



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión

Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

**Determinación de la capacidad productiva del biogás empleando lodo natural con
presencia de hierro – Huacho - 2023**

Tesis

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor

Wilmer Luis Díaz García

Asesora

Mg. Hellen Yahaira Huertas Pomasoncco

Huacho – Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

FACULTA DE INGENIERÍA AGRARIA INDUSTRIAS ALIMENTARIAS Y AMBIENTAL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

INFORMACIÓN DE METADATOS

DATOS DEL AUTOR (ES):		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Diaz Garcia Wilmer Luis	71983042	13/06/2024
DATOS DEL ASESOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Mg. Huertas Pomasoncco Hellen Yahaira	46741141	0000-0002- 4204-7320
DATOS DE LOS MIEMROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA-DOCTORADO:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CODIGO ORCID
Dr. Roger Manuel Mestas Valero	23842285	0000-0002-5097-9988
Mg. Maria del Rosario Grados Olivera	15736587	0000-0002-3004-0252
Mg. Tania Ivette Mendez Izquierdo	46925087	0000-0002-2473-4610

Determinación de la capacidad productiva del biogás empleando lodo natural con presencia de hierro - Huacho - 2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%	20%	4%	12%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	vdocuments.es Fuente de Internet	2%
2	Submitted to Universidad Nacional Jose Faustino Sanchez Carrion Trabajo del estudiante	2%
3	es.scribd.com Fuente de Internet	1%
4	repositorio.utc.edu.ec Fuente de Internet	1%
5	repositorioinstitucional.uabc.mx Fuente de Internet	1%
6	repositorio.unbosque.edu.co Fuente de Internet	<1%
7	www.cio.mx Fuente de Internet	<1%
8	ouci.dntb.gov.ua Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

“En estos tiempos de crisis climática, el cual amenaza con la existencia de la vida sobre el planeta tierra al cual hemos denominado hogar. Hoy dedico la culminación de mi tesis a las futuras generaciones los cuales fueron mi motivación en los momentos de cansancio, desaliento y estrés, con el propósito de desarrollar el cambio que tanta falta nos hace para afrontar las consecuencias climáticas que se avecinan por los errores del pasado y presente. Teniendo en alto las esperanzas de lograr el objetivo común sobre la transición energética.

Persiste, continua, que la ciencia se basa en el ensayo y error.

El tiempo premia.”

AGRADECIMIENTO

“Esta investigación no se hubiera llevado a cabo de manera eficiente sin usted MG. Hellen Yahaira Huertas Pomasoncco, por el gran aporte de sus virtudes, su tiempo, su paciencia y sus conocimientos profesionales que la caracterizan, así como sus consejos que fueron relevantes para resolver las dificultades que se presentaron en cada etapa, tal como sus orientaciones en los momentos de confusión.

De la misma manera al personal del centro experimental agropecuario vacuno de leche, por brindarme las facilidades de ingreso, un espacio para mis experimentos, así como la ayuda con las fotografías.

De la misma manera a mi compañera Carmen Caballero Hueta, por su tiempo brindado al implementar el experimento.

Y sobre todo a mi padre, mi madre, mis hermanos y hermanas por haberme acompañado en cada etapa de mi vida académica y haber brindado un aporte que forma parte de mi formación profesional y la motivación de desarrollarme en la investigación científica.”

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Descripción de la realidad problemática	1
1.2 Problemas	2
1.2.1 Problema general.....	2
1.2.2 Problemas específicos	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Justificación de la investigación.....	3
1.5 Delimitación del estudio.....	4
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Antecedentes de la investigación.....	5
2.1.1 Antecedentes internacionales	5
2.1.2 Antecedentes nacionales	7
2.2 Bases teóricas	8
2.2.1. Digestión anaerobia.....	8
2.2.2. Fermentación anaeróbica	8
2.2.3. Respiración anaeróbica	8
2.2.4. Etapas de la fermentación metanogénica	8
2.2.5. Microorganismos.....	11
2.2.6. Factores relacionados con la producción de biogás	11
2.2.7. Tipo de biodigestor	16
2.2.8. Composición del Biogás	18
2.2.9. Usos del Biogás.....	18
2.3 Definiciones de términos básicos	20
2.4 Hipótesis de investigación	21
2.4.1. Hipótesis General	21
2.4.2. Hipótesis Específica	21
2.5 Operacionalización de las variables	22
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	23
3.1 Gestión del experimento.....	23
3.1.1. Ubicación	23
3.1.2. Características del área experimental.....	24

3.1.3. Tratamientos.....	24
3.1.4. Diseño experimental.....	25
3.1.5. Variables a evaluar.....	25
3.1.6. Conducción del experimento.....	26
3.2 Técnicas para el procesamiento de la información.....	28
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	29
4.1. Capacidad productiva de biogás empleando lodo natural con presencia de hierro.	29
4.2. Concentración de hierro en lodo natural	32
4.3. Cantidad de lodo con presencia de hierro que se requiere para obtener una producción considerable de biogás.....	32
4.4. Tiempo de retención hidráulica en la producción de biogás empleando lodo natural con presencia de hierro.	33
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	35
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	39
6.1 Conclusiones.....	39
6.2 Recomendaciones.....	39
CAPÍTULO VI: REFERENCIAS.	40
ANEXOS	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producción de metano por los diferentes sustratos.....	12
Tabla 2. Valores de la relación carbono/nitrógeno.....	13
Tabla 3. Sustancias inhibidoras y sus concentraciones	16
Tabla 4. Matriz operacionalización de las variables de la investigación.....	22
Tabla 5. Matriz de composición de los tratamientos	25
Tabla 6. Diseños completamente al azar según el tratamiento.....	25
Tabla 7. Análisis de variancia para la producción total de biogás.	31
Tabla 8. Prueba de tukey al 5% para la producción total de biogás	31
Tabla 9. Análisis de variancia para la producción diaria de biogás.	32
Tabla 10. Prueba de tukey al 5% para la producción diaria de biogás	33
Tabla 11. Comparación de la concentración de hierro con la norma eeuu (mg/kg).....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de la digestión anaeróbica en la producción de biogás.....	10
Figura 2. Producción de biogás en función de la temperatura.....	14
Figura 3. Producción de gases dentro de da en función del pH.....	15
Figura 4. Biodigestor batch.	17
Figura 5. Ubicación del experimento de la investigación	23
Figura 6. Ubicación de punto de muestro.....	24
Figura 7. Esquema del procedimiento experimental de la investigación.	27
Figura 8. Temperatura en las que se desarrolló el proceso.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
Figura 9. ph por tratamiento	30
Figura 10. Niveles ph entre repeticiones.	30
Figura 11. Tiempo de retención hidráulica de cada tratamiento	34
Figura 12. Producción acumulada de biogás por dosis	37

RESUMEN

Objetivo: Determinar la capacidad productiva del biogás empleando lodo natural con presencia de hierro. **Metodología:** Para esta investigación se extrajo una muestra de lodo natural, de la quebrada que se encuentra dentro de área del Parque Nacional Huascarán, con el propósito de analizar las concentraciones de hierro e introducirlo dentro del proceso de digestión anaeróbica mediante tres dosis (25, 50 y 75 gr), el cual fue aplicado en base a un diseño estadístico completamente al azar, que consistía en tres tratamientos y un testigo, cada uno con tres repeticiones, las dosis fueron vertidas en un recipiente con una capacidad de 600 ml, la cual contenía como sustrato 150 gr de materia orgánica que se componía en cascara de papa, papa en descomposición y cascara de lechuga, además de 350 ml de agua, la temperatura se mantuvo en condiciones ambientales y no se ajustó el pH, se recolectaron los datos durante 11 días, esto mediante el uso de probetas. **Resultados:** Los volúmenes de biogás por tratamiento son considerables en comparación con el testigo, siendo el T1 el de mayor producción con 2360 ml, seguido del T2 con 1360 ml y por el T3 con 1110 ml, quedando en ultimo el T0 (testigo) con 145 ml, asimismo se registró un tiempo mínimo de retención hidráulica de 8 días. **Conclusiones:** Se concluye que el uso del lodo natural con presencia de hierro estimula la producción de biogás, ya que a comparación del testigo las producciones son muy considerables.

Palabras clave: Lodo, hierro, biogás, tiempo de retención Hidráulica.

ABSTRACT

Objective: To determine the productive capacity of biogas using natural sludge with the presence of iron. **Methodology:** For this research, a sample of natural sludge was extracted from a stream located within the Huascarán National Park area, with the purpose of analyzing the concentrations of iron and introducing it into the anaerobic digestion process using three doses (25, 50 and 75 gr), which was applied based on a completely randomized statistical design, consisting of three treatments and a control, Each one with three replicates, the doses were poured in a container with a capacity of 600 ml, which contained as substrate 150 gr of organic matter composed of potato peel, rotting potatoes and lettuce peel, in addition to 350 ml of water, the temperature was maintained at ambient conditions and the pH was not adjusted, the data were collected during 11 days, this by means of test tubes. **Results:** The biogas volumes per treatment are considerable in comparison with the control, being T1 the one with the highest production with 2360 ml, followed by T2 with 1360 ml and by T3 with 1110 ml, being the last one T0 (control) with 145 ml, also a minimum hydraulic retention time of 8 days was recorded. **Conclusions:** It is concluded that the use of natural sludge with the presence of iron stimulates the production of biogas, since compared to the control the productions are very considerable.

Key words: Sludge, iron, biogas, hydraulic retention time.

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

Dentro de los acontecimientos internacionales, guerra de Ucrania y Rusia ha dejado en evidencia el problema energético que afrontamos a nivel internacional, sobre todo en base a nuestra fuerte dependencia a los combustibles fósiles, siendo así que el presidente de la agencia internacional de energía declaró ante la prensa que "Ahora tenemos una crisis del petróleo, una crisis del gas y una crisis de la electricidad al mismo tiempo"(Cable News Network, 2023).

Teniendo en cuenta el crecimiento poblacional que demanda cada vez más energía y alimentos lo cual nos lleva a tener como objetivo el abastecimiento sin generación de gases de efecto invernadero (GEI) en cumplimiento con el reto internacional de las emisiones cero para el 2050, con el propósito de limitar el calentamiento global a 1,5°C, que según la World Biogas Association (2019), precisa que con la existencia de millones de digestores anaerobios a nivel internacional solo se aprovechan el 1,6 – 2,2 % del potencial mundial de biogás.

En América Latina existe una gran brecha en el uso de energías renovables ya que, según una investigación de Organización Latinoamericana de Energía (2020), está compuesta principalmente por hidrocarburos; siendo el petróleo con 31%, el gas natural con 34%, carbón mineral con 6%, hidroenergía con 8%, geotermia con 1%, nuclear con 1% y otros con 19%, En donde resalta el bajo consumo de energías verdes, además que la producción de biocombustibles es de 26.96% inferior a la de América del Norte con un 45.38%.

Teniendo en cuenta que existe alrededor del 50 % de la comunidad rural que aun usa el carbón vegetal como combustible primario según el (Banco Mundial, 2021), que a su vez esta mala práctica conlleva a un riesgo de la población, según el Environmental Protection Agency (2023) el humo generado por la combustión de leña crea un material particulado o PM 2,5. Estas partículas ingresan a través de los ojos y el sistema respiratorio lo cual llega a provocar ardor en los ojos, goteo nasal y enfermedades como la bronquitis.

Mientras que el Perú la fuente de energía con mayor uso es la de los hidrocarburos, como lo precisa el balance nacional de energía 2018, realizado por el ministerio de energía y minas, donde el consumo de hidrocarburos es de 63,5%, energía solar con 0,2%, leña y bosta & yareta con 11.4%, bagazo y carbón vegetal con 1,6%, electricidad 2,5% y carbón mineral y

derivados con 2,8%, siendo el biogás el menos usado, teniendo en cuenta que a nivel nacional se generan alrededor de 54,64 % de residuos orgánicos según un estudio del (Ministerio del Ambiente, 2021).

Por otro lado, según Revisenergy (2023) cerca de un 20% de la población cocina sus alimentos con leña, esto debido al aumento del precio del gas licuado de petróleo, siendo así que el uso de leña como fuente de energía puede ser perjudicial para la salud.

Todo ello constituye las pocas medidas que como región se han establecido para cumplir con objetivos de desarrollo sostenible y enmarcados en emisiones cero, además de las familias y ollas comunes de bajos recursos que se les dificulta adquirir energía limpia para cocinar sus alimentos, así como el bajo ingreso que tiene la agricultura y la ganadería, que son fuentes de generación de grandes cantidades de materia orgánica, además de contar con un clima árido con deficiencia de humedad en todas las estaciones del año - templado, según la clasificación de Warren Thornthwaite - Servicio Nacional de Meteorología e hidrología del Perú (2020), no se desarrollan proyectos ambiciosos basados en el aprovechamiento del potencial energético de los residuos orgánicos mediante la producción de biogás esto se debe mayormente a la poca eficiencia que presenta el método convencional, no obstante hoy en día se está desarrollando avances tecnológicos respecto al uso de nanopartículas hierro para incrementar la eficiencia productiva del biogás de manera considerable, con esta investigación se espera mejorar la eficiencia productiva, reduciendo costos y haciéndolo accesible para todas las personas, todo ello dentro del campo del desarrollo sostenible que a la vez eliminara el uso de leña así como mejorar la economía de las familias y aprovechar los residuos orgánicos dentro de una economía circular.

1.2 Problemas

1.2.1 Problema general

¿Cuál será la capacidad productiva del biogás empleando lodo natural con presencia de hierro?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Qué concentración de hierro posee el lodo natural empleado en la producción de biogás?
- ¿Qué cantidad de lodo natural con presencia de hierro se requiere para tener una producción considerable de biogás?

- ¿Cuál es el tiempo de retención hidráulica necesaria para producir biogás empleando lodo natural con presencia de hierro?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar la capacidad de productiva del biogás empleando lodo natural con presencia de hierro.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar la concentración de hierro que posee el lodo natural empleado en la producción de biogás.
- Determinar qué cantidad de lodo natural con presencia de hierro se requiere para tener una producción considerable de biogás.
- Determinar el tiempo de retención hidráulica en la producción de biogás empleando lodo natural con presencia de hierro.

1.4 Justificación de la investigación

La generación de energía mediante un sistema de biogás por un método nuevo e eficiente generan grandes beneficios en diferentes ámbitos en toda población de Huacho, tales como en el ambiente; aprovechando los residuos orgánicos al generar combustible en forma de gas, abono foliar y sólido, así reduciendo las emisiones de CO₂ que los combustibles fósiles y la biomasa generan al momento de ser quemados; dentro del ámbito económico; creando incentivos de aprovechamiento monetario al producir un energía renovable a partir de desechos orgánicos mediante la economía circular con bajo costo de producción lo cual aumentaría la rentabilidad, por lo cual se podrán crear nuevos puestos de trabajo, así como un método accesible a las familias que al tener una nueva fuente de energía disminuirían la compra de energía, por otro lado, dentro del ámbito social, se tendrá beneficios como la satisfacción de la necesidad energética y el abastecimiento de zonas rurales lejanas, dentro del ámbito salud tenemos el desplazamiento del uso de leña por biogás, evitando así la exposición de las personas al humo de la leña que es perjudicial para su salud, por último en el ámbito científico la generación de información novedosa en la rama por su poca información referente al uso de lodo natural.

1.5 Delimitación del estudio

Delimitación espacial

El experimento de la investigación se realizó en:

- Lugar: Centro experimental pecuario vacunos de leche, facultad de ingeniería agraria, industrias alimentarias y ambiental, universidad nacional José Faustino Sánchez Carrión.
- Distrito: Huacho
- Provincia: Huaura
- Región: Lima
- Coordenadas UTM: 8769027.13 N y 215395.18 E en la zona 18 L. el lugar se encuentra a una elevación de 34 m s. n. m.

La muestra extraída para la experimentación se encuentra en:

- Lugar: Quebrada cercana a la laguna de Purhuay, Parque nacional del Huascarán, centro poblado de Acopalca.
- Distrito: Huari
- Provincia: Huari
- Región: Ancash
- Coordenadas UTM: 8969386.75 N y 257627.11 E en la zona 18 L, encontrándose a una altitud de 3 485 m s. n. m.

Delimitación Temporal

La investigación tuvo una duración de 7 meses, dentro del cual el experimento se desarrolló en época de otoño del 2023

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Curiel et al. (2018) en su artículo magistral, nos precisa que la producción de biogás a partir de materia orgánica se encuentra lejos de ser la eficiente, para ello se toma como objetivo la producción de biogás a través del uso de un sustrato, siendo las excretas de ganado porcino y añadiendo nanopartículas de hierro, para lo cual se usaron 6 reactores de 500 ml, en la cual se agregó 8.0 mg de Fe/Kg de excreta fresca y una sin Fe, manteniéndolos a temperatura ambiente y controlada de 34°C, donde se pudo observar que todos los tratamientos producen biogás a un ritmo similar, pero el tratamiento con hierro a temperatura ambiente, acumula mayor biogás con alrededor 1890 ml, llegando a la conclusión que al adicionar nanopartículas de hierro, favorece la producción de biogás al estar en contacto con las bacterias metanogénicas, pero teniendo en cuenta que el de mayor producción no implica menor tiempo de residencia, ya que el experimento que se encontraba a temperatura controlada fue el de menor tiempo de retención hidráulica.

Bailón et al. (2020) en su artículo magistral, donde evaluaron el efecto de las nanopartículas de Ni y Fe₂O₃ en la producción de metano, mediante 8 reactores de 100 ml, en la cual se agregaron 3 dosis diferentes de NPs (25, 50 y 100 mg/L de Fe₂O₃ y 0.1, 1 y 2 mg/L de Ni) y dos testigos, se consideró como sustrato al acetato 2 gDQO/L, agitación de 157 rpm a 35 °C por 10 días, donde se pudo observar que la mayor producción de metano se dio con el Ni a partir del 4to día con un 10.65%, mientras que el Fe₂O₃ la producción se dio en el 3er día con 6.33%, llegando a la conclusión que se obtuvo una máxima generación de metano de 101.41 ± 0.14 mL mediante el uso de la dosis de 25 mgNPs/L de Fe₂O₃, lo cual es 6.33 % más que en el testigo, por otro lado, las dosis de 50 y 100 mgNPs/L de Fe₂O₃ tuvieron una producción de metano menor al testigo.

Garrido et al. (2020) En su artículo magistral, evaluaron el método hidrotermal; agua destilada y una solución de NaOH en la producción de ferritas usadas en la producción de biogás, mediante frascos de 250 ml se empleó como inóculo lodo granular, residuos orgánicos y administrando dosis de nanopartículas de hierro a una temperatura de alrededor de 36 °C, donde se pudo observar que dentro del tratamiento que contiene el inóculo de lodo granular + residuos orgánicos + nanopartículas, presentó mayor producción de metano en un 33 % con un volumen de 470 ml, llegando a la conclusión que todos los tratamientos

contienen biogás en el proceso anaerobio, teniendo en cuenta que en tratamiento a la cual se suministró ferrita de níquel llega a mejorar la producción.

Barrena et al. (2022) en su artículo magistral, donde mediante la revisión de la literatura, indican que uno de los focos actuales de investigación sobre este tema es el mecanismo responsable de esta mejora de la producción de biogás, se pudo determinar que los autores informaron un aumento de la concentración de metano de 64% a 87%, dentro de un reactor termofílico, por otro lado, no resulta muy factible por el precio de las nanopartículas, llegando a la conclusión que entre los nanomateriales probados, las NPs con base de hierro parecen ser las más prometedoras en cuanto al aumento de biogás y metano, como factor extra, la posibilidad de ser separadas magnéticamente y reutilizadas.

Dilbag et al. (2022) En su artículo magistral, donde buscan determinar el efecto de los IONP sintetizados que emplean un extracto de hoja no tóxico de *Azadirachta* para aumentar la producción de biogás y metano del estiércol de ganado durante la digestión anaeróbica, donde se realizaron 5 tratamientos y un testigo, en los cuales se usaron estiércol de ganado + dosis de 9, 12, 15, 18, 21 mg/L de nanopartículas de hierro en un recipiente de 5 L, donde se pudo observar que el tratamiento 5 es la que mostro mayor producción de biogás en la quinta semana con 29,48 L/g, seguido del T6 y el T4, con la cual se pudo concluir que los resultados revelaron que los rendimientos acumulados de biogás y metano con la adición de IONPs para el tratamiento de 18 mg/L como suplemento alcanzaron 136,74 L/g.

Kweinor y Rathial. (2020) En su artículo magistral, donde evaluaron los efectos de los óxidos de hierro (Ms) y el sulfato de aluminio (Alum), mediante dos tratamientos uno de Fe y otro de Al, teniendo un testigo a la cual se agregó agua residual y nanopartículas, las cuales fueron magnetizadas por 30 minutos, donde se observó que en el tratamiento en la cual se incorporó óxido de hierro se obtuvo mayor concentración, con un valor de 1460 ml/d que representa un 80% de metano, con lo cual se pudo concluir que las perspectivas de futuro de las NPs magnetizadas (NPs de Fe) para su uso en sistemas bioenergéticos para la conversión de energía son económicamente viables. Esto se debe a su elevada superficie, estructura porosa y propiedades supermagnéticas, que pueden actuar como activadores de un catalizador de degradación, como un fotocatalizador (Fe/TiO₂)

Zaidi et al. (2019) En su artículo magistral, donde mediante la Irradiación por microondas (MW) para el pretratamiento de algas verdes (*Enteromorpha*) en combinación con nanopartículas de óxido de hierro (NPs) que actúan como catalizador heterogéneo durante

el proceso de digestión anaeróbica para mejorar el biogás, mediante el uso de recipientes herméticos con una capacidad de 500 ml, a las cuales se le agrego las nanopartículas y sustrato, manteniéndolo a una temperatura de 37 °C y con una agitación de 150 rpm, durante 108 horas, siendo así que dentro de los tratamientos se pudo determinar que el tratamiento que contenía MW pretratamiento + Fe₃O₄, produjeron mayor cantidad de biogás que los demás, siendo así la capacidad de producción de 302 ml, con lo cual se pudo concluir que combinación del pretratamiento MW con pequeñas concentraciones de NPs de Fe₃O₄ provoca energía de salida añadida.

2.1.2 Antecedentes nacionales

La presente investigación es un tema novedoso, debido a esto la información a nivel nacional con el tema a tratar es limitada, no obstante, en una investigación de Lazaro y Condori. (2021) En el cual precisa el aprovechamiento de excrementos del ganado vacuno es digestores para generar biogás, donde hace mención que es importante la presencia de sales minerales dentro de la producción tales como el potasio, magnesio, azufre y hierro en menor proporción, siendo así que algunos efluentes contienen estas sales y por ende son óptimas para la generación de biogás. Resaltado el uso necesario de limaduras de hierro o semejantes a estas como filtro para atrapar el sulfuro de hidrogeno que forma parte del biogás, para así tener un producto concentrado de metano.

Por otro lado otras investigaciones en el extranjero resalta la gran importancia del uso de Fe en la producción de biogás como de Barrena et al. (2022) Donde realiza una recopilación de las diferentes investigaciones que se han realizado hasta la fecha en la cual hace mención que esto se genera a partir de dos artículos independientes realizados con lodos depuradores y sustratos sintéticos en la cual se determina que el hierro tiende a acelerar la producción de biogás, siendo así que en la actualidad las investigaciones indican que la adición de esta sustancia aumenta significativamente la producción, en dos casos diferentes en la cual una de ellas precisa en el aumento de biogás y otra en el aumento de metano. Con ello nacen hipótesis que tratan de explicar los mecanismos de mejora donde son dos las más aceptadas siendo la primera la interacción que existe entre el hierro y los microorganismos cambiando su comportamiento de las colonias, siendo la segunda la interacción de su potencial redox. Siendo así que se plantea que uno de los desafíos es la implementación de este método a gran escala mediante un costo factible, por ello se propone la implantación adicionando el hierro por su fácil obtención y disposición.

2.2 Bases teóricas

2.2.1. Digestión anaerobia

La digestión anaeróbica se desarrolla mediante un proceso biológico complejo y deteriorativo, el cual inicia a partir de compuestos orgánicos (residuos animales y vegetales) que son convertidos finalmente en biogás, siendo una mezcla de gases (dióxido de carbono y metano con otros elementos), se desarrolla mediante la participación de un consorcio de bacterias que son tolerantes y sensibles en presencia de oxígeno o sus precursores (H_2 O_2) (Gobierno de Chile Ministerio de Energía [MINERGIA et al], 2011, p. 14)

2.2.2. Fermentación anaeróbica

Dentro de la fermentación anaerobia se entiende como un proceso en ausencia de oxígeno que es realizado por microorganismo anaerobios estrictos y anaerobios facultativos. Dentro de la fermentación anaeróbica, los compuestos orgánicos son catabolizados en la completa ausencia de algún aceptor de electrones externo mediante la presencia de microorganismos facultativos y estrictos a la presencia de oxígeno a través de reacciones bioquímicas de oxidación y reducción bajo condiciones de oscuridad (MINERGIA et al, 2011, p. 14).

2.2.3. Respiración anaeróbica

La respiración anaeróbica es un proceso bioquímico de óxido-reducción a partir de monosacáridos y otros compuestos en el que el aceptor de electrones es un elemento inorgánico diferente al oxígeno y extrañamente un compuesto químico orgánico (MINERGIA et al, 2011, p. 15).

2.2.4. Etapas de la fermentación metanogénica

La digestión anaeróbica se desarrolla mediante un proceso complejo debido al número de reacciones bioquímicas a causa de la cantidad de microorganismos presentes en ella, estas reacciones se desarrollan de manera simultánea. Siendo así que los estudios biológicos y microbiológicos realizados hasta el momento, dividiendo el proceso de digestión anaeróbica en 4 etapas: etapa hidrólisis, etapa fermentativa o acidogénica, Etapa acetogénica y Etapa metanogénica (MINERGIA et al. 2011. p. 19)

Cada etapa se compone de la siguiente manera:

Etapa Hidrólisis

La etapa hidrolítica es la parte de todo el proceso en el cual se limita la velocidad sobre todo cuando se quiere tratar compuestos orgánicos con alto contenido de sólidos. Además, que

este proceso es altamente dependiente de ciertos criterios como la temperatura a la cual es sometida, del tiempo de retención hidráulica, la composición química de la materia orgánica (concentración de grasas, proteínas, lignina y carbohidrato), el tamaño de las partículas, los niveles de pH, de las concentraciones de NH_4^+ y además de los productos de la hidrólisis (MINERGIA et al., 2011, p. 19).

Etapa Fermentativa o acidogénica.

Durante la etapa acidogénica se desarrolla la fermentación de los compuestos orgánicos solubles en moléculas, que posteriormente pueden ser usadas directamente por las bacterias encargadas del proceso metanogénico (H_2 , fórmica y acético), además de moléculas orgánicas más pequeño (butírico, láctico, propiónico y sobre todo el etanol) (MINERGIA et al., 2011, p.21).

Etapa acetogénica

La etapa acetogénica se encarga de metabolizar los compuestos como el etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos que no pueden ser metabolizados directamente por los metanogénicos (H_2 y acético), por ello deben ser procesados en compuestos más sencillos, como el hidrógeno (H_2) y el acetato ($\text{CH}_3 \text{COO}^-$) mediante las diversas bacterias acetogénicas (MINERGIA et al., 2011, p.21).

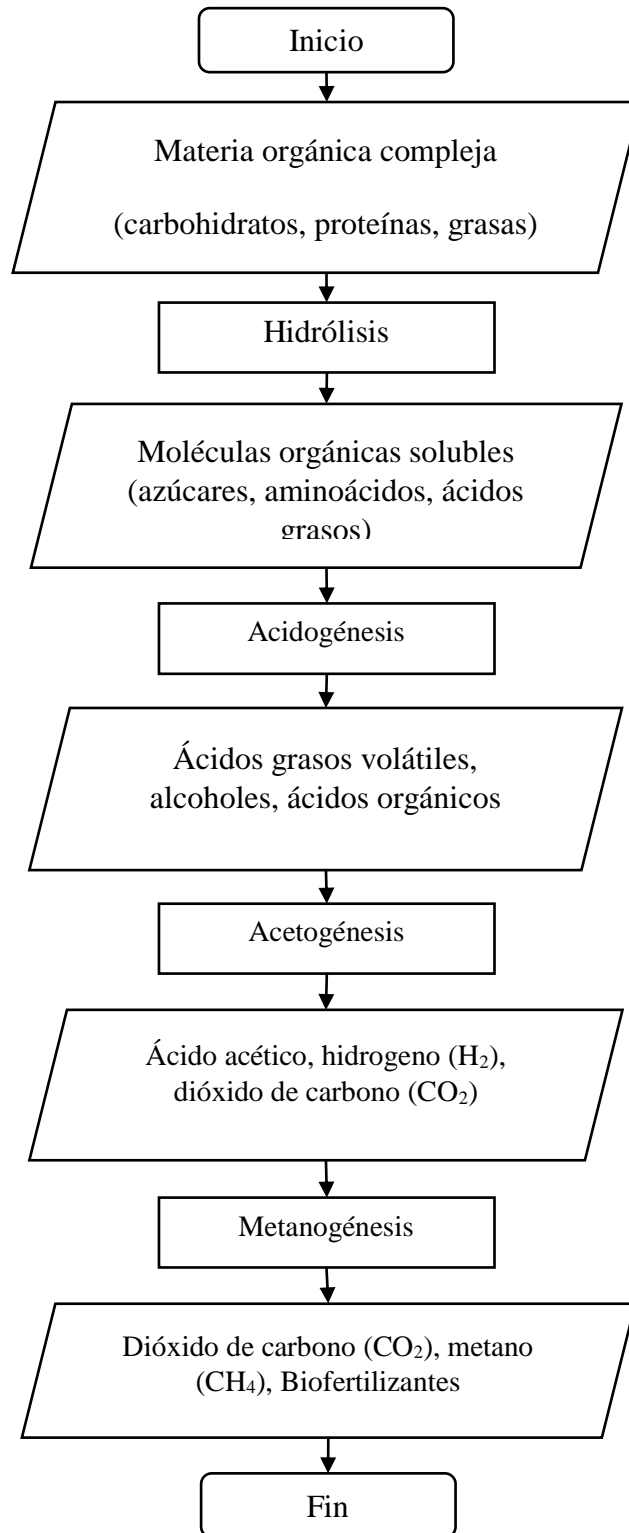
Etapa Metanogénica

La etapa metanogénica es la última etapa del proceso en la cual participan esencialmente microorganismos metanogénicos los cuales finalizan el proceso de digestión anaeróbica al generar la formación de metano mediante el metabolismo de compuestos monocarbonados o de dos átomos de carbono que están unidos por enlace covalente: metilaminas, fórmico, metanol, acetato y H_2 / CO_2 (MINERGIA et al., 2011, p.22).

Cada etapa de la digestión anaerobia se puede visualizar en la figura 1.

Figura 1

Etapas de la digestión anaeróbica en la producción de biogás



Fuente: Adaptada de FAO 2019.

2.2.5. Microorganismos

Los microorganismos presentes en digestión anaerobia podemos encontrar aquellos que pertenecen a la categoría microorganismos anaerobios facultativos y anaerobios estrictos. Dentro de los cuales podemos encontrar a los arqueas, protozoarios, bacterias y hongos que fermentan los compuestos orgánicos que se encuentran disueltos en una solución acuosa; obteniendo como resulta final el biogás (Garcia, 2015, p.9).

El consorcio de microorganismos es de vital importancia para la desarrollas la fermentación, sobre todo para aquellos residuos que presentan dificultades en su digestión, para ello se realiza la inoculación. El cual se realiza mediante la introducción del excremento animal al proceso fermentativo, especialmente de animales rumiantes, es una de las maneras más simples de obtener el inóculo, debido a que está enriquecida de microorganismos anaeróbicos a causa de que se desarrollan en el rumen de forma natural (FAO, 2019, p. 12).

2.2.6. Factores relacionados con la producción de biogás

Se debe de tener en cuenta los diversos factores involucrados en este proceso complejo, debido a que los microorganismos son muy susceptibles a cambios en su entorno, estos cambios están directamente relacionados en el nivel de producción de biogás.

a) Sustrato

Considerado como la materia prima del proceso, teniendo como objetivo el de proveer alimento y minerales a los microorganismos, para su correcto crecimiento y desarrollo, así como la producción de compuestos y sobretodo el producto final, como se observa en la tabla 1.

Las características bioquímicas que posee la materia orgánica debe de permitir el crecimiento y desarrollo de los microorganismos dentro del proceso anaeróbico. En la actividad microbiológica no solo es esencial el carbono y nitrógeno, sino que también se requiere la presencia de cierta cantidad de sales minerales tales como; el azufre, magnesio, hierro, calcio, manganeso, molibdeno, fósforo, potasio, zinc, cobalto y entre otros (MINERGIA et al., 2011, p.29)

Tabla 1

Producción de metano por los diferentes sustratos.

Sustratos	Metano l/Kg SV
Residuos sólidos municipales	360
Residuos de frutas y de mataderos	850
Purines de cerdo	337
Paja de arroz	350
Ensilado de maíz	312
Residuos orgánicos ricos en lignina	200
Estiércol de cerdo y aguas residuales	348
Restos de comida	396

Fuente: FAO, 2019.

b) Relación carbono nitrógeno (C/N)

Tanto el carbono y el nitrógeno son piezas claves para la vida e intervienen en los procesos biológicos de manera directa e indirecta. El nitrógeno es utilizado por los microorganismos con la finalidad de promover el crecimiento y regeneración celular, mientras que el carbono es usado como fuente de energía (FAO, 2019, p. 11). No obstante, el incremento o disminución de la relación C/N puede ser desfavorable para digestión anaerobia. Por ello se establece que la presencia de carbono/nitrógeno dentro del biorreactor se debe de mantener en los rangos óptimos de 20:1 a 30:1 (FAO, 2019, p.12).

La fermentación de los compuestos con alto contenido de carbono, por encima de 35:1, se desarrolla de una forma más lenta, debido a que la multiplicación y el desarrollo de los microorganismos es muy inferior, por la poca cantidad de nitrógeno, no obstante, el periodo de generación de biogás es más extensa (MINERGIA et al., 2011, p. 35). Por otro lado, en caso de una relación con menor contenido de carbono y de mayor presencia de nitrógeno, con una relación de 8:1 se imposibilita la actividad de los microorganismos debido a la excesiva formación del amoníaco, el cual cuando se presenta en grandes cantidades se convierte en un compuesto toxico e inhibe el desarrollo del proceso (MINERGIA et al., 2011, p.35). En la tabla 2 podemos apreciar valores aproximados de la relación C/N en residuos vegetales.

Tabla 2

Valores de la relación carbono/nitrógeno

Residuos Orgánicos	C%	N%	C/N
Paja de trigo	46	0.53	87:1
Paja de cebada	58	0.64	90:1
Paja de arroz	42	0.63	67:1
Paja de avena	29	0.53	55:1
Rastrojos de maíz	40	0.75	53:1
Leguminosas	38	1.50	28:1
hortalizas	30	1.80	17:1
Tubérculos	30	1.50	20:1
Hojas secas	41	1.00	41:1
Aserrín	44	0.06	730:1

Fuente: MINERGIA et al., 2011, Citado de Varnero y Arellano, 1991.

c) **Temperatura**

La temperatura es de vital importancia dentro del crecimiento microbiológico, ya que de este depende la velocidad de reacción biológica. La temperatura a la que debe ser sometida el biodigestor durante el proceso de fermentación, es considerada como uno de los criterios a tener en cuenta en el diseño, debido a la gran influencia que tiene este criterio sobre la velocidad del proceso (MINERGIA et al., 2011, p.38).

El rango de temperatura en la cual se puede desarrollar el proceso de digestión anaeróbica es muy amplio, siendo de 10 a 55 °C. De acuerdo a la temperatura, los procesos y los biorreactores, se puede clasificar en tres grupos; siendo los psicrófilicos los que se encuentran operando en un rango de temperatura menor de 10 a 25 °C, mientras que los mesófilicos se encuentran operando en un rango de temperatura de 25 a 40 °C, siendo los termófilicos los que se encuentran operando en un rango de temperatura mayor de 40 a 55 °C (FAO, 2019, p.8).

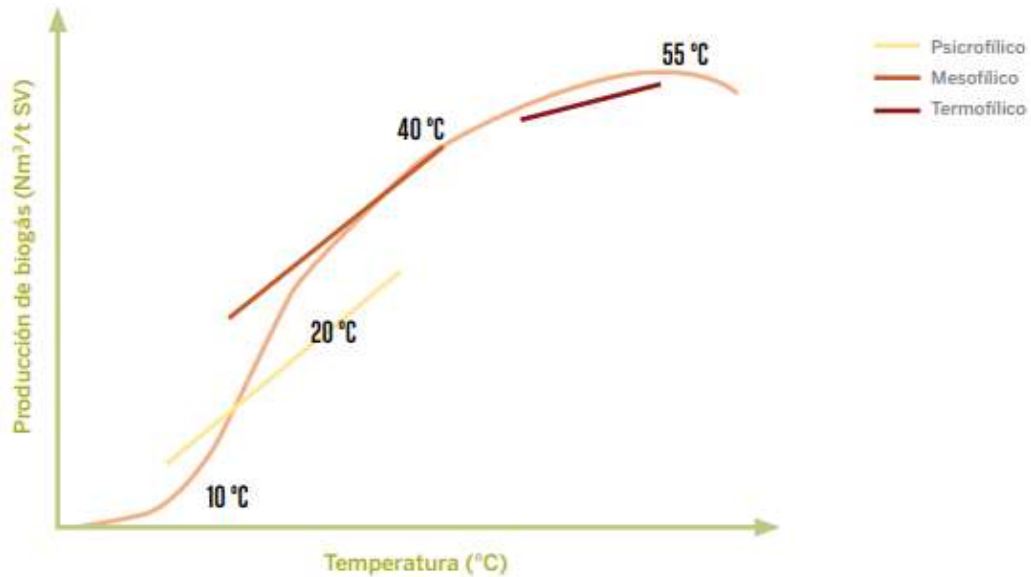
Como se puede visualizar en la figura 2

La temperatura tiene una estrecha relación físico química dentro del biodigestor. Siendo así que al aumentar la temperatura se genera un descenso en la capacidad de solubilidad del CO₂ en el medio, lo cual causaría el aumento del pH, lo que provocaría, el incremento de

las concentraciones de amonio, lo que generaría una posible situación de inhibición de la actividad bacteriana (MINERGIA et al., 2011, p.38).

Figura 2

Producción de biogás en función de la temperatura.



Fuente: FAO, 2019.

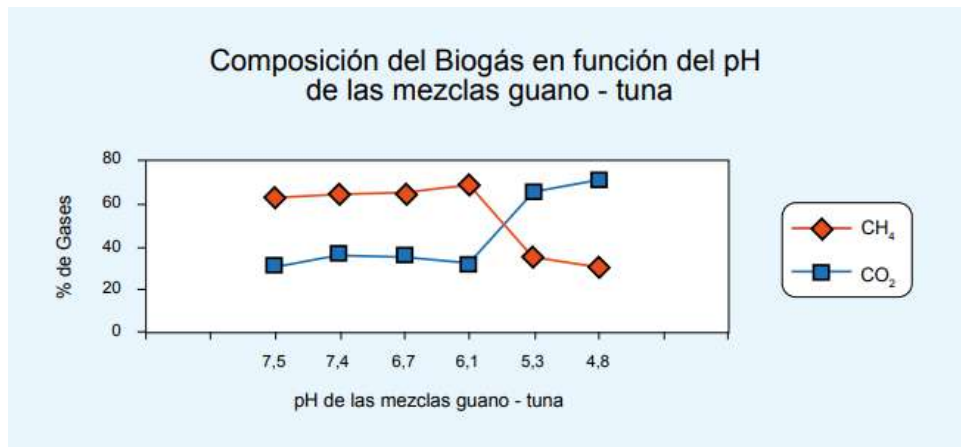
d) pH

Establecen rangos de acidez y alcalinidad, teniendo en cuenta que todo el proceso es susceptible a los cambios en los niveles de pH tanto en el comportamiento de las sustancias como en el crecimiento de los microorganismos que estos pueden resultar inhibidos en niveles no aptos. Es necesario el control del criterio pH ya que, como se precisa, principalmente el sistema biológico encargado de la producción de biogás es muy dependiente del pH, afectando especialmente a las bacterias metanogénicas siendo estas las encargadas de la generación de metano (FAO, 2019, p.8).

Para que el proceso desarrolle de manera adecuada es necesario que los niveles de pH se encuentren dentro de un rango óptimo de 6.0 a 8.0. El valor del pH dentro del biodigestor determina tanto la producción de biogás, así como la concentración de la composición de los gases (MINERGIA et al., 2011, p.43). Como se visualiza en la figura 3.

Figura 3

Producción de gases dentro de DA en función del PH



Fuente: MINERGIA et al., 2011, citado de Speece 1996.

Dentro de los procesos anaeróbicos, los niveles bajos de pH es generada a menudo por las concentraciones de ácidos grasos volátiles o la excesiva acumulación de CO₂ (MINERGIA et al., 2011, p.44).

El pH en un proceso anaeróbico, que opera en un rango óptimo, es usualmente controlado por la alcalinidad del proceso. La fermentación de la materia orgánica, en especial las proteínas, liberan amoníaco. De una mol de nitrógeno orgánico genera un equivalente a alcalinidad (MINERGIA et al., 2011, p.45).

e) **Tiempo de retención hidráulica**

El tiempo de retención hidráulica (TRH) precisa el tiempo de permanencia de la materia orgánica en el biodigestor, sometida a la actividad de los microorganismos, expresándose como el cociente entre el volumen de biorreactor y el caudal diario que ingresa (FAO, 2019, p.10).

Para la producción de biogás en el rango psicrófilo se necesita valores de TRH mayores que en el rango de mesófilo o termófilo. Siendo así que, a mayor temperatura, menor TRH. Para cada proceso, los TRH son variables; por ello los psicrófilicos son el de mayor tiempo con un alrededor de 50 a 120 días, mientras que los mesófilicos de 25 a 50 días, siendo los termófilicos los de menor tiempo con un alrededor de 15 a 25 días (FAO, 2019, p.10).

Los microorganismos requieren de tiempo para degradar la materia orgánica. La velocidad del proceso depende mayormente de la temperatura, en mayor temperatura, menor tiempo de fermentación para producir biogás (MINERGIA et al., 2011, p.45)

f) Inhibidores

Son compuestos químicos o biológicos que por su concentración pueden llegar a impedir el desarrollo del proceso de digestión anaeróbica. Estas sustancias pueden llegar a ingresar con la materia prima o pueden ser los sub productos de la actividad metabólica de los microorganismos. Sustancias como el amoniaco, metales pesados, cianuro y fenoles, siendo estos el primer grupo, por otro lado, tenemos al sulfuro y ácidos grasos de cadena larga, como parte del último grupo mencionado (MINERGIA et al., 2011, p.45).

Determinar su existencia dentro del medio es importante, ya que cuando se trabaja con residuos urbanos que podrían contener altas concentraciones químicas, que podrían inhibir el proceso (FAO, 2019, p.10). Algunos de estos inhibidores se pueden visualizar en la tabla 3.

Tabla 3

Sustancias inhibidoras y sus concentraciones

Inhibidores	Concentración Inhibidora
SO ₄	5000 ppm
NaCl	40 000 ppm
Nitrato	0.05 mg/ml
Cu	100 mg/ml
Cr	200 mg/ml
Ni	200-500 mg/ml
CN	25 mg/ml
ABS (detergente sintético)	20-40 mg/ml
Na	3500-5500 mg/ml
K	2500-4500 mg/ml
Ca	2500-4500 mg/ml
Mg	1000-1500 mg/ml

Fuente: FAO, 2019, Citado de Ferrero et al. 2008

2.2.7. Tipo de biodigestor

Los biodigestores se diferencian por la modalidad de carga, contenido de materia seca que ingresa, el mezclado, el manejo de sustrato y las etapas de manejo. La carga; puede ser completa en una sola vez (Batch) o de manera continua o semicontinua. Mientras que por el contenido de materia seca; tenemos digestores húmedos, secos o semihúmedos. Por el

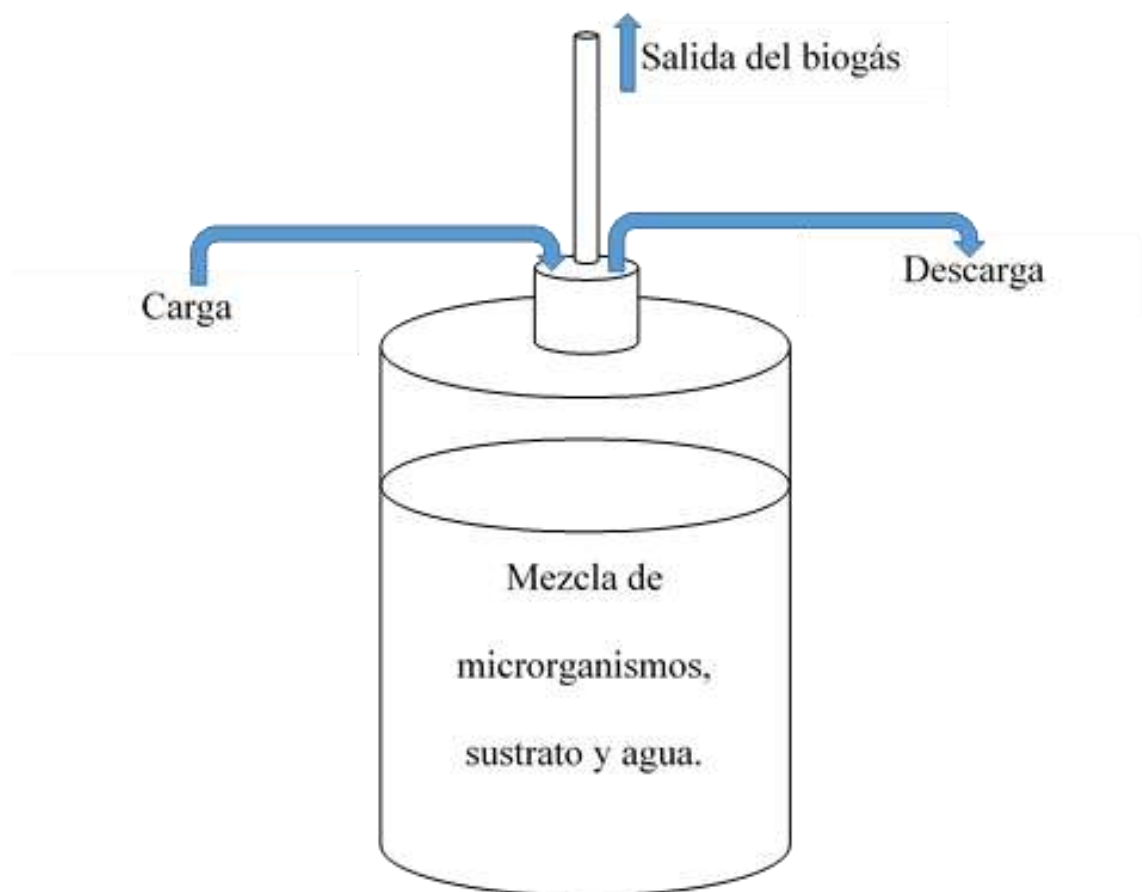
mesclado; tenemos la mezcla completa, mezcla parcial o nula. El manejo de sustrato; existen biodigestores que lo desarrollan y otros no. Etapas del manejo; caso exista manejo, pueden ser de una o dos etapas (FAO, 2019, p.14).

a) Biodigestor Batch

Este biodigestor puede estar hecho de diferentes materiales y tamaños, pero por lo usual son pequeños, lo que facilita mucho la operación y manipulación de las diferentes variables, como puede ser la temperatura y la agitación, sin generar grandes costos, por lo cual le permite simular diversos medios (FAO, 2019, p.14). Este modelo se puede visualizar en la figura 4.

Figura 4

Biodigestor Batch.



Fuente: Elaboración propia 2023.

2.2.8. Composición del Biogás

La composición del biogás es directamente dependiente de la materia orgánica con la que se alimenta el biodigestor, la tecnología utilizada y sobre todo la temperatura en la que se desarrolló el proceso (FAO, 2019, p. 23). Los componentes son:

- Metano (CH₄): es el gas combustible resultado del proceso de digestión y compuesto fundamental del biogás, con una concentración de 45% a 70 % molar (FAO, 2019, p. 23).
- Dióxido de carbono (CO₂): siendo el segundo gas de mayor consideración en el resultado del proceso, su concentración se encuentra dentro del rango de 25% a 45% molar (FAO, 2019, p. 23).
- Sulfuro de hidrógeno (H₂S): los microorganismos aeróbicos reductores de sulfuro son responsables de su generación, su concentración varía con respecto a la composición de la materia orgánica utilizada para alimentar el biodigestor. Siendo un compuesto tóxico para las personas y animales, aun en bajas concentraciones, además de ser muy corrosivo: si no es eliminada del biogás, causa la disminución de la vida útil de los equipos en donde se utiliza. En una muestra de biogás, el sulfuro de hidrógeno se encuentra dentro de un rango de 5 000 a 50 000 ppm (FAO, 2019, p. 23).
- Hidrógeno (H₂): usualmente las concentraciones de este compuesto se encuentran por lo debajo de los 5 000 ppm (FAO, 2019, p. 23).
- Nitrógeno gaseoso (N₂): su concentración puede alcanzar un máximo de 25% molar en muestras obtenidas de rellenos sanitarios; mientras que, en biodigestores, por lo general no asciende del 5% molar (FAO, 2019, p. 23).
- Oxígeno (O₂): La máxima concentración a la que puede llegar es de 5% molar (FAO, 2019, p. 23).
- Agua (H₂O): por lo general se puede encontrar vapor de agua en el sistema, más aún cuando se desarrolla el proceso en medio termofílico (FAO, 2019, p. 23).

2.2.9. Usos del Biogás

El biogás es conocido como una fuente de energía con la característica renovable debido a la obtención de energía en forma de gas, a partir de residuos orgánicos como domésticos, municipales, industriales, ganaderos, agrícolas y aguas residuales. Debido a la composición del biogás, antes de ser usado debe pasar por un pretratamiento para extraer compuestos como vapor de agua y H₂S, siendo este último muy corrosivo y tóxico.

Además, que las emisiones de este combustible biogenético tanto en el uso durante la combustión como las generadas durante la degradación de los residuos orgánicos, son considerados como emisiones netas cero, debido a que estas emisiones son recuperadas mediante la absorción de carbono que realizan la vegetación antes de la cosecha. Por lo tanto, el uso de esta tecnología tiene un ciclo de carbono corto, según el grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC, 2006).

Dentro del uso del biogás existen diversas opciones. Siendo las principales como producción de calor o vapor, generación de electricidad y la generación de biometano con la finalidad de introducirlo en la red o como gas vehicular (Naturgy, s. f., p.42).

Además de gas generado en el proceso de digestión anaeróbica, se generan sólidos y líquidos como sub productos, los cuales son denominados digeridos y que son utilizados en la agricultura.

a) Generación de calor

Uno de los principales usos que se le da al biogás es la de combustión en la generación de calor en cocinas residenciales, lámparas de gas, calefacción de galpones y en calderas para generar agua caliente o vapor. Por ello, se requiere eliminar el vapor de agua y el sulfuro de hidrogeno del biogás (FAO, 2019, p.33).

b) Generación eléctrica y térmica

Otra de las opciones para utilizar el biogás es en una central de producción cogeneración eléctrica-térmica, debido a que de esta manera se puede obtener de forma eficiente un alrededor del 90 % de la energía contenida del biogás (FAO, 2019, p. 33).

Las turbinas de gas, las cuales pueden ser de turbinas grandes, los cuales son mayor a 100 kW y las microturbinas, las cuales se encuentran dentro del rango de 25 a 100 kW, estos se pueden utilizar para la generación de energía eléctrica y calor, con una alta eficiencia similares a un motor de encendido por chispa y con menor mantenimiento (MINERGIA et al., 2011, p.56).

c) Generación de biometano

Se debe de tener en cuenta que para utilizar el biogás en redes de distribución de gas o como combustible en automóviles se requiere transformarlo en biometano con concentración de metano $\geq 84\%$. Siendo así que en la actualidad algunos países como Brasil, Holanda y Italia

exigen que la concentración de metano sea mayor al 92%, no obstante, esto depende del punto de inyección y el destino final (FAO, 2019, p. 38).

d) Digerido

El digerido es aquel que aporta minerales al suelo, usualmente nitrógeno. Se define como el sub producto del proceso de producción del biogás, teniendo como resultado una materia orgánica estabilizada y con alto contenido de minerales. Dependiendo a el proceso desarrollado y a la carga utilizada, la materia orgánica final o bioabono se puede manifestar tanto como sólido y liquido (MINERGIA et al., 2011, p.71).

- Bioabono en forma líquida: producida en los biodigestores de tipo continuo con un alto contenido de carga y bajo contenido de solidos totales siendo inferior al 12%, presentado como una desventaja en su comercialización por la característica física que presenta (MINERGIA et al., 2011, p.71).
- Bioabono en forma sólida: Producida en los biodigestores de tipo batch o en los semicontinuos con la característica de poseer un alto poder fertilizante, posteriormente a ser secado puede ser comercializado sin ningún inconveniente (MINERGIA et al., 2011, p.71).

2.3 Definiciones de términos básicos

Repeticiones por minuto (rpm): hace referencia a la frecuencia o rapidez de las rotaciones por minuto que completa un cuerpo que gira, su uso se vincula a las vueltas que completa un cuerpo cerca de su eje en cada 60 segundos (Física Básica, 2021).

pH (potencial de hidrógeno): se utiliza para determinar la medida del estado de acides o alcalinidad de una solución, determina las concentraciones de Hidrogeno, la escala comprende desde 1 – 14, siendo el uno el valor más ácido mientras el 14 el valor más alcalino (HANNA instruments Colombia, s. f.).

Tratamiento: variable de estímulo o condición experimental, refiere a los estímulos dentro de una investigación con la finalidad de determinar una respuesta (Universidad de Colima de Mexico, s. f.).

Testigo: es aquel tratamiento de comparación con los demás tratamientos, que no debe faltar en todo experimento, es aquel en el cual no se añade la variable a evaluar (Reyes, L. 2023).

Barro o lodo: es la mezcla de tierra con agua, teniendo como resultado el barro que no es más que sedimentos, dentro de su composición depende de las características del suelo (Díez Ceramic, 2021).

Hierro: en su forma natural se encuentra como óxido, con coloración rojiza, siendo un mineral duro, denso y de color gris plateado, en la corteza se encuentra compuesta por cuatro isótopos estables: ^{56}Fe , ^{54}Fe , ^{57}Fe y ^{58}Fe , cuyas concentraciones relativas son del 91,66 %, 5,82%, 2,19% y 0,33% respectivamente (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2023).

Concentración: en la química determina la proporción del soluto y solvente en una solución, de terminando así la cantidad de una sustancia dentro de la muestra (Significados, 2017).

Absorción atómica: es la técnica más usada para determinar la presencia de metales en muestras ambientales, aire, suelo y agua, de la misma manera como muestras de minerales, alimentos, productos químicos, fundiciones y aleaciones. (Argentina, 2019)

Muestra: es una fracción o parte de un todo en que se desarrollara todo el proceso de la investigación, siendo así la parte representativa (López, 2004).

Nanopartículas: es una partícula enana que no es visible al ojo humano, para ser visible se requiere un microscopio, estas poseen una dimensión de menor a 100 nanómetros (Fundación UNAM, 2016).

2.4 Hipótesis de investigación

2.4.1. Hipótesis General

La capacidad productiva del biogás es significativa al emplear lodo natural con presencia de hierro.

2.4.2. Hipótesis Especifica

HE1: La concentración de hierro es considerable en el lodo natural empleado en la producción de biogás.

HE2: Se requieren 50 gr de lodo natural con presencia de hierro para obtener una producción optima de biogás.

HE3: El tiempo retención hidráulica es mínimo para la producción de biogás empleando lodo natural con presencia de hierro.

2.5 Operacionalización de las variables

Tabla 4

Matriz Operacionalización de las variables de la investigación

VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES	METODOLOGÍA
V.D: Producción de biogás (Y)	Volumen de biogás producido	Volumen final	ml	Uso del programa (ANOVA)
	Retención hidráulica	Tiempo	Días	Uso de instrumento de medición
V.I: Lodo natural con presencia de Fe (X)	Característica química	Concentración de Fe	% = porcentaje	Absorción atómica
	Dosis de lodo por tratamiento	Volumen diario	ml/Día	Uso del programa (ANOVA)

Fuente: Elaboración propia (2023).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.

3.1 Gestión del experimento

3.1.1. Ubicación

El presente trabajo de investigación se realizó en el Centro Experimental Pecuario Vacunos de Leche de la Facultad de Ingeniería Agrarias, Industria Alimentaria Y Ambiental de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión Av. Mercedes Indacochea N° 609 - Huacho, Lima, Perú, cuyas coordenadas UTM son: 8769027.13 N y 215395.18 E en la zona 18 L. la ciudad se encuentra a una elevación de 34 m s. n. m. Como se visualiza en la Figura 5.

Figura 5

Ubicación del Experimento de la investigación



Figura 4. Localizado específicamente en el Centro Experimental Pecuario Vacunos de Leche. Fuente: elaboración propia 2023.

Por otro lado, la muestra a utilizada se extrajo de una quebrada cercana a la laguna de Purhuay, que se encuentra dentro del Parque Nacional Huascarán en el centro poblado de Acopalca, Huari, Huari, Ancash, Perú, cuyas coordenadas UTM son: 8969386.75 N y

257627.11 E en la zona 18 L, encontrándose a una altitud de 3 485 m s. n. m. como se visualiza en la figura 6.

Figura 6

Ubicación de punto de muestro



Figura 6. Lugar de extracción de la muestra que será utilizada en la experimentación.

Fuente: elaboración propia 2023.

3.1.2. Características del área experimental

Se contó con el ambiente adecuado con excelentes condiciones para implementar los biodigestores, lavadero, mesa y se pudo ingresar de manera permanente durante la duración de todo el experimento.

3.1.3. Tratamientos

Los tratamientos estuvieron compuestos de tres dosis diferentes de lodo natural con presencia de hierro, como se observa en la tabla 5. Los cuales fueron agregados en los biorreactores para proceder con la digestión anaeróbica, con lo cual se dio el inicio del proceso de experimental en la producción de biogás.

Tabla 5

Matriz de composición de los tratamientos

N°	Tratamiento
T0	Agua 350 ml + materia orgánica 150 gr
T1	Agua 350 ml + materia orgánica 150 gr + lodo natural 25 gr
T2	Agua 350 ml + materia orgánica 150 gr + lodo natural 50 gr
T3	Agua 350 ml + materia orgánica 150 gr + lodo natural 75 gr

Fuente: Elaboración propia (2023).

3.1.4. Diseño experimental

Se trabajó con un diseño estadístico completamente al azar, ya que este se adapta al desarrollo de la investigación, teniendo como unidades experimentales homogéneas que consta de tres tratamientos y un testigo, cada uno con tres repeticiones teniendo en total 12 unidades experimentales, que estarán distribuidas al azar como se precisa en tabla 6.

Tabla 6

Diseños completamente al azar según el tratamiento

Repeticion I	T2	T1	T1	T0
Repeticion II	T3	T0	T3	T1
Repeticion III	T0	T3	T2	T2

Fuente: Elaboración propia (2023).

3.1.5. Variables a evaluar

Se evaluó las siguientes variables cuantitativas:

- **Concentración de Hierro en la muestra.**

Mediante un análisis de laboratorio utilizando el método de absorción atómica se determinó las concentraciones de hierro (Fe) presentes en la muestra que se usará dentro del experimentación.

- **Volumen de biogás producido**

Mediante probetas se midió la producción de biogás diaria ml/Día y el acumulado final en ml por cada tratamiento, durante 11 días en la cual se desarrolló la digestión anaeróbica.

- **Tiempo de retención hidráulica**

Mediante las probetas se determinó el día final del proceso de fermentación, siendo el día de menor producción de biogás durante los 11 días programados para la digestión anaerobia.

3.1.6. Conducción del experimento

- **Procedimientos previos**

La muestra que fue usada en el experimento, fue extraída de la quebrada que se encuentra cercana a la laguna de Purhuay en Huari, Huari, Ancash, consigo se trasladado a la ciudad de Huacho, posteriormente se envió la muestra representativa al laboratorio para su análisis, que se encuentra en la ciudad de Lima, entre tanto, el lodo a utilizar para los tratamientos se dejó reposar en una botella por 30 días en un ambiente de temperaturas mesófilos hasta que presente una coloración negruzca y actividad microbiana mediante pequeñas burbujas. Se armó 12 biorreactores con botellas plásticas de 600 ml que posteriormente se usaron para la DA, así como la adquisición de dos soportes de madera y bandejas de plástico.

- **Preparación**

Se adecuo todos los instrumentos, herramientas, biorreactores, insumos, etc. Para lo cual se realizó el pesado de la materia orgánica y la muestra y el volumen de agua que posteriormente fueron vertidos en el biorreactor, por consiguiente, fue agitado para medir el nivel de pH de un biorreactor por tratamiento. Por último, fue sellado herméticamente con ayuda del teflón, para iniciar la DA. Se colocaron las probetas boca abajo dentro de las bandejas con agua, mediante una manguera se extrajo el aire de la probeta ascendiendo el agua dentro de la probeta, las salidas de los biorreactores fueron conectados directamente a las probetas.

- **Medición y fermentación**

Se recolectaron los datos del volumen producido por día, durante el tiempo en el que se desarrolló la DA, esto mediante el uso de las probetas invertidas sobre recipientes con agua, que debido a la diferencia de presión que se creará con el biogás, el agua se ira desplazando hacia abajo, lo cual nos indicó en ml lo que se produce a diario, además que se obtuvieron los datos respecto al tiempo de retención hidráulica. mediante la disminución progresiva en los días de producción de biogás, todo esto se realizará en condiciones ambientales.

- **Final**

Se tomó el último dato de la producción de biogás, que se realizó al finalizar el periodo experimental el día 11 posterior del inicio de la DA. Culminando con la prueba de combustión del gas almacenado para confirmar la presencia de biogás dentro de las probetas invertidas.

Siendo así que el presente experimento se realizara en cuatro pasos que se visualiza en la figura 7.

Figura 7

Esquema del procedimiento experimental de la investigación.

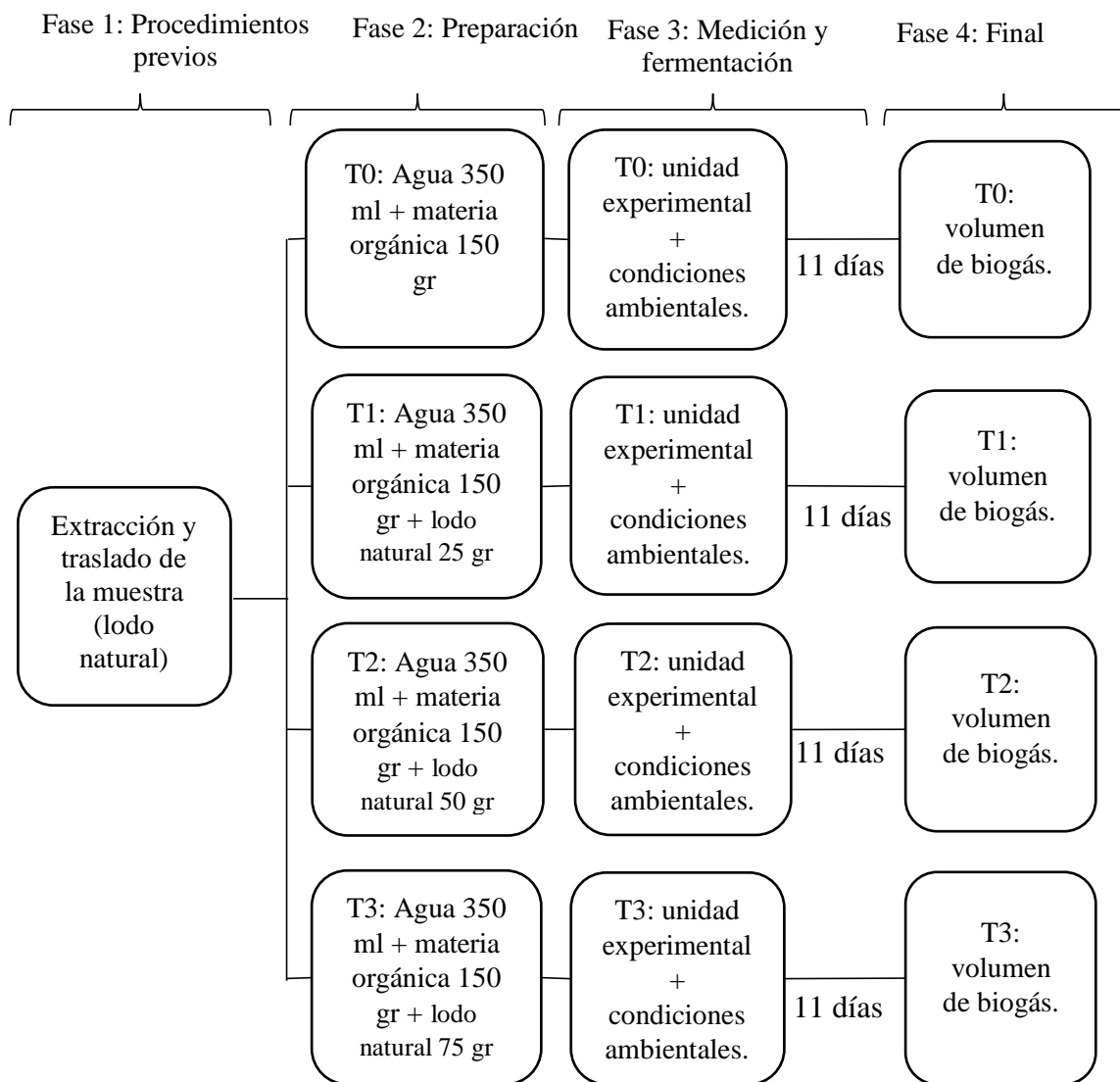


Figura 7. Etapas del proceso experimental de la investigación. Fuente: elaboración propia 2023.

3.2 Técnicas para el procesamiento de la información

Los procesamientos de los datos recolectados se ordenaron en el software Microsoft Excel, ya que las variables son cuantitativas tienen que ser sumados y su promedio diario, con la finalidad de facilidad de ingresar los datos al software de Infostat para su procesamiento, según el diseño estadístico, por consiguiente, se realizara el ANOVA y la prueba Tukey al 5%.

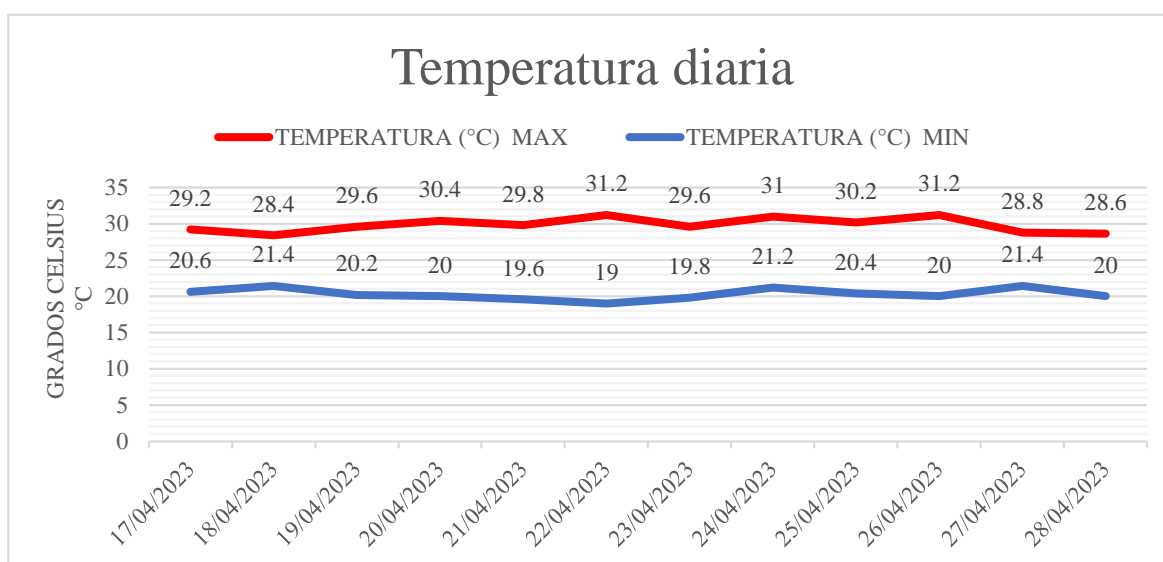
CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1. Capacidad productiva de biogás empleando lodo natural con presencia de hierro.

Se realizaron 12 unidades experimentales los cuales se desarrollaron en condiciones ambientales de pH y temperatura, durante 11 días, iniciando el 17/04/2023 y culminando el 28/04/2023 desarrollándose en la temporada de otoño, en la cual se registraron temperaturas máximas de 31,2 – 28,4 °C y mínimas de 21,4 – 19 °C como se puede visualizar en la figura 8.

Figura 8

Temperatura en las que se desarrolló el proceso DA

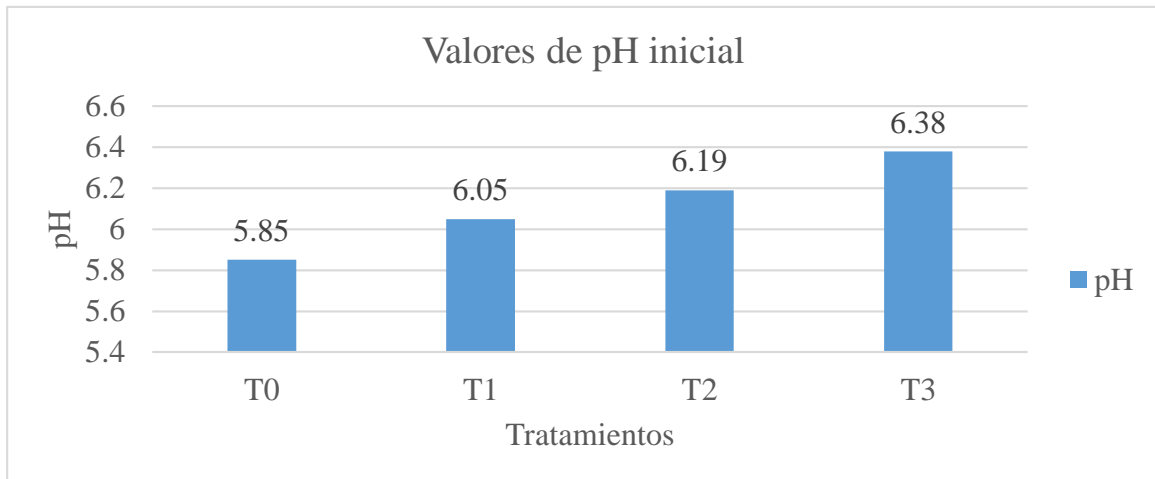


Fuente. Datos proporcionados por el SENAMHI, estación meteorológica UNJFSC, código 111163.

Por otro lado, al inicio del proceso de DA se midieron los valores de pH de cada tratamiento donde se obtuvo valores máximos de 6,38 y mínimos de 5,85 de pH, esto mediante el uso del multiparametro, como se puede visualizar en la figura 9, no se usó ninguna sustancia para ajustar los valores de pH, siendo así que el pH aumentaba en función al incremento del uso del lodo natural con presencia de hierro.

Figura 9

pH por tratamiento

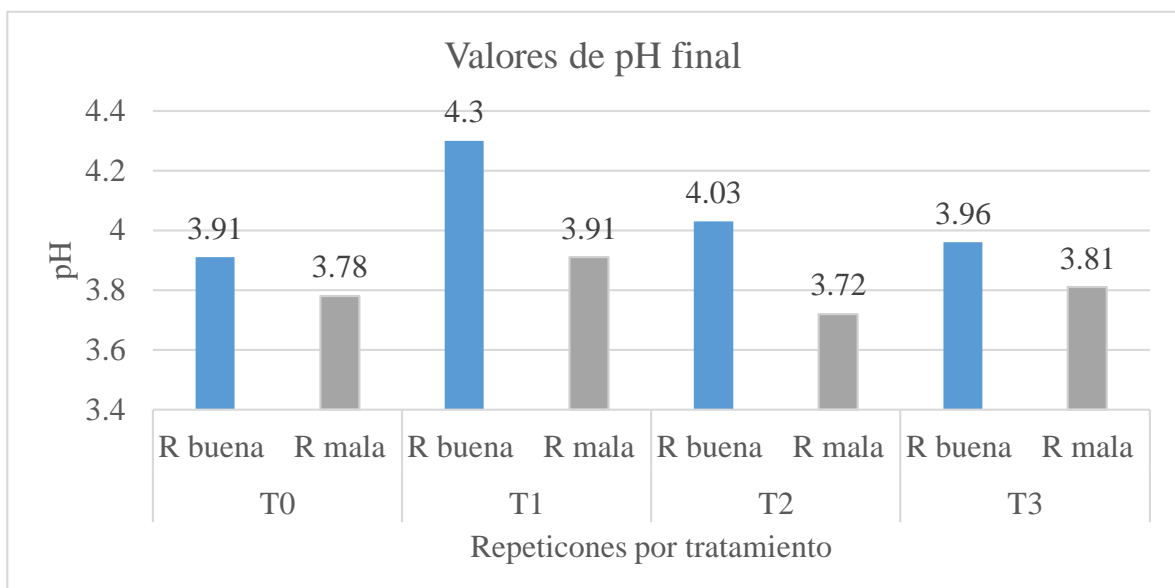


Fuente. Elaboración propia 2023.

Para el análisis estadístico ANOVA, se eliminó una repetición por cada tratamiento debido a que las repeticiones se detuvieron o su producción fue muy baja por la existencia de algún inhibidor dentro del proceso de DA, siendo así que al finalizar el proceso de producción se evaluó los niveles de pH de dichas repeticiones con respecto a las repeticiones de buena producción dentro de cada tratamiento, en lo cual se determinó que existe una diferencia de pH por repetición, como se puede visualizar en la figura 10.

Figura 10

Niveles pH entre repeticiones.



Fuente. Elaboración propia 2023

Por ello se tomó 8 unidades experimentales para realizar la evolución estadística, siendo la acidificación del medio la causa de la baja producción. En la siguiente tabla se puede apreciar los resultados del análisis de varianza

- **ANOVA**

Tabla 7

Análisis de variancia para la producción total de biogás.

FV	GL	SC	CM	F	VALOR P	Sig
TRAT	3	4969337.50	1656445.83	196.90	0.0001	**
ERROR	4	33650.00	8412.50			
TOTAL	7	5002987.50				
CV%	7.37 %					

Nota: **= significativo

La tabla muestra que existe diferencias altamente significativas para la fuente de variación de tratamientos ya que el valor de $P = 0.0001$ es menor a 0.05, además, que el coeficiente de variación muestra un valor de 7.37 % el cual es indicador de que los datos de campo de la investigación presentan una buena precisión experimental.

- **Prueba de Tukey 5%**

Tabla 8

Prueba de Tukey al 5% para la producción total de biogás

Tratamiento	Medias (ml)
T1: 350 ml de agua + 150 g de MO + 25 g de lodo	2360 A
T2: 350 ml de agua + 150 g de MO + 50 g de lodo	1360 B
T3: 350 ml de agua + 150 g de MO + 75 g de lodo	1110 B
T0: 350 ml de agua + 150 g de MO	145 C

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Según la prueba Tukey al 5% de probabilidades para la producción neta de biogás empleando lodo natural con presencia de hierro nos reporta que los tratamientos son diferentes entre sí, siendo el T1 con mayor volumen de producción con un alrededor de 2360 ml superando

estadísticamente a los demás tratamientos, seguido por el T2 y T3 que fueron similares estadísticamente, pero superiores al T0.

4.2. Concentración de hierro en lodo natural

Dentro del punto de muestreo se observaron sedimentos de coloración marrón rojizo además de manchas con una similitud al aceite quemado en agua, debido a los colores que se podían observar. Dentro del análisis de la muestra por el laboratorio Slab Perú (laboratorio de ensayo e investigación), mediante el método de absorción atómica determino que la muestra de 250 gr está compuesta por 26.20 % de hierro, siendo así que en la muestra encontramos 65.5 gr de hierro.

4.3. Cantidad de lodo con presencia de hierro que se requiere para obtener una producción considerable de biogás.

La producción de biogás diaria fue promediada con los días de producción que tubo cada tratamiento, en la siguiente tabla se pude apreciar los resultados del análisis de varianza.

- ANOVA

Tabla 9

Análisis de variancia para la producción diaria de biogás.

FV	GL	SC	CM	F	VALOR P	Sig
TRAT	3	64349.07	21449.69	172.77	0.0001	**
ERROR	4	496.62	124.15			
TOTAL	7	64845.69				
CV%	7.36 %					

Nota: **= significativo

La tabla muestra que existe diferencias altamente significativas para la fuente de variación de tratamientos ya que el valor de P = 0.0001 es menor a 0.05, además, que el coeficiente de variación muestra un valor de 7.36 % el cual es indicador de que los datos de campo de la investigación presentan una buena precisión experimental.

- **Prueba de Tukey 5%**

Tabla 10

Prueba de Tukey al 5% para la producción diaria de biogás

Tratamiento	Medias (ml/DIA)
T1: 350 ml de agua + 150 g de MO + 25 g de lodo	295.00 A
T2: 350 ml de agua + 150 g de MO + 50 g de lodo	138.75 B
T3: 350 ml de agua + 150 g de MO + 75 g de lodo	123.64 B
T0: 350 ml de agua + 150 g de MO	48.33 C

Nota: Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

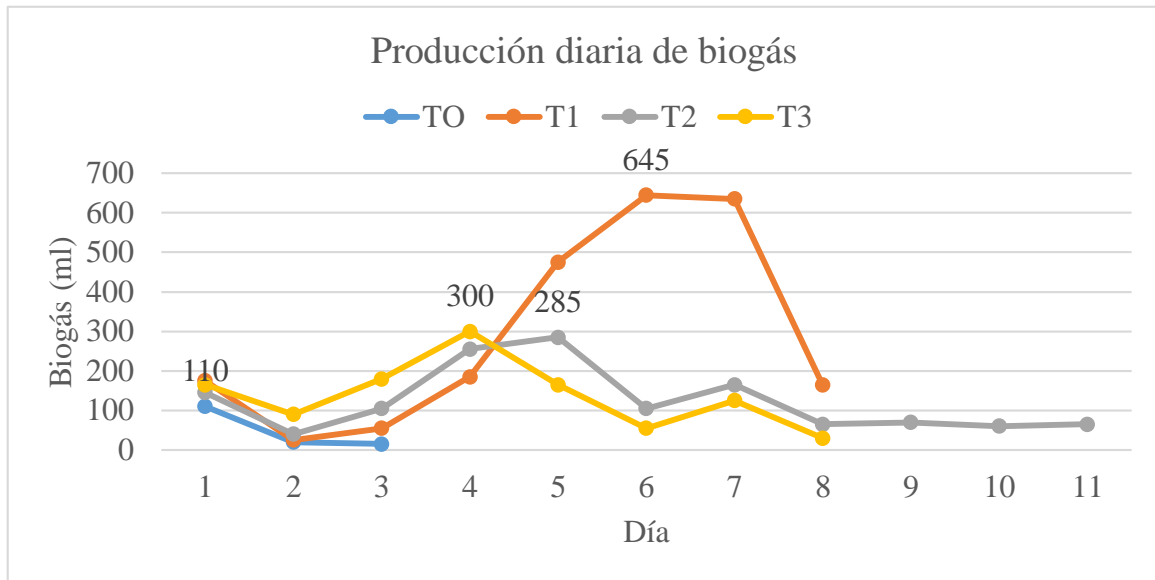
Según la prueba Tukey al 5% de probabilidades para la producción diaria de biogás empleando lodo natural con presencia de hierro nos reporta que los tratamientos son diferentes entre sí, siendo el T1 con mayor volumen de producción diaria con un alrededor de 295.00 ml/DIA superando estadísticamente a los demás tratamientos, seguido por el T2 y T3 que fueron similares estadísticamente, pero superiores al T0.

4.4. Tiempo de retención hidráulica en la producción de biogás empleando lodo natural con presencia de hierro.

Para el tiempo de retención hidráulica se toma el último día de producción, como se puede visualizar en el grafico 11. Siendo así que el primer día hubo una producción elevada a comparación del segundo día, pero siendo inferior al día de mayor producción en cada tratamiento, excepto en el T0. Cada tratamiento llega a tener un día de producción máxima que posterior a ello se inicia el declive de la producción llegando al día de producción nula, como se puede visualizar en el gráfico 11. Siendo así que el tiempo de retención hidráulica para el tratamiento T0 es de 3 días, mientras que para el T1 y T3 el tiempo es de 8 días, por otro lado, el tratamiento T2 supero los días de observación previstos dentro de la experimentación por ello su tiempo fue superior a los 11 días.

Grafico 11

Tiempo de retención hidráulica de cada tratamiento



Nota: elaboración propia 2023.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

5.1. Capacidad productiva de biogás empleando lodo natural con presencia de hierro.

Dentro de los parámetros de temperatura y pH, donde en el primer caso se mantuvo parámetros de temperatura similares a las de la temporada de verano, debido a la presencia del fenómeno del niño en el litoral peruano, el cual mantuvo al proceso experimental en un ambiente mesófilo, por otro lado, dentro del pH, el lodo al ser combinado con la materia orgánica mantuvo un efecto de amortiguación en el medio, haciendo que la solución se mantenga en un medio cercano al pH neutro.

La producción de biogás a temperatura ambiente con un aproximado de 30 °C se obtuvo un volumen de 2360 ml, donde se tuvo una relación de (materia orgánica/ agua) de 1: 2,3, donde la materia orgánica digerida fue cascaras de vegetales a comparación de la investigación de Curiel et al. (2018) donde obtuvo un volumen máximo de 1890 ml a una temperatura ambiente de 22°C, con una relación de 1: 1,3 donde la materia orgánica digerida fue el purín de cerdo.

Por lo cual se pudo determinar que al agregar nanopartículas de hierro a la solución estimula el desarrollo de los microorganismos, siendo una base teórica, la cual permitió determinar que al agregar el lodo natural con presencia de hierro tiene el similar efecto que las nanopartículas de hierro, además que, al usar el lodo natural, se ingresa un consorcio de microorganismos que ayudan a digerir la materia orgánica, ya que no se usó el inóculo de microorganismos presentes en el excremento de animales rumiantes o cerdos, además que los materiales usados para la experimentación fueron diferentes con relación al antecedente.

5.2. Concentración de hierro en lodo natural.

La muestra de sedimentos extraído de la quebrada dio como resultado que alrededor de la tercera parte es hierro, que a la vez se pudo corroborar con el color marrón rojizo, que según la investigación de Acevedo-Sandoval et al. (2004) en el cual nos precisa que el hierro es uno de los minerales con mayor o mínima presencia en el suelo, en el cual se puede expresar en tres diferentes colores, los cuales son rojo, amarillo y pardo, siendo así que el óxido de hierro se expresa con un color rojizo o marrón rojizo. Además de la presencia de una mancha visible en la división de agua-sedimento lo cual se puede corroborar con la investigación de Spring et al. (1996) en la cual aislaron bacterias del género *Leptothrix* que habita en un ambiente ferromanganeso, en el cual se podría observar su film como una mancha en la

interfaz agua-sedimento, la cual se encuentra en cuerpos de agua dulce con presencia de manganeso y hierro.

Por otro lado, si comparamos las concentraciones de hierro en el sedimento con la norma de Estados Unidos, denominado “selecting remediation techniques for contaminated sediment” (USEPA-823-B93-001), debido a que en el Perú no se cuenta con una norma de calidad ambiental para sedimentos. Para realizar la comparación se tuvo que cuantificar los resultados de laboratorio a unidades de mg/Kg, ya que la norma trabaja con tales unidades. La comparación se puede visualizar en la tabla 11

Tabla 11

Comparación de la concentración de hierro con la norma EEUU (mg/Kg)

	No contaminado (mg/Kg)	Moderadamente contaminado (mg/Kg)	Muy contaminado (mg/Kg)
Fe (USEPA)	< 17 000	17 000 – 25 000	> 25 000
Fe en muestra			262 000

Fuente: resultados del laboratorio Slab Perú y Selecting remediation techniques for contaminated sediment (1993).

Donde podemos observar que los niveles de hierro en los sedimentos superan la establecido por la norma, ubicándose en la categoría de muy contaminado, no obstante, en el caso de la quebrada, la cual se encuentra en el Parque Nacional Huascarán, donde no se ha desarrollado alguna actividad económica que contamine el cuerpo de agua, siendo de formación natural las concentraciones de hierro dentro en el sedimento.

5.3. Cantidad de lodo con presencia de hierro para obtener una producción considerable de biogás.

La producción de biogás en cada dosis de lodo fue muy distinta, alcanzando la máxima producción para la dosis de T1 (25 gr) el día 6, con una producción aproximada de 645 ml, por otro lado, la dosis de T2 (50 gr) el día 5, con una producción aproximada de 285 ml y la dosis de T3 (75 gr) el día 4, con una producción aproximada de 300 ml como se visualiza en la figura 11, siendo así que mientras mayor sea la cantidad de lodo natural con presencia de hierro en el proceso de DA, menor será el tiempo de reacción, no obstante, la mayor producción de biogás se desarrolló con la menor cantidad de lodo natural con presencia de

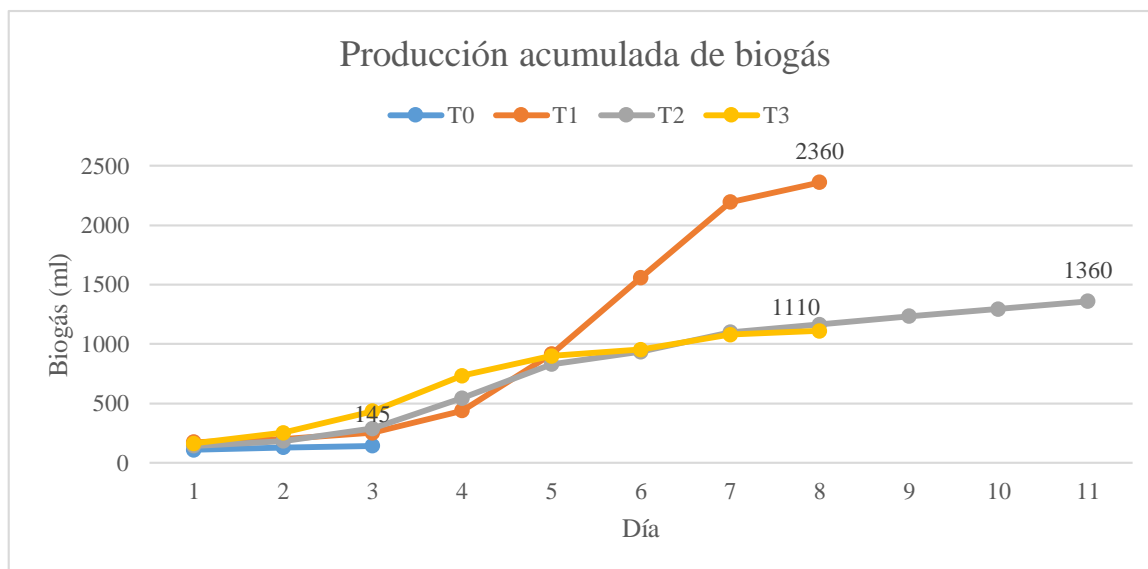
hierro T1 con 2360 ml, siendo moderada el tiempo de reacción como se puede visualizar en la figura 12.

Por otro lado, todas las dosis presentaron una producción de biogás a comparación del T0 (testigo) en la cual no hubo una reacción positiva para la producción de biogás, siendo el día 1 el de mayor producción con 110 ml, debido a que no contaba con el inoculo (microorganismos metanogénicos).

De la misma manera en la investigación de Ávila et al. (2018) dentro de su investigación en la generación de biogás a partir de residuos sólidos biodegradables recolectados de los comedores, el cual consistía en cascaras y sobras de alimentos, siendo así que en el tratamiento que solo consistía de residuos sólidos biodegradables se obtuvo como resultado nula producción de biogás

Figura 12

Producción acumulada de biogás por dosis



Nota: elaboración propia 2023.

Además, los resultados obtenidos por Bailón et al. (2020) en el cual obtuvo resultados similares al emplear Fe_2O_3 en el cual la máxima producción de metano fue el día 3, con valores de 91.91, 88.28, 101.41 y 95.37 ml para las dosis 50, 100 y 25 mgNPs/L y el control respectivamente, siendo así que la dosis de mayor producción es de 25 mgNPs/L.

Así mismo, Dibag et al. (2020) dentro de sus resultados usando nanopartículas de óxido de hierro, dentro de la segunda semana se observó un incremento en la producción de biogás, siendo en la quinta semana donde se visualiza la disminución de la producción, siendo así

que el tratamiento T5 (18 mg/L) con una producción neta de 29,48 L/g VS, seguido del T6 (21 mg/L) con una producción de 26,58 L/g VS, T4 (15 mg/L) con una producción de 25,0 L/g VS, a comparación del testigo, con una producción de 22,91 L/g. Siendo el tratamiento T5 el de mayor producción de biogás.

5.4. Tiempo de retención hidráulica en la producción de biogás empleando lodo natural con presencia de hierro.

Teniendo en cuenta que el tiempo de retención hidráulica esta relacionado directamente a la temperatura en la que se desarrolla el sistema de digestión, siendo así que los experimentos se desarrollaron en una temperatura ambiente que oscila los 31 °C encontrándose en un ambiente mesofilo.

Por lo tanto, dentro de los tratamientos, el de menor tiempo de retención fue el tratamiento T1 y T3 los cuales culminaron su proceso digestivo el día 8, siendo el tratamiento T2 el que no culmino el proceso de digestión en el tiempo establecido de la experimentación, superando los 11 días y manteniendo una producción mínima constante. Siendo así que uso del lodo natural con presencia de hierro en la fermentación para la producción de biogás puede llevar a un correcto desarrollo del metabolismo de los microorganismos o puede actuar como un inhibidor de la actividad, ya que comparando el T1 y T3 tanto el tiempo de retención hidráulica y su producción acumulada, se podría asumir que una mayor concentración de lodo puede afectar la producción final de biogás, por otro lado, al obtener un tiempo muy mínimo de retención hidráulica, encontrándose por debajo del rango establecido para los termifilos, se puede decir que el lodo disminuye el tiempo de retención hidráulica.

Siendo así que Curiel et al. (2018) llego a la conclusión que la adición de las nanopartículas de hierro, favorece a la producción de biogás, mas no al menor tiempo con mayor producción, ya que el tratamiento expuesto a una temperatura controlada de 34 °C fue el de menor tiempo de retención hidráulica, siendo así que los ensayos realizados a temperatura ambiente tuvieron un tiempo de producción superior a 11 días.

De la misma manera Montenegro (2020) precisa que la relación del tiempo de retención hidráulica se asocia a la temperatura, por ello, al tener un ambiente con calor, se tendrá un menor tiempo de retención hidráulica, pero si tenemos un ambiente frio, se tendrá un mayor tiempo de retención hidráulica. No obstante, el testigo tubo un menor tiempo de retención hidráulica de 3 días, debido a que no se desarrolló el proceso metanogénico, siendo así que la prueba de combustión no hubo ninguna señal de fuego.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 Conclusiones

- En esta tesis se determinó la capacidad productiva de biogás al emplear lodo natural con presencia de hierro, en la cual obtuvieron producciones significativas de 1110, 1360 y 2360 ml de las dosis 25, 50 y 75 gr a comparación del testigo.
- En esta tesis se determinó la concentración de hierro que se encuentra en el lodo natural empleado en la producción de biogás, que mediante el análisis de absorción atómica se determinó que el sedimento está conformado con una concentración considerable de 26.20% de hierro.
- En esta tesis se determinó la cantidad de lodo natural con presencia de hierro que se requiere para obtener una producción considerable de biogás, siendo así que la dosis de 25 gr del tratamiento 1 la que obtuvo una producción significativa de 2360 ml de biogás.
- En esta tesis se determinó el tiempo de retención hidráulica en la producción de biogás empleando lodo natural con presencia de hierro, siendo el tratamiento 1 y el tratamiento 3 el de menor tiempo de retención hidráulica con un total de 8 días.

6.2 Recomendaciones

- En base a los datos obtenidos en esta investigación se recomienda realizar una investigación comparativa entre dosis de lodo con presencia de hierro y dosis de diferentes inóculos para determinar el grado de significancia a comparación de los métodos convencionales.
- Se recomienda realizar una investigación más detallada con respecto a la composición química y microbiológica del lodo, así como determinar el tipo de proceso que ocurre cuando el lodo de coloración marrón rojiza se torna negruzca.
- Se recomienda realizar una investigación en la cual se determine la concentración de metano por cada tratamiento usando lodo con presencia de hierro.
- Se recomienda realizar una investigación en la cual se determine la veracidad de los datos obtenidos respecto al tiempo de retención hidráulica, aplicando el 10 % de materia seca en la carga neta de fermentación, usando lodo con presencia de hierro.

CAPÍTULO VI: REFERENCIAS.

- Argentina. (2019). *Absorción atómica*. Argentina.gob.ar. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/quimica/absorcion-atmica>
- Acevedo-Sandoval, O., Ortiz-Hernández, E., Cruz-Sánchez, M., & Cruz-Chávez, E. (2004). El papel de óxidos de hierro en suelos. *Terra Latinoamericana*, 22(4), 485-497. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311096013.pdf>
- Ávila-Hernández, M., Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., & Jiménez-Morales, M. F. (2018). Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(2), 159-170. Recuperado de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822018000200159
- Banco Mundial. (2021). *Cocinar es un riesgo para casi la mitad de los latinoamericanos*. World Bank. Recuperado de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2020/11/11/cocina-energias-modernas-combustibles-limpios-latinoamerica>
- Bailón-Matehuala, J. M., Bernal-Martínez, A., Juárez-Servín, D. P., Cuevas-Rodríguez, G., & Silva-Muñoz, S. (2021). Nanopartículas de Ni y Fe₂O₃ en reactores anaerobios para la producción de metano. *RINDERESU*, 5(2). Recuperado de <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/84>
- Barrena, R., Moral-Vico J., Font X., y Sánchez, A. (2022). Enhancement of Anaerobic Digestion with Nanomaterials: A Mini Review. *Energies*. 15(14). Recuperado de <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/14/5087>
- Curiel, E. M., Moreno, L. C. D., y del Campo Moreno, C. M. (2019). Nanopartículas de hierro magnetizado en la producción de biogás de excretas de ganado porcino. *Tecnogestión: Una mirada al ambiente*, 16(1). Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/14603>
- Díez Ceramic. (2021). *Diferencias entre barro y arcilla*. Recuperado de <https://diezceramic.com/diferencias-entre-barro-y-arcilla/>
- Egan, M. (2023, junio 3). El mundo puede estar acercándose a una crisis energética como la de la década de 1970, o peor. *Cable News Network*. Recuperado de <https://cnnespanol.cnn.com/2023/06/03/mundo-crisis-energetica-1970-trax/>

- Física Basica. (2021). *¿Qué son las revoluciones por minuto en física?* Recuperado de <https://fisicabasica.org/mecanica-del-cuerpo-rigido/revoluciones-por-minuto-en-fisica/>
- Fundación Universidad Nacional Autónoma de México. (2016). *¿Qué son las nanopartículas?* Recuperado de <https://www.fundacionunam.org.mx/unam-al-dia/la-unam-te-explica-que-son-las-nanoparticulas/>
- FAO. (2019). *GUÍA TEÓRICO-PRÁCTICA SOBRE EL BIOGÁS Y LOS BIODIGESTORES* (12). Recuperado de http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf
- Garrido-Hernández, A., Juárez-Rosas, K., Estrada-Martínez, R. J., Cerón-Montes, G. I., & Martínez-Valdez, F. J. (2020). Empleo de Nano-Ferritas en Bioreactor Anaerobio para la Producción Eficiente de Biogás. *Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 8(Especial), 19-23. Recuperado de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/6356>
- García, V. (2015). Manual de biogás. Conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos. *Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático*, 9. Recuperado de https://www.gba.gob.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf
- HANNA Instruments Colombia. (s. f.). *¿Qué es el pH?* Recuperado de <https://www.hannacolombia.com/blog/post/447/que-es-el-ph>
- IPCC. (2006). *Orientación general y generación de informes* (1). Recuperado de www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/1_Volume1/V1_1_Ch1_Introduction
- Kweinor Tetteh E, Rathilal S. (2020). Kinetics and Nanoparticle Catalytic Enhancement of Biogas Production from Wastewater Using a Magnetized Biochemical Methane Potential (MBMP) System. *Catalysts*. 10(10). Recuperate de <https://www.mdpi.com/2073-4344/10/10/1200>
- Lazaro, C. E., & Condori, J. J. (2021). *Desarrollo de un sistema automático de producción de biogás para la generación de energía eléctrica en el distrito de San Mateo – Chocna* (tesis de pregrado). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú.
- López, P. L. (2004). Población muestra y muestreo. *Punto cero*, 9(08), 69-74. Recuperado de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012

- Ministerio de Energía y Minas. (2020). *Balance Nacional de Energía del 2018*. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/balance-nacional-energia-2018>
- Ministerio del Ambiente. (2021). *Alrededor de 93 mil toneladas de residuos sólidos fueron valorizados en el 2020 a nivel nacional*. Noticias - Ministerio del Ambiente - Gobierno del Perú. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/487809-alrededor-de-93-mil-toneladas-de-residuos-solidos-fueron-valorizados-en-el-2020-a-nivel-nacional>
- MINERÍA, PNUD, FAO y GEF. (2011). *MANUAL DE BIOGÁS*. Recuperado de <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Montenegro, R. (2020). *Producción de biogás y bioabonos a partir de estiércol de bovino en biodigestor tubular en Naranjos* (tesis de pregrado). Universidad Nacional Toribio Rodríguez De Mendoza De Amazonas, Perú.
- Naturgy. (s. f.). *Gases renovables: Tecnologías, usos y beneficios*. [Archivo PDF]. Recuperado de <https://estaticos.naturgy.com/fundacion/B1-introduccion-biogas-scorm/curso/pdf/B1-introduccion-biogas.pdf>
- Organización latinoamericana de energía. (2020). *Panorama energético de América Latina y El Caribe 2018*. OLADE. Recuperado de <https://www.olade.org/publicaciones/panorama-energetico-de-america-latina-y-el-caribe-2018/>
- Reyes, L. (2023). *Diseño de Experimentos al Completo Aza*: Blogger. Recuperado de <http://reyesestadistica.blogspot.com/2011/07/disenio-de-experimentos-al-completo-azar.html>
- Rodríguez, H. (2023). *Propiedades del hierro (Fe)*: NATIONAL GEOGRAPHIC. Recuperado de https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-hierro-fe_18218
- Revisenergy. (2023). *Aumenta uso de leña en los hogares: una de cada 5 familias peruanas la empleó para cocinar en el 2021*. RevistaEnergía.pe. Recuperado de <https://revistaenergia.pe/aumenta-uso-de-lena-en-los-hogares-una-de-cada-5-familias-peruanas-la-empleo-para-cocinar-en-el-2021/>
- Servicio Nacional de meteorología e hidrología. (2020). *Mapa Climático del Perú*. Recuperado de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Significados. (2017). *Significado de concentración química*. Recuperado de <https://www.significados.com/concentracion-quimica/>

- Singh D., Malik K., Sindhu M., Kumari N., Rani V., Mehta S., ... Arya N. (2023). Biostimulation of Anaerobic Digestion Using Iron Oxide Nanoparticles (IONPs) for Increasing Biogas Production from Cattle Manure. *Nanomaterials*. 12(3). Recuperado de <https://www.mdpi.com/2079-4991/12/3/497>
- Spring, S., Kampfer, P., Ludwig, W. y Schleifer, KH (1996). Caracterización polifásica del género *Leptothrix*: nuevas descripciones de *Leptothrix mobilis* sp. Nov. y *Leptothrix discophora* sp. nov. nom. Rev. y descripción enmendada de *Leptothrix cholodnii* enmendar. *Microbiología sistemática y aplicada*, 19 (4), 634-643. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0723202096800361>
- Environmental Protection Agency. (2023). *El humo de la leña y su salud*. EPA. Recuperado de <https://espanol.epa.gov/espanol/el-humo-de-la-lena-y-su-salud>
- Universidad de Colima de México. (s. f.). *Diseño experimental*. Recuperado de https://recursos.ucol.mx/tesis/disen%C3%B3_experimental.php
- USEPA. (1993). Selecting Remediation Techniques for Contaminated Sediment, USEPA-823-B93-001. Office of Water (WH-585). USEPA (United States Environmental Protection Agency). Recuperado de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/20003Q0N.PDF?Dockkey=20003Q0N.PDF>
- World Biogas Association. (2019, 10 octubre). *Global Potential of Biogas*. World Biogas Association (WBA). <https://www.worldbiogasassociation.org/global-potential-of-biogas/>
- Zaidi A. A., Feng R., Malik A., Khan S. Z., Shi Y., Bhutta A. J., Shah A. H. (2019). Combining Microwave Pretreatment with Iron Oxide Nanoparticles Enhanced Biogas and Hydrogen Yield from Green Algae. *Processes*. 7(1), 24. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2227-9717/7/1/244>

ANEXOS

Anexo 1

Identificación del punto de muestreo



Anexo 2

Lodo natural con película de la bacteria del genero *Leptothrix*.



Anexo 3

Extracción de la muestra para el análisis de laboratorio



Anexo 4

Rotulado de la muestra para el envío a el laboratorio



Anexo 5

Resultados del análisis de laboratorio



SISTEMA DE SERVICIOS Y ANÁLISIS QUÍMICOS S.A.C. SLAB

INFORME DE ENSAYO IE-2023-0146

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : DIAZ GARCÍA WILMER LUIS
1.2 RUC o DNI : 71983042
1.3 Dirección : No Precisa

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1 Producto : SUELO Y/O OTROS (LODO)
2.2 Muestreado por : CLIENTE
2.3 Número de Muestras : 01
2.4 Fecha de Recepción : 2023-02-28
2.5 Período de Ensayo : 2023-03-02 al 2023-03-08

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
Determinación de Hierro	Absorción atómica

4. RESULTADOS

4.1. RESULTADOS OBTENIDOS

Descripción de Muestra (c): TA-01
LODO
250GR

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	Resultados
S-0383	Determinación de hierro	%	26.20

Nota: Resultado en muestra seca a 105°C

(*) Información suministrada por el cliente

KATHERINE
CORAL PERALTA
Ingeniera Química
CIP N° 276377

Jefe de Laboratorio

FIN DE DOCUMENTO

- Sin la aprobación del laboratorio Sistema de Servicios y Análisis Químicos S.A.C. no se debe reproducir el informe de ensayo parcial, excepto cuando se reproduce en su totalidad.
- Los resultados de los ensayos se aplican a la muestra como se recibió y no se deben usar como una declaración de conformidad con una especificación o normas de productos de la entidad que lo produce.
- El laboratorio no es responsable de la información que ha sido identificada como suministrada por el cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.

Anexo 6

Lodo natural sin reposar.



Anexo 7

Lodo natural reposado.



Anexo 8

Materiales usados para el experimento



Anexo 9

Pesado de la materia orgánica utilizada



Anexo 10

Pesado de la dosis de lodo natural



Anexo 11

Insumos agregados al biorreactor



Anexo 12

Medición del pH antes del inicio de la digestión anaeróbica



Anexo 13

Inicio del proceso de digestión anaeróbica



Anexo 14

Seguimiento de la producción de biogás



Anexo 15

Producción de biogás



Anexo 16

Prueba de combustión del tratamiento T3



Anexo 17

Prueba de combustión del tratamiento T2



Anexo 18

Prueba de combustión del tratamiento T1



Anexo 19

Prueba de combustión del testigo T0



Anexo 20

Datos de la producción de biogás

Día	Producción Diaria (ml)											
	T0			T1			T2			T3		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
1	130	90	90	200	150	150	140	150	170	150	170	160
2	150	—	110	220	180	180	170	200	240	170	250	260
3	160	—	130	300	210	230	280	300	360	230	410	460
4	—	—	—	520	360	350	510	580	690	310	660	810
5	—	—	—	1050	780	610	730	930	1320	350	820	980
6	—	—	—	1820	1300	1040	840	1030	1380	—	880	1030
7	—	—	—	2230	2160	1480	1020	1180	1400	—	1030	1130
8	—	—	—	2270	2450	1720	1090	1240	—	—	1050	1170
9	—	—	—	—	—	1800	1210	1260	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	1310	1280	—	—	—	—
11	—	—	—	—	—	—	1430	1290	—	—	—	—
Producción Diaria acumulada (ml)												
1	130	90	90	200	150	150	140	150	170	150	170	160
2	150	—	110	220	180	180	170	200	240	170	250	260
3	160	—	130	300	210	230	280	300	360	230	410	460
4	—	—	—	520	360	350	510	580	690	310	660	810
5	—	—	—	1050	780	610	730	930	1320	350	820	980
6	—	—	—	1820	1300	1040	840	1030	1380	—	880	1030
7	—	—	—	2230	2160	1480	1020	1180	1400	—	1030	1130
8	—	—	—	2270	2450	1720	1090	1240	—	—	1050	1170
9	—	—	—	—	—	1800	1210	1260	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	1310	1280	—	—	—	—
11	—	—	—	—	—	—	1430	1290	—	—	—	—