	100	100	110	100	100	110	110	110	140	140	180	200	260	180	180	180	180	180	180	210	215	220	180	170	160	170	
U E- 12	1.00	Residuos de fruta (fresa)	3005	100	100	100	100	60	60	30	60	60	30	30	30	100	110	110	110	110	110	120	120	130	140	140	125	130	130	135	140	140	145	
U E- 13	1.00	Residuos de fruta (fresa)	4255	25	25	25	25	25	25	180	25	25	180	180	180	200	190	180	150	150	150	150	150	150	150	150	200	210	215	225	230	240	245	
U E- 14	1.00	Residuos de fruta (fresa)	6195	200	200	200	200	200	200	180	200	200	180	180	180	170	170	180	180	180	190	200	220	250	270	270	220	225	230	225	230	230	235	
U E- 15	1.00	Residuos de fruta (fresa)	7275	200	200	200	200	200	200	180	200	200	180	180	180	220	240	260	280	280	280	280	280	280	280	280	290	280	300	280	310	315	220	
U E- 16	2.00	agua residual	1756	40	40	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	70	70	70	70	70	65	70	75	70	75	75	76		
U E- 17	2.00	agua residual	5515	100	100	140	140	140	140	150	170	160	150	160	160	180	180	200	200	200	200	200	200	200	200	200	220	225	230	235	240	245	250	

U E- 1 8	2.00	agua residual	1310	40	40	40	40	40	40	40	40	40	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	50	45	50	40	45	50	40			
U E- 1 9	2.00	agua residual	4575	90	90	90	100	100	100	140	150	150	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	160	180	170	190	185	195	200	205		
U E- 2 0	2.00	agua residual	1745	50	50	55	55	55	55	50	50	50	50	50	50	50	50	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	65	70	80	90	70		
U E- 2 1	2.00	agua residual	1100	10	10	25	25	25	25	30	30	30	30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40	40	40	40	50	60	50	50	50	60	60		
U E- 2 2	2.00	agua residual	765	10	10	20	20	20	20	10	10	10	20	20	20	20	20	30	30	30	30	30	30	30	30	30	35	40	35	40	35	40	40		
U E- 2 3	2.00	agua residual	950	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	35	40	35	35	40	40	35		
U E- 2 4	2.00	agua residual	1225	50	50	50	55	55	55	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	35	35	35	30	30	35	30		
U E- 2 5	2.00	agua residual	670	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	30	35	25	30	25	40	25		
U E- 2 6	2.00	agua residual	340	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	15	20	15	10	15	20	15		
U E- 2 7	2.00	agua residual	2055	50	50	50	50	50	50	50	50	50	55	55	55	70	70	70	70	70	70	70	70	80	80	90	90	80	90	70	90	90	95	95	
U E- 2 8	2.00	agua residual	870	20	20	20	20	20	20	20	20	30	25	25	25	25	25	25	25	25	30	30	30	30	40	40	40	30	35	40	35	40	40	45	
U E- 2 9	2.00	agua residual	815	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	20	20	20	25	25	25	25	50	50	50	50	40	45	40	50	55	50	55		
U E- 3 0	2.00	agua residual	1675	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	70	70	70	70	60	65	60	65	65	60	70		
U E- 3 1	3.00	porcinaz a	8730	100	120	230	300	150	150	220	240	240	240	240	240	260	280	300	310	340	340	340	350	350	360	360	360	360	360	360	360	360	390	410	430
U E- 3 2	3.00	porcinaz a	10430	200	225	300	210	150	150	350	350	350	400	400	400	360	360	360	360	360	370	370	390	400	410	420	410	415	410	390	370	400	390		
U E- 3 3	3.00	porcinaz a	9755	150	200	250	150	150	150	280	210	210	400	400	400	360	360	360	360	360	370	370	380	380	400	410	380	370	360	400	390	395	400		
U E- 3 4	3.00	porcinaz a	9324	150	160	200	150	150	150	250	250	200	250	250	250	260	280	320	340	350	350	370	380	380	400	400	415	420	430	440	449	460	470		
U E- 3 5	3.00	porcinaz a	10651	200	200	240	180	150	150	350	320	350	330	380	380	300	340	360	380	400	400	400	420	420	450	450	460	480	400	410	410	390	551		

U E- 3 6	3.00	porcinaza	10487	150	200	250	300	150	150	300	300	230	300	300	300	300	300	340	370	400	400	400	420	420	450	450	467	480	490	480	470	490	430	
U E- 3 7	3.00	porcinaza	8360	100	100	175	150	150	150	225	250	200	250	250	250	280	300	300	330	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	
U E- 3 8	3.00	porcinaza	8980	150	240	250	100	150	150	325	340	300	380	380	380	290	290	300	300	320	320	320	330	330	330	330	330	335	340	340	340	345	345	
U E- 3 9	3.00	porcinaza	9215	150	200	300	300	150	150	380	380	240	260	260	260	250	250	300	300	320	320	320	320	320	320	350	350	365	370	380	400	410	425	435
U E- 4 0	3.00	porcinaza	5665	50	65	100	100	150	150	200	200	180	200	200	200	200	200	210	210	210	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
U E- 4 1	3.00	porcinaza	5665	75	100	140	140	150	150	160	150	180	180	180	180	180	180	180	200	200	200	200	200	200	220	220	225	230	240	245	250	250	260	
U E- 4 2	3.00	porcinaza	6319	100	160	220	220	150	150	290	300	280	280	280	280	190	190	140	200	200	200	200	200	200	200	200	215	215	210	210	210	215	215	
U E- 4 3	3.00	porcinaza	7850	300	350	400	400	150	150	300	300	280	280	280	280	180	180	180	200	200	200	210	230	240	250	250	265	280	290	290	300	315	320	
U E- 4 4	3.00	porcinaza	5230	75	120	160	160	150	150	100	100	150	150	150	150	160	160	180	190	190	190	200	200	200	200	215	220	225	220	230	240	245		
U E- 4 5	3.00	porcinaza	7080	50	90	110	100	150	150	170	180	150	170	170	170	170	180	180	200	220	230	260	280	330	330	360	380	400	410	450	440	430		

Anexo 7. Matriz de consistencia

Problema de investigación	Objetivos	Hipótesis	Variables
Problema general: ¿Cuál es el potencial de valorización energética de los residuos agroindustriales de la zona Huaral–Aucallama mediante la producción de biogás por digestión anaeróbica?	Objetivo general: Valorar energéticamente los residuos agroindustriales de la zona de Huaral–Aucallama mediante la generación de biogás a través de la digestión anaeróbica.	Hipótesis general: Los diferentes tratamientos de residuos agroindustriales influyen significativamente en la generación de biogás mediante digestión anaeróbica en Huaral-Aucallama.	Variable independiente: Digestión anaeróbica (tratamientos: residuos de fresa, agua residual, porcinaza) Variable dependiente: Valorización energética (volumen de biogás generado)
Problema específico 1: ¿Qué tipos de residuos agroindustriales predominan en la zona de Huaral–Aucallama y poseen mayor potencial para la generación de biogás mediante digestión anaeróbica?	Objetivo específico 1: Identificar los residuos agroindustriales predominantes en la zona de Huaral–Aucallama con potencial para valorización energética mediante digestión anaeróbica.	Hipótesis específica 1: El residuo agroindustrial predominante de la zona de Aucallama–Huaral produce un volumen distinto de biogás respecto a otros residuos evaluados.	Variable independiente: Tipo de residuo (fresa, agua residual, porcinaza) Variable dependiente: Volumen de biogás
Problema específico 2: ¿Cuál es el volumen de biogás que se obtiene a partir de la digestión anaeróbica de los residuos agroindustriales presentes en la zona de Aucallama–Huaral?	Objetivo específico 2: Medir y cuantificar el volumen de biogás obtenido mediante la digestión anaeróbica de los residuos agroindustriales de la zona de Aucallama – Huaral.	Hipótesis específica 2: Los tratamientos de residuos agroindustriales influyen en la cantidad de biogás obtenida.	Variable independiente: Tratamientos (residuos de fresa, agua residual, porcinaza) Variable dependiente: Volumen de biogás (mL/UE)
Problema específico 3: ¿Qué tipo de tratamiento o combinación de residuos agroindustriales permite obtener el mayor volumen de biogás	Objetivo específico 3: Evaluar qué tratamiento de residuos agroindustriales permite obtener mayor cantidad de biogás en zona de Aucallama- Huaral.	Hipótesis específica 3: Al menos uno de los tratamientos permite obtener mayor volumen de biogás.	Variable independiente: Tratamientos (residuos de fresa, agua residual, porcinaza) Variable dependiente: Volumen de biogás (mL/UE)

mediante digestión anaeróbica en Aucallama-Huaral?			
---	--	--	--

Anexo G
Matriz de operacionalización

Variable	Dimensión	Indicador	Ítem/Parámetro	Escala
INDEPENDIENTE: Digestión Anaeróbica	Tipo de residuo	Composición del sustrato	- Residuos de fresa - Agua residual - Porcinaza	Nominal
	Concentración	Proporción de mezcla	- Relación sustrato:agua - % concentración	Razón
	Condiciones operativas	Parámetros de proceso	- Temperatura - pH inicial - Tiempo retención (30 días)	Intervalo/Razón
DEPENDIENTE: Valorización Energética	Producción de biogás	Volumen generado	- mL por unidad experimental - mL por día - mL acumulados	Razón
	Eficiencia del proceso	Rendimiento por tratamiento	- Volumen total por grupo - Promedio por UE - Diferencia entre tratamientos	Razón
	Significancia estadística	Diferencias entre tratamientos	- Valores estadísticos	Intervalo/Razón

Anexo H

Panel fotográfico



Control de muestras



Control de muestras



Medición de muestras



Medición de muestras



Codificación de muestras



Latitud: -11.570308
Longitud: -77.207194
Elevación: 93.97±15.6 m
Precisión: 9.2 m
GPSTiempo: 08-23-2025 12:29:20 p. m.
Huso horario: GMT-05
Nota: otulación de los biodigestores
valorización energética de residuos agroindustriales por digestión anaeróbica
Fernando Guevara Ventura

Codificación de muestras



Recolección de muestras



pesado de muestras