

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Química y Textil



TESIS

**"Optimización de la producción de biogás en un reactor
Tubular haciendo uso de nanopartículas de óxido de hierro"**

Para obtener el título de Ingeniero Químico.

Elaborado por

Karenina Ela Macazana López

 [0000-0002-6264-531X](https://orcid.org/0000-0002-6264-531X)

Asesor

MSc. Fredy Huayta Socantaype

 [0000-0002-3732-731X](https://orcid.org/0000-0002-3732-731X)

Asesora externa

PhD. María Esther Quintana Cáceda

 [0000-0002-2677-6179](https://orcid.org/0000-0002-2677-6179)

LIMA – PERÚ

2024

Macazana López (1)

K. Macazana López, "*Optimización de la producción de biogás en un reactor Tubular haciendo uso de nanopartículas de óxido de hierro*" (Tesis de pregrado). Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.

(Macazana, 2024)

Macazana, K. (2024). "*Optimización de la producción de biogás en un reactor Tubular haciendo uso de nanopartículas de óxido de hierro*". (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de ingeniería). Repositorio institucional Cybertesis UNI.

Dedicatoria

Este trabajo está dirigido al apoyo absoluto de mi familia, mis padres y hermanos. A mi

Poder Superior, siempre presente cada día de mi vida.

Agradecimientos

A mi asesor MSc. Fredy Huayta Socantaype y asesora externa la Dra. María Quintana Cáceda por su total apoyo, guía y dirección para que se concrete el presente trabajo de investigación.

A PROCENCIA, CONCYTEC Y SENCICO por el cofinanciamiento del PROYECTO 123 - 2018 - FONDECYT, mediante el cual se difundió este trabajo de investigación en la edición 49 del Congreso Mundial de Química de la IUPAC - 2023 en Países Bajos, en agosto del 2023.

A la Dra. Carmen Felipe por su generosa donación de excretas de cuy de su fundo Casa Blanca en Pachacámac; a la Ing. Sonia Hilaes por sus alcances en cuanto al diseño e instalación del biodigestor piloto; al Sr. Jaime Villa, compañeros del proyecto William Gómez y Rosa Flores, así mismo a todos los voluntarios que aportaron para la construcción del biodigestor piloto.

A la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería por el uso de todos los equipos disponibles de los laboratorios de Películas delgadas y del grupo de Investigación URPUNANO del Centro de Investigación de dicha facultad; por el otorgamiento del espacio donde se construyó el biodigestor piloto y también al Taller de esta facultad por su gran apoyo en cuestiones de materiales y trabajos manuales.

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como principal objetivo demostrar la optimización del proceso de digestión anaeróbica en un biorreactor piloto de lámina plástica fabricada a partir de policloruro de vinilo con 1m³ de capacidad, usando como sustrato excretas de *cavia porcellus* o cuy con nanopartículas de magnetita. Para ello, en primera instancia se sintetizaron las nanopartículas por el método de poliol logrando obtener un tamaño de 34.03nm. Seguidamente, se realizó el estudio a nivel laboratorio, la prueba de Actividad Metanogénica Específica (AME), con el fin de validar el porcentaje de biodegradabilidad del sustrato, este debe ser mayor a 60%; así mismo se observó cómo afecta las nanopartículas al adicionar a uno de los reactores en estudio. Los resultados obtenidos en porcentaje de biodegradabilidad fueron del 75.95% y se obtuvo 373.8ml de CH₄ con las nanopartículas y 231ml de CH₄ sin las nanopartículas, lo que se traduce en una eficiencia del 161.82% en la producción del CH₄ al adicionar las nanopartículas. Finalmente, en el estudio a nivel piloto, se adicionó como primera aproximación 18ppm de nanopartículas, con lo cual hubo un incremento en el % de CH₄ del 21.94%; luego se constató al agregar las nanopartículas de magnetita, un notable favorecimiento positivo en la cinética bioquímica de las bacterias debido a que en una menor cantidad de días, solo en 3 días, se llenó el gasómetro de 500L con una calidad de metano del 53.9% mayor a 44.2% de CH₄ que se obtuvo sin las nanopartículas de magnetita, cuyo tiempo de llenado del gasómetro fue de 8 días en promedio; y para concluir el presente estudio se hizo una proyección del incremento del % de CH₄ con la cantidad óptima de nanopartículas de magnetita (100ppm), dando como resultado un valor de 120.3%, lo cual resulta ser muy significativo .

Palabras clave – Digestión anaerobia, nanopartículas de magnetita, biomasa, biodigestor tubular.

Abstract

The main objective of this research work is to demonstrate the optimization of the anaerobic digestion process in a pilot bioreactor of plastic sheet manufactured from polyvinyl chloride with a capacity of 1m³, using as substrate excreta of *cavia porcellus* or guinea pig with magnetite nanoparticles. To do this, in the first instance, the nanoparticles were synthesized by the polyol method, achieving a size of 34.03nm. Next, the study was carried out at the laboratory level, the Specific Methanogenic Activity (SMA) test, in order to validate the percentage of biodegradability of the substrate, this must be greater than 60%; it was also observed how it affects nanoparticles when added to one of the reactors under study. The results obtained in percentage of biodegradability were 75.95% and 373.8ml of CH₄ was obtained with the nanoparticles and 231ml of CH₄ without the nanoparticles, which translates into an efficiency of 161.82% in the production of CH₄ when adding the nanoparticles. Finally, in the pilot study, 18ppm of nanoparticles was added as a first approximation, with which there was an increase in the % of CH₄ of 21.94%; then it was found that when the magnetite nanoparticles were added, a notable positive favoring in the biochemical kinetics of the bacteria was found because in a smaller number of days, only in 3 days, the 500L gasometer was filled with a methane quality of 53.9% higher than 44.2% of CH₄ that was obtained without the magnetite nanoparticles, whose gasometer filling time was 8 days on average; and to conclude the present study, a projection of the increase in the % of CH₄ was made with the optimal amount of magnetite nanoparticles (100ppm), resulting in a value of 120.3%, which turns out to be very significant.

Keywords – Anaerobic digestion, magnetite nanoparticles, biomass, tubular biodigester.

Tabla de contenido

Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Introducción.....	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo.....	1
1.1. Antecedentes referenciales.....	1
1.2. Planteamiento de la realidad problemática.....	3
1.3. Objetivo general.....	5
1.3.1. Objetivos específicos.....	6
1.4. Hipótesis general.....	6
1.4.1. Hipótesis específicas.....	6
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	7
2.1 Tecnologías en la obtención de energía no convencional.....	7
2.1.1 Aprovechamiento de biomasa para la producción de energía.....	7
2.1.2 Usos del biogás.....	10
2.2 Digestión anaerobia.....	13
2.2.1 Digestión anaerobia: Etapas.....	14
2.2.2 Factores que afectan la digestión anaerobia.....	18
2.3 Biodigestores.....	21
2.3.1 Tipos de biodigestores anaerobios.....	22
2.4 Biodigestor Tubular.....	24
2.4.1 Biodigestor tubular con plástico de invernadero.....	25
2.4.2 Biodigestor tubular prefabricado.....	26
2.4.3 Obtención de biogás usando el biodigestor tubular.....	28
2.4.4 Parámetros de diseño.....	30

2.5 Efecto de nanopartículas de Fe ₃ O ₄ en la digestión anaerobia.....	37
2.6 Marco legal.....	43
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación.....	46
3.1 Síntesis y caracterización de nanopartículas de óxido de hierro.....	46
3.1.1 Método de poliol.....	46
3.1.2 Caracterización de nanopartículas.....	47
3.2 Estudio de tres reactores -Test AME.....	47
3.3 Biodigestor piloto.....	50
3.3.1 Diseño del biodigestor.....	50
3.3.2 Carga inicial del biodigestor.....	52
3.3.3 Carga periódica del biodigestor.....	54
3.3.4 Monitoreo del biodigestor piloto.....	58
Capítulo IV. Análisis y Discusión de resultados.....	67
Conclusiones.....	69
Recomendaciones.....	71
Referencias Bibliográficas.....	72
Anexos.....	81

Tablas

	Pág.
Tabla 1: Requisitos en la remoción de componentes para el uso del biogás.....	10
Tabla 2: Datos del Biogás	13
Tabla 3: Reacciones totales en la etapa acidogénica.....	15
Tabla 4: Reacciones en la fase acetogénica.....	16
Tabla 5: Ecuaciones relacionadas al plástico de invernadero.....	26
Tabla 6: Longitudes del biodigestor tubular a partir de la medida de la circunferencia del plástico.....	26
Tabla 7: Comparación entre el estiércol de vaca y cerdo en la producción de biogás.....	29
Tabla 8: Equivalencias de 1m ³ de biogás.....	29
Tabla 9: Consumos de biogás por hora.....	30
Tabla 10: Cantidad de excretas por tipo de animal.....	31
Tabla 11: Cantidad de excretas disponibles.....	31
Tabla 12: Cantidad de agua en la mezcla.....	32
Tabla 13: Relación entre la Temperatura y el Tiempo de Retención	33
Tabla 14: Temperatura de trabajo de un biodigestor según ubicación	34
Tabla 15: Ecuaciones relacionadas al cálculo de volúmenes en un biodigestor.....	35
Tabla 16: Ecuaciones relacionadas a la zanja del biodigestor.....	36
Tabla 17: Parámetros de la zanja óptima del biodigestor.....	37
Tabla 18: Resultado de los volúmenes desplazados, volumen acumulado, biodegradabilidad y eficiencia.....	49
Tabla 19: Dimensiones de la zanja y del biodigestor.....	51
Tabla 20: Diseño de planta piloto y parámetros operacionales.....	51
Tabla 21: Desechos utilizados en la fermentación anaeróbicas existentes en el medio rural.....	53
Tabla 22: Volumen del líquido y de gas dentro del biorreactor.....	54
Tabla 23: Valores promedios de los parámetros medidos.....	59
Tabla 24: Caracterización del biogás sin nanopartículas de Fe ₃ O ₄ y luego de añadirlas.....	62
Tabla 25: Volumen de biogás y de CH ₄ obtenido.....	62
Tabla 26: Cantidad de días al llenar los 500L del gasómetro y calidad del biogás respecto al % CH ₄	63

Tabla 27: Proyección para hallar el incremento del % de CH₄ al adicionar la cantidad óptima de nanopartículas de Fe₃O₄ en el biodigestor.....64

Figuras

	Pág.
Figura 1: Diagrama convencional en bioprocesos.....	8
Figura 2: Configuración representativa para obtener biogás.....	12
Figura 3: Sistema de producción de biogás.....	12
Figura 4: Reacción química de materia orgánica o contaminantes por tratamiento biológico.....	14
Figura 5: Esquema global de la digestión anaerobia.....	17
Figura 6: Diagrama de la tasa de crecimiento metanogénico a diferentes temperaturas..	19
Figura 7: Digestor tubular.....	24
Figura 10: Reactor Tubular.....	27
Figura 11: Bosquejo del digestor prefabricado por CIDELSA.....	27
Figura 12: Diagrama de flujo.....	28
Figura 13: Zanja cavada para el reactor tubular.....	28
Figura 14: Esquema de la proporción de volúmenes en un biodigestor.....	35
Figura 15: Diagrama de la zanja trapezoidal.....	36
Figura 16: Comparación de la generación de biogás obtenido con nanopartículas de Fe_3O_4 , TMAOH y el control.....	39
Figura 17: Los iones de hierro penetran la célula y promueven la producción de enzimas clave y el crecimiento de microorganismos metanógenos.....	40
Figura 18: Esquema de cómo el material conductor sirve para facilitar la transferencia de electrones entre especies.....	42
Figura 19: Porcentajes de metano, dióxido de carbono e hidrógeno en la generación de biogás al añadir diferentes dosis de NPs de Fe_3O_4	43
Figura 20: Marco normativo RER.	44
Figura 21: Configuración de los 3 reactores.....	48
Figura 22: Monitoreo del Sistema.....	48
Figura 23: Gráfica Volumen acumulado de biogás vs días.....	49
Figura 24: Prueba del biodigestor dentro de la zanja y con el Tecnopor (protección térmica)	52
Figura 25: Instalación final del biodigestor.....	56
Figura 26: Carga de los 100L del inóculo.....	56
Figura 27: Carga de las excretas de cuy.....	57

Figura 28: Biodigestor tubular operativo.....	57
Figura 29: Adición de las nanopartículas de Fe ₃ O ₄ en el biodigestor piloto.....	58
Figura 30: Comportamiento del pH durante los 30 días de monitoreo.....	60
Figura 31: Temperaturas promedio registradas durante los 30 días de monitoreo.....	60
Figura 32: Relación entre la temperatura promedio del invernadero con la presión manométrica promedio del biogás.....	61
Figura 33: Cantidad de días en llenar un volumen de 500L de biogás y volumen total acumulado del biogás hasta el término del monitoreo.....	62
Figura 34: CH ₄ por cada 500L de biogás y el total acumulado hasta el término del monitoreo.....	63
Figura 35: Cantidad de días en llenar el gasómetro y calidad del biogás al adicionar las nanopartículas de Fe ₃ O ₄	63
Figura 36: Extrapolación para hallar el incremento del % de CH ₄ con la cantidad óptima de nanopartículas de Fe ₃ O ₄	65
Figura 37: Monitoreo de la temperatura del líquido.....	65
Figura 38: Monitoreo de la presión manométrica.....	65
Figura 39: Monitoreo de las temperaturas dentro y fuera del invernadero.....	66
Figura 40: Gasómetro de 500L en su máxima capacidad.....	66

Introducción

En el marco de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que adoptó la ONU en el 2015 para lograr un desarrollo sostenible y equitativo para el 2030; se citará en particular el objetivo global número 7: “Energía asequible y no contaminante”.

El Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD,2024) sostiene que a medida que crece la población mundial también crece la demanda a tener energía al alcance. Además, hace énfasis en la dependencia de combustibles fósiles, lo cual sigue dañando nuestro planeta. Por lo tanto, es imperativo la inversión en otras energías más limpias tal como lo puede ser la de biomasa. También encontramos cifras alarmantes, tales como 2.8 mil millones de personas a nivel global, aún hacen uso de combustibles letales para su salud al cocinar. Por último, nos indica que el 73% de gases de efecto invernadero son producidos por actividad humana y corresponde al mayor porcentaje de afectación al cambio climático.

En el contexto local, el Perú cuenta con marcos regulatorios para energías renovables desde el 2013, que hoy en día han logrado ciertos avances destacables en la energía producida por la biomasa, muy aparte de las ya conocidas centrales de biomasa más importantes del país que se ubican solamente en Lima, es el caso de Arequipa.

En esta región del sur, Peña (2024) nos informa que actualmente cuentan con 139 biodigestores e incluso tienen una tecnología creada para obtener un biometano con una calidad del 92%; pese a estos incipientes avances no se tiene actualmente una legislación relacionada para comercializar biometano y continuar masificando esta tecnología de biodigestores a regiones del centro, norte y sur del país.

Por otro lado, Coelho (2024) hace énfasis en destacar a la energía producida por la biomasa y al biogás como únicas fuentes renovables capaces de generar energía de base, que son previsibles y suministran energía las 24 horas del día, los 365 días del año.

Por todo lo expuesto: la optimización de biodigestores del tipo tubulares para biogás es una alternativa importante, impactando especialmente en zonas rurales.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Antecedentes referenciales

Durante la Segunda Guerra Mundial el metano tuvo una gran importancia por falta de combustibles, pero una vez terminada la guerra también cesó el funcionamiento de las instalaciones que producían metano, porque los combustibles fósiles estaban disponibles. No obstante, a inicios de la década de 1960, la tecnología para producir biogás con las excretas de vaca avanzó significativamente en la India, con el fin de lograr un doble uso de energía y producción de biofertilizante. En China, a principios de la década de 1970, se promovió la construcción de digestores en el marco de programas nacionales (Varnero, 2011).

La tecnología bioambiental tiene una historia diferente en los países industrializados, donde el desarrollo tiene una motivación más ambiental que puramente energética, que es el método clásico para estabilizar los lodos activados en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. En la década de 1980 recobró cierta importancia como forma de valorización energética en la agricultura y explotaciones agroindustriales. Sin embargo, con la caída de los precios del petróleo a fines de la década de 1980, el interés en las tecnologías de digestión anaeróbica volvió a disminuir, aunque algunos países industrializados tenían planes importantes para desarrollar plantas anaeróbicas a escala industrial e introducirlas a nivel nacional. El biogás se utiliza hoy en día como fuente de combustible en la industria y los hogares de todo el mundo. Su extracción ayuda a un mayor desarrollo económico y proporciona una alternativa de energía renovable al carbón y al petróleo (Varnero, 2011).

Actualmente el 90% de las necesidades energéticas de nuestro planeta son satisfechas con la utilización de combustibles fósiles (Campos, 2000).

En el panorama mundial de los últimos años, vemos que China es uno de los países que tiene un uso excesivo de combustibles fósiles, debido a su extensa población. Así que desarrollar nuevos recursos y aprovechar al máximo la energía sostenible se ha vuelto inminente. Los lodos no solo son un desperdicio municipal común sino también un recurso descuidado. En China, la producción anual de lodo seco es de 11.2 millones de toneladas, mientras que la tasa de eliminación inofensiva de lodo es de solo 25.1%, y 80% de lodo se vierte sin el tratamiento estable necesario (Zhang et al., 2019). Los métodos de gestión de reutilización de lodos, inocuidad y reducción han atraído la atención particular de gobiernos y académicos en todo el mundo. En este sentido, el gobierno chino ha construido grandes plantas industriales de tratamiento anaeróbico para la obtención de biogás. Además, los estudios para mejorar la producción de biogás en el proceso de digestión anaerobia cada vez muestran mayor aplicación a nivel industrial (Y. Li., et al 2019).

Considerando los aportes de Zhang et al. (2019) sobre la digestión anaeróbica mesofílica de lodo residual mejorada con la adición de nanopartículas de Fe y Fe_3O_4 y su posterior análisis cinético, los estudios han demostrado que cuando estas nanopartículas están en solución, los cationes Fe^{2+} y Fe^{3+} están presentes, así es como estos últimos otorgan propiedades electrónicas a microorganismos clave en un sistema de digestión anaeróbica. Las nanopartículas de hierro como materiales funcionales promueven eficazmente el proceso de fermentación anaeróbica y la producción de biogás. El proceso de digestión anaerobia fue evaluado por el rendimiento de los reactores, incluidos el pH, los rendimientos y las composiciones de biogás, así como la relación de eliminación de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y demanda química de oxígeno soluble (DQO) (Zhang et al., 2019).

El efecto positivo de Fe^{2+} sobre la metanogénesis se reconoce ya que las nanopartículas de Fe_3O_4 (NPs Fe_3O_4) aumentaron la actividad metanogénica, asociada con la degradación orgánica acelerada. También se ha demostrado que las NPs Fe_3O_4 avanza la producción de metano al promover la transferencia directa de electrones entre especies (DIET) en la metanogénesis (H. Li et al., 2018).

Respecto al contexto local, la Universidad Católica Santa María (UCSM, 2018) menciona que, en el Perú se ha impulsado el uso de biogás desde el 2015, logrando producir el equivalente a 10 mil litros de petróleo diarios. Aunque hay limitaciones tecnológicas, esta misma casa de estudios lidera en el impulso de esta industria a nivel nacional; ya que en el 2016 un equipo de investigadores de la Universidad Católica Santa María desarrolló un sistema tecnológico para operar una planta de producción de biometano con estiércol de vaca y cerdos. El combustible presurizado permitió el funcionamiento de un caldero, un motocultivador, un tractor y un automóvil en Fundo de la Católica en la irrigación Majes. La planta, ensamblada en la India, fue trasladada por la empresa Biogas Development & Training Center New Delhi a Majes, financiada por la Universidad y el PNIA. El resultado en la composición del biogás que se obtuvo fue: 85% de CH_4 , 9% de CO_2 y 7,2% de O_2 .

1.2 Planteamiento de la realidad problemática

Según Osinergmin (2019), indica que los efectos del cambio climático están impulsando a los países a cambiar su forma de producir energía, optando por fuentes limpias como la eólica, solar y provenientes de la biomasa. En Latinoamérica, la producción eléctrica es mayoritariamente limpia, con un enfoque en recursos hídricos y gas natural. En el caso de nuestro país, gran parte de la energía proviene de hidroeléctricas y centrales térmicas a gas, con un creciente uso de energías renovables no convencionales. A pesar de esto, existe un concepto erróneo de que estas energías no

convencionales no son viables en países como el nuestro.

Además, Osinergmin (2019) acota “Sin embargo, basta revisar nuestra matriz de energía primaria para constatar que el 47% de la energía proviene del petróleo.” (p.12). Por lo tanto, la electrificación de la matriz energética peruana con fuentes limpias es clave para reducir la contaminación y los efectos adversos en la salud y la economía. Además, el sector eléctrico enfrenta desafíos como llevar energía a zonas rurales, garantizar suministro para el crecimiento económico, satisfacer la demanda de electrificación en actividades como el transporte basado en petróleo, y hacerlo con mínimo impacto ambiental. Estas medidas son fundamentales para enfrentar los retos actuales y futuros en el sistema eléctrico nacional. (Osinergmin, 2019).

Ante esta problemática, se plantea el enfoque en la optimización de la energía limpia proveniente de la biomasa, debido a que en nuestro país no se le está dando el énfasis respectivo si lo comparamos con otras energías limpias, tales como la solar y eólica. De esta manera se aprovechará todos los diversos residuos orgánicos mediante el proceso de fermentación de la digestión anaeróbica.

Para comprender mejor sobre este proceso Castells et al. (2012), explica que los microorganismos anaerobios convierten materia orgánica en biomasa celular, compuestos inorgánicos y gases, siendo el metano el más significativo. Este proceso llamado digestión anaerobia, se realiza en condiciones controladas y es relevante para la gestión de residuos orgánicos y la valorización energética.

La digestión anaeróbica es una tecnología sostenible y rentable para el tratamiento de residuos y la producción de biocombustible. Esta técnica no solo reduce residuos, sino que también genera biogás, una energía limpia que puede reemplazar combustibles fósiles. Además, los digestatos son ricos en nutrientes, sirviendo como fertilizante. Mejorar la producción de metano a partir de residuos permite obtener más energía y compensar la

deficiencia de energía no renovable. (Y. Li., et al 2019).

Así mismo Y. Li., et al. (2019), señala que el metano es una fuente de energía renovable con potencial para generar energía eléctrica y térmica. La eficiencia en su producción a partir de diversos sustratos es crucial para maximizar la recuperación de energía en la digestión anaeróbica. Este proceso se beneficia del uso de energía térmica para regular la temperatura, mejorando así la actividad microbiana y reduciendo el consumo energético. La digestión anaeróbica, con menores costos de inversión y gestión, se considera la mejor opción para la generación de energía, promoviendo un uso circular de recursos.

En este sentido, esta investigación se enfoca en la optimización de la producción de metano con nanopartículas de hierro, las cuales ya han sido estudiadas en la fermentación anaeróbica y se han obtenido resultados favorables, de manera que mediante el diseño de un biorreactor a nivel piloto produzca de manera eficiente biogás.

Se optó por un reactor del tipo tubular ya que tiene un gran porcentaje de aceptación comparado con otros tipos de reactores anaeróbicos. También porque este tipo de biodigestor tiene ventajas como materiales económicos, fácil mantenimiento, tamaño variable y vida útil de 10 a 15 años. Sin embargo, presenta desventajas como presión variable de biogás y limitación a materia orgánica. (Cairampoma, 2017).

Por lo tanto, se plantea el principal problema, ¿Será posible optimizar la producción de biogás en un reactor tubular haciendo uso de nanopartículas de óxido de hierro III?

1.3 Objetivo General

Evaluar la producción de biogás en un reactor tubular haciendo uso de las nanopartículas de óxido de hierro III.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Determinar el método más accesible para sintetizar las nanopartículas de hierro; así mismo caracterizar las nanopartículas por DLS (Dispersión de luz dinámica).
- Evaluar el efecto de las nanopartículas de hierro a escala laboratorio mediante las pruebas batch o prueba AME (Actividad Metanogénica Específica).
- Calcular el incremento al generarse biogás en un reactor piloto, al adicionar los nanocompuestos de hierro III.
- Evaluar los parámetros que garanticen la estabilidad de la fermentación anaeróbica a nivel piloto.
- Evaluar los parámetros operacionales del reactor piloto para la obtención de biogás.

1.4 Hipótesis General

Se optimiza la generación de biogás en un reactor a nivel piloto del tipo tubular haciendo uso de las nanopartículas de óxido de hierro III.

1.4.1 Hipótesis específicas

- Se determina el método de síntesis de las nanopartículas de hierro más accesible, además se caracterizan por DLS (Dispersión de Luz dinámica)
- Se evalúa el efecto al agregar las nanopartículas a escala laboratorio mediante las pruebas batch (Actividad Metanogénica Específica).
- Se calcula el incremento de la generación de biogás en un reactor piloto, al adicionar los nanocompuestos de hierro III.
- Se evalúa los parámetros para garantizar la estabilidad de la fermentación anaeróbica a nivel piloto.
- Se evalúa los parámetros operacionales del biodigestor para la producción de biogás.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Tecnologías en la obtención de energía no convencional

El sector energético es crucial para la economía de un país, ya que permite la producción de bienes y servicios, sosteniendo el crecimiento económico y mejorando la productividad mediante energía accesible. (Osinergmin, 2017).

Además, Osinergmin (2017) menciona que el sector energético mundial atraviesa una transición hacia un suministro eléctrico competitivo y fiable. La última década ha visto la reducción de costos en tecnologías renovables, el descubrimiento de gas natural y avances tecnológicos, permitiendo a varios países descarbonizar, aumentar la seguridad energética y disminuir la dependencia de combustibles importados.

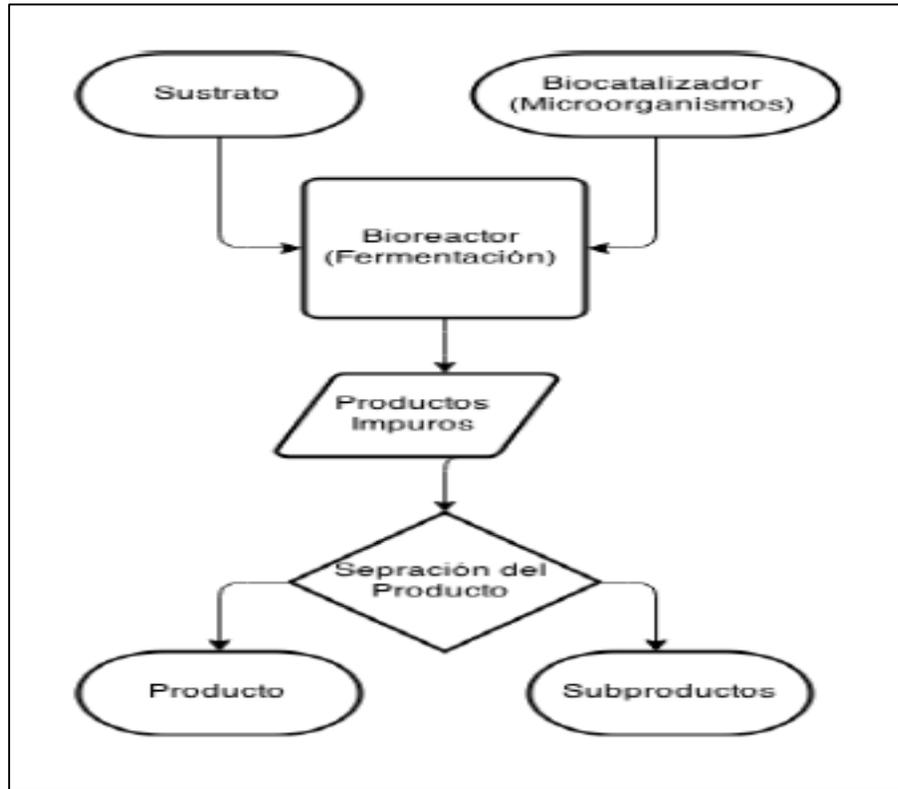
De este modo, desarrollar nuevos recursos y aprovechar al máximo la energía sostenible se ha vuelto inminente en la población humana. Es necesario encontrar vías alternas a la producción de energía convencional y empezar a tomar conciencia en la producción energética considerando el impacto ambiental que esta generará. Nuevas fuentes de energía renovable han hecho que se desarrolle nuevas tecnologías para la producción de energía no convencional en el mundo, por ejemplo: la energía solar, la energía eólica, la energía geotérmica, la energía hidroeléctrica y la energía de la biomasa (Alrikabi, 2014). Siendo esta última el objetivo de desarrollo de la presente tesis.

2.1.1 Aprovechamiento de biomasa en bioprocesos para la producción de energía

Es llamado bioproceso, cualquier proceso donde se interviene el uso de células vivas completas o sus componentes (enzimas, cloroplastos, proteínas, etc.) para obtener los cambios físicos o químicos deseados (Doran, 1995).

Figura 1

Diagrama convencional en bioprocesos.



Nota: Fuente, Doran (2015).

La biomasa se refiere a materia orgánica de origen biológico reciente, incluyendo productos vegetales y animales, así como sus desechos metabólicos como el estiércol. (Salinas & Gasca, 2009).

La energía producida por la biomasa es llamada bioenergía, esta energía también está disponible en forma de residuos biodegradables, que es el componente rechazado de la biomasa disponible. La biomasa es la segunda, después de la energía hidroeléctrica, fuente líder en la producción de energía renovable (Jangid & Sabir, 2017).

La bioenergía puede contribuir de manera importante a sustituir las fuentes de energía fósil y nuclear (Islas & Martínez, 2010). Los tipos de bioenergía disponible en la actualidad son:

i. Biocombustibles.

Son combustibles provenientes de la biomasa. El concepto de biomasa incluye productos de origen vegetal y animal, aceptándose como energéticos y materias primas renovables. Quedan excluidos los combustibles fósiles y productos orgánicos derivados, a pesar de su origen biológico en épocas remotas. (Salinas & Gasca, 2009).

Los biocombustibles incluyen leña, residuos forestales y desechos agrícolas. Se utilizan en cocción, calentamiento, producción de electricidad y gas de pirólisis para motores de combustión interna (Islas & Martínez, 2010).

Se puede contar con diferentes métodos para obtener biocombustibles, los cuales son: procesos mecánicos (astillado, trituración y compactación), termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación), biotecnológicos (micro bacterianos y enzimáticos) y extractivos para obtener combustibles líquidos, sólidos y gaseosos (Salinas & Gasca, 2009).

ii. Biocarburantes:

Los biocarburantes según indica Islas y Martínez (2010), son el bioetanol, aceites vegetales puros, aceites vegetales y residuos de aceite de cocina convertidos en biodiésel, estos se utilizan en motores y generadores para producir electricidad, calor y trabajo mecánico.

Estos energéticos líquidos actualmente provienen de una amplia variedad de cultivos como caña de azúcar, maíz, betabel, colza, soya y palma de aceite, entre otros, pero en un futuro próximo provendrán de otros cultivos no comestibles como la higuera, la jatropha, así como de residuos agroindustriales (Islas & Martínez, 2010).

iii. Biogás:

El biogás es un gas que se genera en medios naturales o en dispositivos específicos, por las reacciones de biodegradación de materia orgánica, mediante la acción de microorganismos (bacterias metanogénicas, etc.) en ausencia de oxígeno.

El biogás, es el principal producto derivado de la fermentación de residuos orgánicos y basura en los rellenos sanitarios, se utiliza para generar energía térmica, mecánica o eléctrica. Además, el hidrógeno se obtiene de residuos orgánicos o procesos fotobiológicos, siendo otro combustible gaseoso valioso. (Islas & Martínez, 2010).

2.1.2 Usos del biogás

Gabriel y Sierra (2017), mencionan que el biogás es una fuente de energía renovable con múltiples aplicaciones, incluyendo la generación de electricidad, calor y biocombustibles para vehículos. Para su uso, es necesario purificar el biogás mediante diferentes etapas que eliminen impurezas. Existen diversas tecnologías, tanto físico-químicas como biológicas, para este proceso, y el método de acondicionamiento depende de las características iniciales del biogás y su destino final. Por lo que se deben considerar los parámetros que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1

Requisitos en la remoción de componentes para el uso del biogás.

APLICACIÓN	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O
Calentador (a gas)	<1000 ppm	NO	NO
Cocina	SI	NO	NO
Motor	<1000 ppm	NO	Evitar condensación
Combustible vehicular	SI	SI (Recomendado)	SI
Línea de gas (gasoducto)	SI	SI	SI

Nota: Fuente. (Wellinger & Lindberg, 2000).

i. Energía calorífica o térmica.

Varnero (2011), señala que una de las formas más simples de usar el biogás es para generar energía térmica, especialmente en áreas con escasez de combustibles. Los sistemas de biogás de pequeña escala pueden proporcionar energía para cocinar, calentar agua e incluso para iluminación.

Los quemadores de gas convencionales pueden adaptarse para usar biogás al ajustar la relación aire-gas. Los requisitos de calidad del biogás para estos quemadores son bajos, siendo necesario alcanzar una presión de 8 a 25mbar mantener los niveles de H₂S por debajo de 100ppm para lograr un punto de rocío de 150°C. (Varnero, 2011).

ii. Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad.

En este punto Wellinger y Lindberg (2000), refieren que una aplicación destacada para la generación de electricidad es el uso de turbinas de gas, que son tan eficientes como los motores de combustión interna y muy robustas. Estas turbinas permiten recuperar calor en forma de vapor valioso, aunque actualmente solo están disponibles para escalas superiores a 800Kw, y sus requerimientos de gas son similares a los de los motores de cogeneración.

iii. Combustible vehicular.

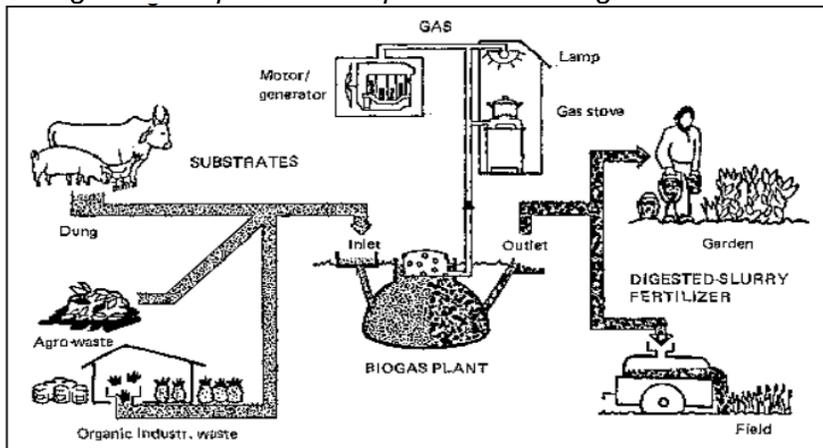
El biogás se puede utilizar como combustible para vehículos, empleando la misma motorización y configuración que el gas natural. Actualmente, hay más de 1 millón de vehículos a gas natural en el mundo, lo que indica que no hay problemas con la adaptación para el uso del biogás. No obstante, es necesario mejorar la calidad del biogás bruto proveniente de digestores o vertederos para cumplir con las

exigencias de calidad (Wellinger & Lindberg, 2000).

Además, Wellinger y Lindberg (2000) hacen mención que el gas destinado a vehículos debe tener un contenido de metano superior al 95% en volumen, por lo que es necesario eliminar el dióxido de carbono, el sulfuro de hidrógeno, el amoníaco y el agua, entre otros componentes traza. Así mismo, las especificaciones de calidad para el biogás y el gas natural como combustible vehicular varían según cada país.

Figura 2

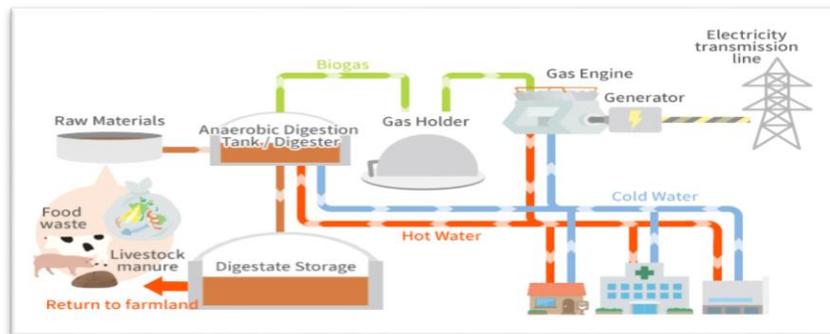
Configuración representativa para obtener biogás.



Nota: Fuente, OEKOTOP.

Figura 3

Sistema de producción de biogás.



Nota: Fuente, Iwatec.

Tabla 2*Datos del Biogás*

DATOS DE LA GUÍA DE BIOGÁS	
Temperatura de digestión adecuada:	20 - 25°C
Tiempo de Retención:	40 - 100 días
Contenido energético del biogás:	6 kWh / m ³ = 0.61 combustible diésel
Generación de biogás:	0.3 - 0.5 m ³ gas / m ³ volumen del digestor x día
Rendimiento de 1 vaca:	9 - 15 kg estiércol / día = 0.4 m ³ gas / día
Rendimiento de 1 cerdo:	2 - 3 kg de estiércol / día = 0.15 m ³ gas / día
Requerimiento de gas para cocinar:	0.1 - 0.3 m ³ / persona
Para 1 lámpara:	0.1 - 0.15 m ³ / h
Para motores:	0.6 m ³ / kWh

Nota: Fuente. Werner U., Stohr U., Hees N. (1989). Biogas plants in animal husbandry.

2.2 Digestión anaerobia

Varnero (2011), nombra que la digestión anaeróbica es un proceso biológico que transforma residuos orgánicos en biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, mediante bacterias que no requieren oxígeno. Este proceso permite convertir residuos de diversas industrias, como la alimentaria y papelera, en subproductos útiles. Más del 90% de la energía disponible se convierte en metano, utilizando solo un 10% para el crecimiento bacteriano, en contraste con el 50% en sistemas aeróbicos.

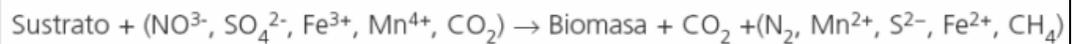
Mientras que Chernicaró (2007), se refiere a la digestión anaeróbica como un sistema ecológico equilibrado donde diversas poblaciones de microorganismos desempeñan funciones específicas. En el cual este proceso se divide en dos fases: En la primera, bacterias convierten componentes orgánicos complejos en materiales más simples, como ácidos grasos volátiles y gases. En la segunda, metanógenos transforman ácidos orgánicos y hidrógeno en metano y dióxido de carbono, dependiendo del sustrato de los microorganismos que producen los ácidos.

Además, Varnero (2011) agrega que la digestión anaeróbica es un proceso complejo que involucra múltiples reacciones bioquímicas y microorganismos. Se divide en cuatro etapas: hidrólisis, acidogénica, acetogénica y metanogénica, que ocurren simultáneamente durante la descomposición de materia orgánica.

Figura 4

Reacción química de materia orgánica o contaminantes por tratamiento biológico.

Degradación anaerobia:



Nota: Fuente, Marloto y Rogel, 2004.

2.2.1 Digestión anaerobia: etapas

i. Hidrólisis.

Cualquier sustrato orgánico biodegradable se compone de carbohidratos, proteínas y lípidos. Durante la hidrólisis, las bacterias fermentativas transforman estas macromoléculas en moléculas solubles como azúcares, péptidos y ácidos grasos (Sanders y Angelidaki, 2004)

Los polisacáridos al ser hidrolizados producen azúcares más simples mediante la acción de las celulasas, pectinasas y amilasas, según sea la glucosa, pectina o almidón el polímero que esté disponible para la hidrolización (Koster, 1984).

También es importante mencionar que la etapa hidrolítica es la etapa que limita la velocidad global del proceso, sobre todo en residuos con alto contenido de sólidos, puesto que se requiere que se desarrolle el ataque enzimático sobre el sustrato para que se liberen los compuestos orgánicos que las poblaciones microbianas pueden descomponer (Veeken et al., 1999).

ii. Acidogénesis.

En esta segunda etapa, Martí (2019) hace mención que los productos de la hidrólisis (azúcares, ácidos grasos y aminoácidos) se convierten en otros ácidos, H₂ y CO₂. Y parte de estos ácidos, que son los ácidos grasos volátiles se convierten también en H₂ y CO₂.

De acuerdo con la ruta metabólica utilizada durante la fermentación también se pueden generar compuestos orgánicos más reducidos como ácido láctico, etanol, ácido propiónico, ácido butírico, ácido valérico entre otros, los cuales deben ser oxidados por las bacterias acetogénicas en una etapa posterior antes de que puedan ser aprovechadas por los microorganismos metanógenos (Madigan et al., 1999).

Tabla 3

Reacciones totales en la etapa acidogénica.

a.	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O + 4ADP + 4P \rightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2 + 4ATP$
b.	$C_6H_{12}O_6 + 3ADP + P \rightarrow CH_3COOH + CH_3CH_2COOH + CO_2 + H_2 + 3ATP$
c.	$C_4H_6ON + 0.114HCO_3^- + 1.478H_2O \rightarrow 0.247C_5H_7O_2N + 0.3CH_3COO^-$ $+ 0.28CH_3CH_2COO^- + 0.286CH_3(CH_2)_2COO^- + 0.753NH_4^+ + 0.298CO_2$ $\Delta G^0 = -37.1 \text{ kJ/mol}$
d.	$CH_3(CH_2)_{14}COO^- + 14H_2O \rightarrow 8CH_3COO^- + 7H^+ + 14H_2 \quad \Delta G^0 = -345.6 \text{ kJ/mol}$

Nota: Fuente. Pavlostathis, S.; Giraldo-Gómez, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment: a critical review.

iii. Acetogénesis:

En este subproceso se realiza la conversión química de los productos de la acidogénesis mediante dos mecanismos de reacción: la acetogénesis acetoclástica y la homoacetogénesis hidrogenotrófica (Pavlostathis & Giraldo-

Gómez, 1991).

El primer mecanismo el que realiza la transformación de algunos metabolitos como valerato, butirato y propionato en acetato e hidrógeno para que sean utilizados posteriormente por los microorganismos metanogénicos (Schink, 1994; Monroy 1998).

Mientras el segundo mecanismo de reacción consiste en sintetizar acetato con el consumo de hidrógeno y dióxido de carbono (Schink, 1994).

Las reacciones acetogénicas requieren la adición de energía, lo cual implica la interacción entre las poblaciones de microorganismos acetogénicos y los microorganismos que consumen hidrógeno (Stams,1994).

Tabla 4

Reacciones en la fase acetogénica

Reacción de ácidos grasos	ΔG (kJ)
$\text{Propionato} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Acetato} + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ + 3\text{H}_2$	+76.1
$\text{Butirato} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Acetato} + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$	+48.1
$\text{Valerato} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Acetato} + 2\text{H}^+ + 4\text{H}_2$	+48.1

Nota: Fuente. Stams A. (1994). Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogenic environments.

iv. Metanogénesis:

Como etapa final de la digestión anaeróbica, Varnero (2011) refiere que las bacterias metanogénicas que pertenecen al género Archea son las encargadas de la producción de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H_2 , CO_2 , formato, metanol y algunas metilaminas.

Todos estos microorganismos son anaeróbicos estrictos, presentando una tasa de crecimiento menor que del resto de microorganismos implicados en la digestión (Valle et al., 2010).

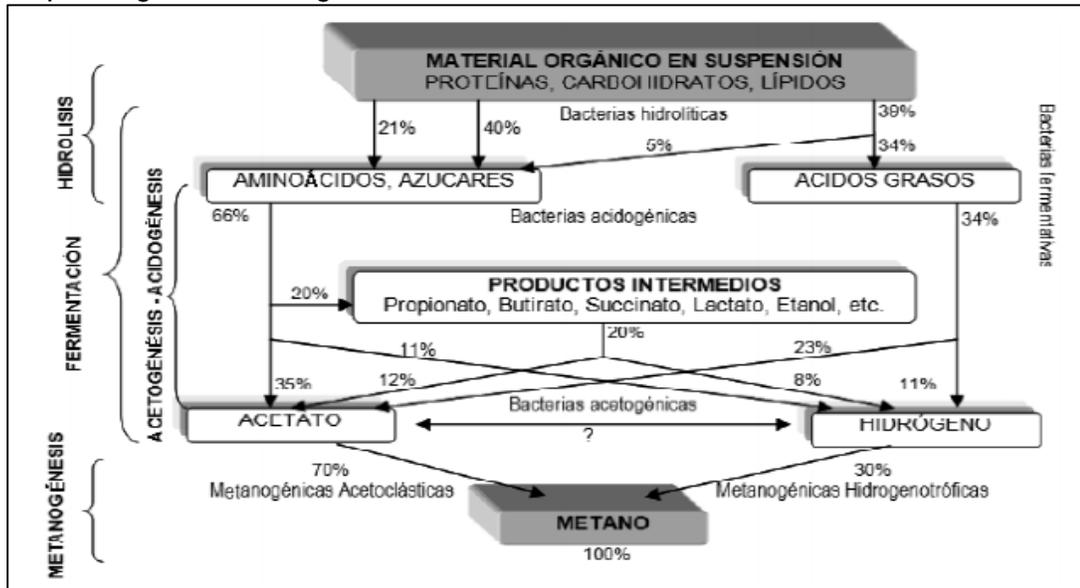
Las arqueobacterias pueden clasificarse, según el sustrato que utilizan en dos grupos: hidrogenofílicas y acetoclásticas (Monroy, 1998)

Las metanogénicas hidrogenofílicas utilizan el hidrógeno y el dióxido de carbono, permitiendo disminuir la presión parcial de hidrógeno, y producen aproximadamente un 30% del metano (Ferry, 1992).

Por otro lado, las acetoclásticas producen el 70% restante a partir de acetato, por parte de los microorganismos tales como la *Methanosarcina*, *Metanosaeta* o *Metanotrix*, siendo el principal grupo *Methanosarcina Barkeri* (Ferguson & Mah, 1987).

Figura 5

Esquema global de la digestión anaerobia.



Nota: Adaptado de Van Haandel y Lettinga, 1964; Metcalf y Eddy 2003; Rojas, 1987.

2.2.2 Factores que afectan la digestión anaerobia

Los microorganismos metanogénicos son altamente sensibles a los cambios en las condiciones ambientales en consecuencia, la etapa metanogénica se considera un paso limitante de todo el proceso; por ello la biotecnología anaeróbica pone mucho cuidado en el monitoreo de las condiciones ambientales (Varnero, 2011).

El análisis termodinámico de este proceso biológico permite conocer los requerimientos energéticos de las reacciones y la dirección de estas de acuerdo al criterio de energía libre (Ward et al., 2008).

Por otro lado, el análisis cinético de las reacciones bioquímicas permite establecer la influencia de los parámetros fisicoquímicos sobre el desempeño global del proceso (Siles et al., 2010).

Seguidamente se presentan los factores que ejercen mayor influencia sobre el desempeño de un sistema anaeróbico (Molnar & Bartha, 1989).

i. Temperatura.

Durante el desarrollo de la fermentación anaeróbica, es la temperatura el parámetro fisicoquímico que incide de manera notable.

Varnero (2011), indica que la velocidad de reacción de los procesos biológicos depende de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados y éstos, a su vez, dependen de la temperatura. Por lo cual, si aumenta la temperatura, aumenta también la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, y en consecuencia se obtendrá mayores cantidades de biogás.

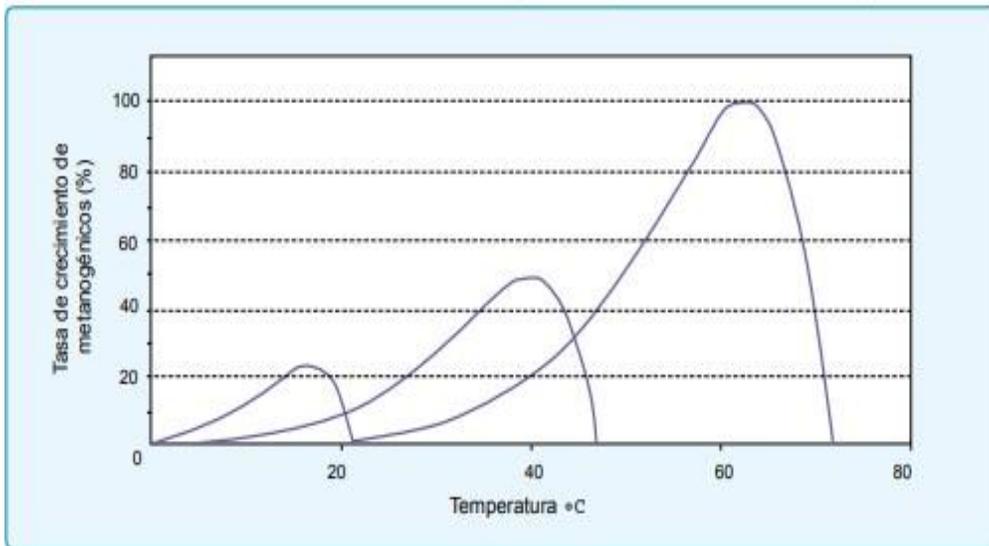
Existen tres rangos de temperatura establecidos para el desarrollo del proceso; psicrófilico (<25°C), mesófilico (entre 25°C y 45°C) y termófilico (>45°C)

(El-Mashad et al., 2004).

Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación (Chernicaró, 2007).

Figura 6

Diagrama de la tasa de crecimiento metanogénico a diferentes temperaturas.



Nota: Fuente. Chernicaró, C. (2007). Biological Wastewater Treatment Serie. Vol 4 Anaerobic Reactors.

ii. pH.

Varnero (2011) hace mención que, para que se desarrolle satisfactoriamente la digestión anaeróbica el pH no debe ser mayor a 8.0 ni debe bajar de 6.0, esto debido a que se debe recordar que el pH es el que determinará la cantidad y composición del biogás.

Los microorganismos dentro de la digestión anaerobia prefieren estar en condiciones con pH entre 6.5 – 7.5 (7.0 valor neutro del pH), también se sabe que bacterias que realizan la etapa de la acidogénesis y acetogénesis se desarrollan

mejor en pH 5.5 y 6.5, mientras que las metanogénicas lo hacen en un rango de 7.8 a 8.2 (Martí, 2019).

iii. Nutrientes.

En el proceso de digestión anaerobia, la biomasa celular responsable del desarrollo del mismo requiere una serie de nutrientes minerales, así mismo de una fuente de carbono y una fuente de energía para su correcto desarrollo (Prescott et al., 2002).

Los nutrientes más importantes en un sistema anaeróbico son carbono, nitrógeno, azufre, fósforo, hierro, cobalto, níquel, molibdeno, selenio entre otros; estos normalmente se encuentran en los sustratos orgánicos biodegradables en cantidades superiores a las necesarias para cubrir los requerimientos de las diversas poblaciones bacterianas (Baumann & Müller, 1997).

iv. Razón de carga orgánica (RCO).

Tanto el carbono como el nitrógeno son fundamentales para la alimentación de las bacterias metanogénicas, ya que el carbono les provee energía y el nitrógeno permite que generen nuevas células, según ello los metanógenos consumen carbono y nitrógeno en una proporción de 30 a 1, es así que se considera una relación óptima de estos dos elementos de 30:1 hasta 20:1 en el sustrato usado como materia prima (Varnero, 2011).

Martí (2019) nos comenta que, este factor tiene una debilidad y es que no nos menciona a ciencia cierta si el carbono está disponible o no para las bacterias, un ejemplo es el carbono presente en fibras (lignina) o también trozos de plástico presentes en el sustrato; también refiere que en los estiércoles comunes, este factor no es un problema, pero si es crucial saber que a mayor cantidad de nitrógeno en un sustrato, los microorganismos pueden inhibirse y dejar de

desarrollarse adecuadamente pero este fenómeno es muy raro que ocurra con estiércoles de granja.

v. Tiempo de retención hidráulica:

Cendales (2011) explica que el tiempo de retención hidráulica indica el tiempo promedio de la alimentación líquida dentro de un digestor anaeróbico que funciona continuamente.

Este parámetro de funcionamiento depende típicamente del reactor que sea utilizado, por tanto el tiempo de retención hidráulica, así como la razón de carga orgánica y el tipo de sustrato, son los principales parámetros de funcionamiento que determinan el volumen del reactor (Fannin, 1987).

Este factor de retención hidráulica adquiere importancia porque al aumentar el valor de TRH, aumenta también la fracción de materia orgánica degradada no obstante, el volumen de biogás producido disminuirá si se supera el valor óptimo de TRH para determinado sustrato usado (Cendales, 2011).

2.3. Biodigestores

Varnero (2011), cita que un biodigestor es aquella instalación donde ocurre la digestión anaerobia. Puede tomar forma cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangular, siendo la más común la forma cilíndrica. Hoy en día, estas instalaciones cuentan con cubiertas fijas o flotantes que evita la fuga de olores, que se mantenga la temperatura de trabajo óptima, impedir que el oxígeno ingrese y por último la recepción del biogás producido.

Estos pueden clasificarse en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el reactor, por su alta tasa de carga orgánica, por el tipo de mezclado o por cómo se carga la alimentación, es decir continuo o discontinuo. (IDEA,2007).

2.3.1 Tipos de biodigestores anaerobios

Según el tipo de carga, los biodigestores pueden ser:

i. Sistema discontinuo .

De acuerdo con Varnero (2011), estos tipos de biodigestores son aquellos que trabajan por ciclos, no continuamente, por lo que cada ciclo presenta las siguientes etapas: Alimentación, Reacción, Sedimentación y Descarga. También se debe tener en cuenta que, a diferencia de los sistemas continuos, estos poseen grandes ventajas debido a que se adaptan fácilmente a un determinado tipo de sustrato, existe un mejor control y calidad del efluente, además la sedimentación se realiza internamente del biodigestor, por citar las principales.

ii. Sistema continuo .

Guevara (1996) refiere que un sistema continuo es aquel en el cual se carga una determinada cantidad y se descarga la misma cantidad, esto después de cargarse inicialmente y transcurrido el tiempo de retención hidráulica; este tipo de sistema es el más usual en zonas rurales en las cuales normalmente se dispone de gran cantidad de materia orgánica, las dimensiones de este tipo pueden llegar a ser de tamaño mediano (6.3m³ y 15m³) o de gran tamaño (> 15m³) y además la producción de biogás que se obtiene suele ser uniforme en el tiempo.

iii. Modelo Chino .

Según la FAO (1986), señala que este tipo de biodigestor consiste en un tanque cilíndrico que tiene tanto el techo y piso en forma de domo, y toda esta instalación se encuentra bajo tierra.

Este digester inicia su proceso al ser alimentado a través de la cubierta superior removible con residuos agrícolas compostados mezclados y con lodos activos de otro digester, después se alimenta diariamente con todos los residuos disponibles ya sean de los baños domésticos y de los animales domésticos mediante el tubo de carga que llega hasta la mitad del digester; lo interesante de este digester es que no requiere gasómetro porque el biogás se almacena dentro del sistema (Varnero, 2011).

i. Modelo Indio.

En su mayoría este tipo de digestores están bajo tierra y en forma vertical, similar a un pozo, los cuales son cargados por gravedad una vez por día con un volumen que depende del tiempo de retención; estos producen biogás diariamente de forma casi constante siempre que se mantenga las condiciones de operación (Hilbert & Eppel, 2007).

Varnero (2011), acota que en la parte superior del digester flota una campana en la cual se almacena el biogás, y es gracias a esta campana que se obtiene una presión constante lo que significa tener una operación eficiente a equipos que alimenta; de esa manera este tipo genera una buena eficiencia de producción de biogás entre 0.5 y 1.0 volumen de gas por volumen de digester por día.

ii. Modelo tubular.

Según Botero y Preston (1987), indican que este tipo de biodigester comprende un tubular de material plástico que puede ser polietileno, PVC entre otros o una combinación de estos, los cuales son totalmente herméticos y tanto la entrada como la salida están unidas directamente a las paredes del tubular.

En su manual Martí (2019), hace mención de las ventajas de este tipo de biodigestores, entre ellas citamos las siguientes: su instalación es rápida, cualquier productor capacitado puede instalar este tipo de digestores, su costo de transporte de materiales es muy bajo ya que sus piezas son ligeras al ser prefabricado.

2.4 Biodigestor Tubular

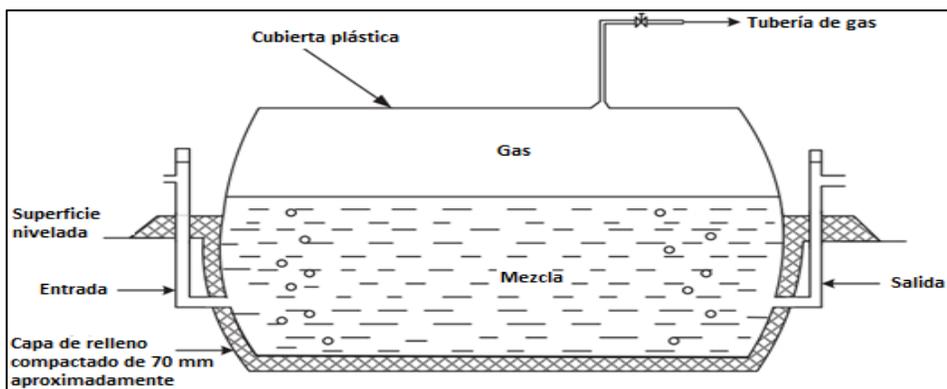
Estos digestores vienen en volúmenes desde 2.2 a 13.5 m³, siendo los de 6m³ los utilizados comúnmente (Tauseef et al, 2013).

De acuerdo con Mazumdar (1982) este modelo de digestor de bajo costo fue desarrollado por Chung Po de Taiwán utilizando goma de neopreno. Este diseño combina la cámara de digestión, el tanque de sedimentación y el gasómetro en una sola unidad. El sustrato no ocupa todo el volumen del digestor, ya que debe quedar un espacio para el gas. Así, a medida que la bolsa se hincha, el gasómetro se va formando y llenando. El funcionamiento de este digestor se basa en la tecnología de digestión anaeróbica plug-flow o de flujo pistón, por la forma en la que se desplaza la carga en su interior.

Esta bolsa de biogás debe ser apoyada hasta el nivel de mezcla que contiene en su interior. Esto se puede hacer mediante su colocación en una zanja cavada en el suelo hasta dicho nivel y las salidas a nivel del suelo (Mazumdar, 1982).

Figura 7

Digestor tubular.



Nota: Cuando se va produciendo biogás la parte superior se infla. Fuente, Mazumdar, 1982.

Conforme a Martí (2019), el volumen del biodigestor depende de sus dimensiones, siendo crucial el volumen líquido relacionado con la carga diaria (CD) y el tiempo de retención (TR), mientras que el biogás solo indica capacidad de almacenamiento.

Los biodigestores de materiales flexibles, como la geomembrana de PVC, por ejemplo, requieren una zanja que contenga su volumen. Las dimensiones de la zanja determinan el volumen final del biodigestor y el volumen líquido que contendrá (Martí, 2019).

Así mismo Martí (2019) añade que los biodigestores tubulares tienen una forma cilíndrica que, aunque requiere más material, ofrece ventajas significativas. Su diseño asegura que la entrada y salida estén alejadas, obligando a la carga diaria a recorrer toda la longitud del biodigestor. Esta estructura se asemeja al intestino de un sistema digestivo, que es el proceso que se busca replicar.

Se considera la forma tubular en biodigestores con relación longitud-diámetro entre 5 y 10, independientemente de las geomembranas utilizadas, siendo el valor óptimo de 7.5 (Martí, 2019).

2.4.1 Biodigestor tubular con plástico de invernadero

Acorde con el ejemplo que Martí (2019) menciona sobre el plástico de invernadero, el cual se presenta con un ancho de rollo de 2 metros, que al cortarse se expande a 4 metros, representando la circunferencia, mientras que 2 metros es la mitad de esta.

Así, se presenta la siguiente tabla con medidas de circunferencias muy usuales de plásticos que normalmente se pueden encontrar comercialmente.

Tabla 5*Ecuaciones relacionadas al plástico de invernadero.*

	$C = 2 \times \pi \times r$	C = circunferencia del plástico (m)
Ecuación 1	$r = \frac{C}{2 \times \pi}$	$\pi = 3.1416$ r = radio de la circunferencia del plástico (m)
Ecuación 2	$D = 2 \times r$	D = Diámetro de la circunferencia del plástico (m) r = radio de la circunferencia del plástico (m)
Ecuación 3	$\frac{L}{D} \text{ óptima} = 7.5$	L = Longitud del biodigestor (m) D = Diámetro de la circunferencia del plástico (m)
Ecuación 4	$\frac{L}{D} = (5 \text{ a } 10)$	L = Longitud del biodigestor (m) D = Diámetro de la circunferencia del plástico (m)

Nota: Fuente. Martí (2019).**Tabla 6***Longitudes del biodigestor tubular a partir de la medida de la circunferencia del plástico.*

CIRCUNFERENCIA (M)	ANCHO DE ROLLO (M)	RADIO (M)	DIÁMETRO (M)	LONGITUD BIODIGESTOR TUBULAR		
				MÍNIMA (M)	MÁXIMA (M)	ÓPTIMA (M)
				2	1	0.32
3	1.5	0.48	0.95	4.8	9.5	7.2
4	2	0.64	1.27	6.4	12.7	9.5
5	2.5	0.80	1.59	8.0	15.9	11.9
6	3	0.95	1.91	9.5	19.1	14.3
7	3.5	1.11	2.23	11.1	22.3	16.7
8	4	1.27	2.55	12.7	25.5	19.1
9	4.5	1.43	2.86	14.3	28.6	21.5
10	5	1.59	3.18	15.9	31.8	23.9
14	7	2.23	4.46	22.3	44.6	33.4

Nota: Tabla adaptada de Biodigestores tubulares. Guía de diseño y manual de instalación. Martí (2019).**2.4.2 Biodigestor tubular prefabricado**

En nuestro país una de las empresas más reconocidas que prefabrican digestores tubulares de geomembranas de PVC es la empresa Comercial Industrial Delta S.A.

Según CIDELSA (2024) menciona que sus modelos son hechos para las zonas rurales principalmente, también indican que el biodigestor tubular de PVC es sellado por alta frecuencia y los biodigestores son totalmente herméticos que contienen tapas en ambos extremos donde se colocan las tuberías de carga, de salida y la última para la purga.

Figura 10

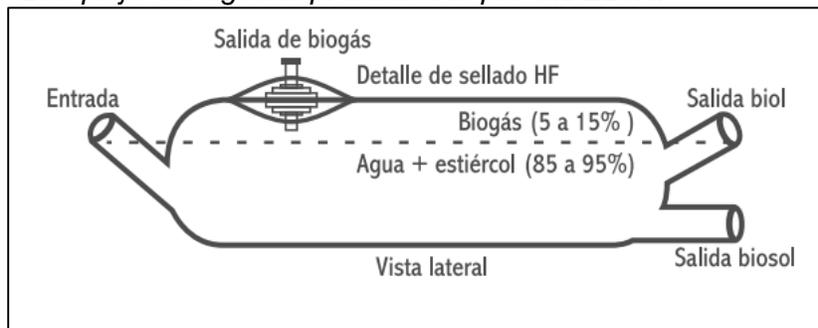
Reactor tubular.



Nota: Fuente, CIDELSA (2024).

Figura 11

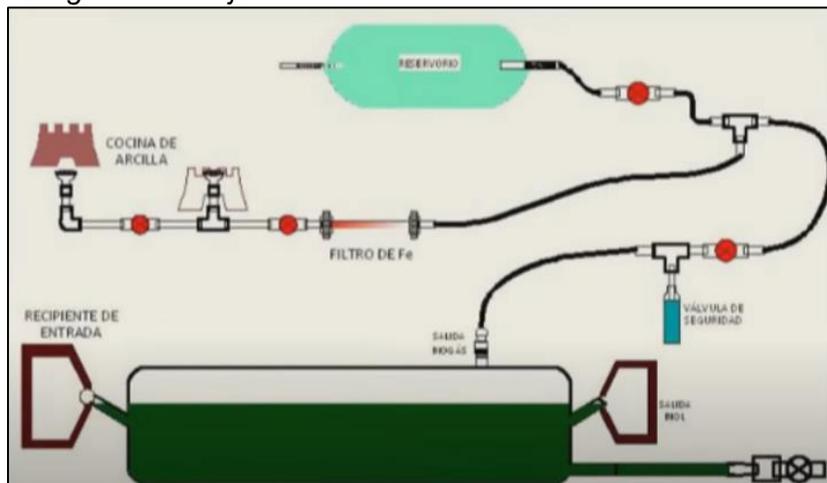
Bosquejo del digestor prefabricado por CIDELSA.



Nota: Fuente, CIDELSA (2024).

Figura 12

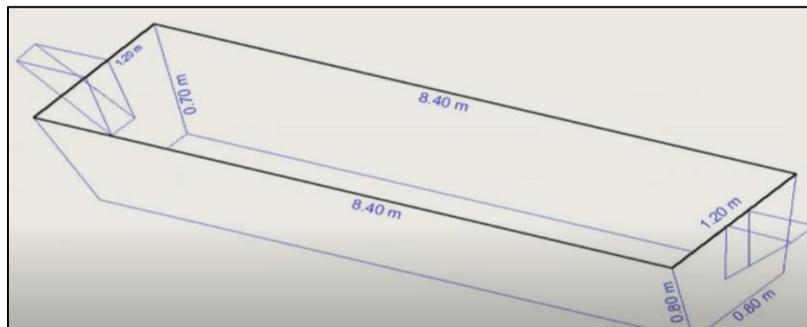
Diagrama de flujo.



Nota: Fuente, CIDELSA (2024).

Figura 13

Zanja cavada para el reactor tubular.



Nota: Fuente, CIDELSA (2024).

2.4.3 Obtención de biogás usando el biodigestor tubular

La producción de biogás de estiércoles depende de la temperatura y el tiempo de retención del consorcio bacteriano, variando la rapidez de producción según el tipo de estiércol (Martí, 2019).

La digestión anaerobia en biodigestores degrada el estiércol gradualmente, por lo cual la producción de biogás ocurre en todas las etapas del proceso; tener en cuenta también que la variación en la producción de biogás depende del tipo de alimentación del animal y la humedad del estiércol fresco (Martí, 2019).

Tabla 7

Comparación entre el estiércol de vaca y cerdo en la producción de biogás.

TEMPERATURA DE TRABAJO DEL BIODIGESTOR (°C)	ESTIÉRCOL DE VACA FRESCO		ESTIÉRCOL DE CERDO FRESCO	
	TIEMPO DE RETENCIÓN (D)	BIOGÁS* (L/KG)	TIEMPO DE RETENCIÓN (D)	BIOGÁS* (L/KG)
33-37	30	39	25	71
28-32	40	38	30	67
23-27	50	35	35	61
18-22	65	33	50	59
13-17	90	31	65	54
8-12	125	29	90	50

Nota: Martí (2019) indica que en esta tabla el biogás está expresado para 25°C y 1 atmósfera de presión, suponiendo 65% de contenido de metano (CH₄), también se ha considerado en el estiércol de vaca 16% de ST, 80% SV/ST y 0,2 m³ CH₄ /Kg_{sv}; y para el estiércol de cerdo 20% ST, 75% SV/ST y 0,3m³ CH₄ /Kg_{sv}.

Tabla 8

Equivalencias de 1m3 de biogás.

1000 LITROS (1M3) DE BIOGÁS EQUIVALE A:	
5647 kcal	Energía (65% CH ₄)
6.56 kWh	Energía (65% CH ₄)
1.6 Kg	Madera
1.2 Kg	Bosta seca
1.1 litros	Alcohol
0.75 litros	Gasolina
0.65 litros	Gas – oil
0.76 m3	Gas natural
0.7 Kg	Carbón
3.3 kWh	Calor útil (65% CH ₄ ; rendimiento 50%)
2 kWh	Electricidad útil (65% CH ₄ ; rendimiento 30%)

Nota: Fuente. Martí (2019).

Tabla 9*Consumo de biogás por hora.*

USO BIOGÁS	CONSUMO DE BIOGÁS POR HORA (L/H)
Cocina doméstica	300
Cocina industrial	450
Calefactor lechones	300
Lámpara (equivalencia a 60W)	120
Olla arrocera (2l)	140
Calefón de agua (14 kW)	2500
Calefón de agua (26 kW)	5000
Refrigeradora (100L)	30 (en zona fría) 75 (en zona caliente)
Motor < 5hp (por cada 1hp)	400
Motor > 5hp (por cada 1hp)	250
Ordeñadora (15hp)	2500
Generador (1.2 kW)	600
Generador (3 kW)	2100
1 kWh eléctrico (5-20 kW)	1600

Nota: Fuente. Martí (2019).

2.4.4 Parámetros de diseño

i. Tipos de estiércol.

Estiércol en la granja (diario).

El estiércol diario es la cantidad generada en la granja, es útil para estimar el potencial de biogás y biol, y determinar cuánto será estiércol disponible para la carga al biodigestor (Martí, 2019).

Tabla 10*Cantidad de estiércol por tipo de animal*

ANIMAL	KG DE ESTIÉRCOL DIARIO POR CADA 100KG DE PESO VIVO
Vaca	8
Cerdo	4
Cabra/oveja	4
Conejo	3
Caballo	7
Humano Adulto	0.4 kg por adulto
Humano Niño	0.2 kg por niño

Nota: Fuente. Martí (2019).

Estiércol para cargar el biodigestor (disponible).

Para gestionar el estiércol que va a ser cargado a un biodigestor, es crucial conocer las horas de estabulación de los animales y la facilidad para recoger el estiércol (Martí, 2019).

Tabla 11*Cálculo de estiércol disponible.*

CASO	ESTIÉRCOL DISPONIBLE
Estabulados	= estiércol diario
Estabulados solo a la noche	= 0.25 x estiércol diario
Estabulado un n° de horas	$= \frac{(\text{n}^\circ \text{ horas estabulado})}{24 \text{ horas}} \times \text{estiércol diario}$

Nota: Fuente. Martí (2019).

ii. Cantidad de agua en la mezcla.

La cantidad de agua a usar es la cantidad mínima con la que hay que mezclar el estiércol disponible; tener en cuenta que, para operar un biodigestor tubular, la mezcla de estiércol y agua debe tener entre 3% y 16% de sólidos totales; pese a que se pueden usar cargas con menor porcentaje, se recomienda mantener valores más altos para un mejor rendimiento (Martí, 2019).

Tabla 12

Mezcla con agua para la carga diaria.

ESTIÉRCOL	RELACIÓN ESTIÉRCOL: AGUA
Vaca	1:3
Cerdo	1:4
Llama/Oveja/Cuy	1:8-9

Nota: Fuente. Martí (2019).

iii. Carga diaria al biodigestor.

La carga diaria en un biodigestor se mide en litros de estiércol y agua mezclados, asumiendo que 1 kg de estiércol equivale a 1 litro. Este volumen es crucial para dimensionar el biodigestor. Para calcular la producción de biogás, es fundamental conocer la cantidad de estiércol disponible en la carga diaria, ya que el agua no influye en la generación de biogás (Martí, 2019).

iv. Relación entre la Temperatura y el Tiempo de Retención.

Las bacterias en el biodigestor operan más eficientemente a altas temperaturas, reduciendo el Tiempo de Retención (TR) y este tiempo determina cuánto tarda el estiércol en procesarse completamente y ser evacuado, influyendo en la producción de biogás (Martí, 2019)

Tabla 13

Relación entre la Temperatura y el Tiempo de Retención.

TEMPERATURA	TIEMPO DE RETENCIÓN (TR)
35 °C	25 - 30 días
30°C	30 - 40 días
25°C	35 - 50 días
20°C	50 - 65 días
15°C	65 - 90 días
10°C	90 - 125 días

Nota: Fuente. Martí (2019).

v. Temperatura de trabajo del biodigestor

En este aspecto Martí (2019), explica que la temperatura de trabajo de un biodigestor depende del consorcio bacteriano y se determina por el clima y el diseño del sistema; generalmente, los biodigestores sin diseño solar operan a temperaturas similares a la media ambiental, lo cual es adecuado en regiones tropicales por debajo de 1500 msnm; sin embargo, se pueden diseñar biodigestores que utilicen energía solar para aumentar la temperatura de trabajo, lo que es especialmente beneficioso en altitudes superiores a 1500 msnm, donde la temperatura promedio es más baja, por tanto un diseño de calefacción solar pasiva permite que el biodigestor funcione a temperaturas cercanas a las máximas ambientales.

vi. Diseño de calefacción pasiva en biodigestores

Se recomienda calefacción solar pasiva a temperaturas de 20°C o menores. La elección de criterios de diseño depende del material del tanque del biodigestor: plástico, PVC o polietileno; para ello se tiene tres criterios principales: colores oscuros en el material del biodigestor; aislantes en suelo y paredes de la zanja e invernadero (Martí, 2019).

vii. Temperatura de trabajo del biodigestor y tiempo de retención

Martí (2019) menciona que, la temperatura del biodigestor depende de la temperatura ambiente y del diseño de calefacción.

Tabla 14

Temperatura de trabajo de un biodigestor según ubicación geográfica.

ECO REGIÓN TÍPICA (ALTURA, MSNM)	TEMPERATURA AMBIENTE MEDIA (°C)	TEMPERATURA DE TRABAJO DEL BIODIGESTOR (°C)		
		Biodigestor sin diseño solar	Biodigestor con diseño solar	Criterios
Trópico cálido (<300)	28 – 32	28 – 32	No necesita diseño solar	
Trópico (300 - 1000)	23 – 27	23 – 27	No necesita diseño solar	
Valles (1000 - 2000)	18 – 22	18 – 22	23 - 27	Color oscuro + aislante zanja
Valles altos (2000 - 3000)	13 – 17	13 – 17	18 - 22	Color oscuro + aislante zanja + invernadero
Altiplano (3000 - 4500)	8 – 12	8 – 12	13 - 17	Color oscuro + aislante zanja + invernadero

Nota: Fuente. Martí (2019).

viii. Volumen de un biodigestor, carga diaria y tiempo de retención.

Martí (2019) nos recuerda que, el volumen líquido del biodigestor es el que está relacionado con la carga diaria y el tiempo de retención, por lo tanto, es el que se va a considerar en los cálculos y no el volumen total; además menciona que, el diseño de la cúpula de biogás puede ser mayor o menor al momento de diseñarlo, sin afectar el espacio de las bacterias ni el tiempo de retención del lugar o clima.

Tabla 15

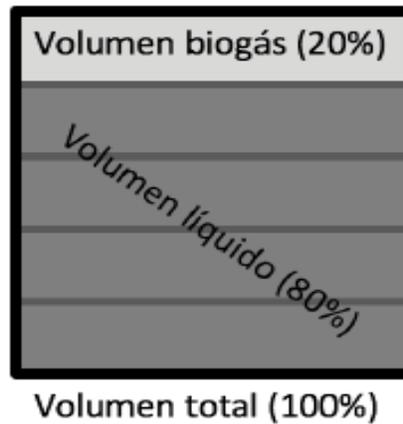
Ecuaciones relacionadas al cálculo de volúmenes en un biodigestor.

Ecuación 5	$VL = TR \times CD$	VL = volumen líquido (m ³ o L) TR = tiempo de retención (días) CD = carga diaria (m ³ /d o L/d)
Ecuación 6	$VT = VL + VB$	VT = volumen total (m ³ o L) VL = volumen líquido (m ³ o L) VB = volumen de biogás (m ³ o L)

Nota: Fuente, Martí (2019).

Figura 14

Esquema de la proporción de volúmenes en un biodigestor.



Nota: Fuente, Martí (2019).

ix. Dimensiones de biodigestores tubulares

Martí (2019) refiere que las dimensiones de un biodigestor tubular dependen de la zanja que lo contiene, generalmente trapezoidal para evitar derrumbes y se determina por el ancho inferior (a), ancho superior (b) y profundidad (p); así mismo el volumen se calcula con el área del trapecio multiplicada por la longitud (L) de la zanja; el área del trapecio de la zanja determina los metros cúbicos del biodigestor por metro lineal, debido a que es crucial ajustar las dimensiones (a, b y p) para optimizar el uso del plástico y mantener el perímetro adecuado.

Los taludes serán de 30° a 45° para suelos sueltos y arenosos, mientras que para suelos más arcillosos serán de 7,5° a 30°. En ciertos escenarios, es posible realizar zanjas sin utilizar un talud o inclinación, por lo que, en este caso, α sería 0°; en consecuencia, para determinar las zanjas a, b y p ideales, se debe tener en cuenta tanto la inclinación del talud (ángulo α) como la circunferencia del plástico que se utilizará (Martí, 2019).

Tabla 16

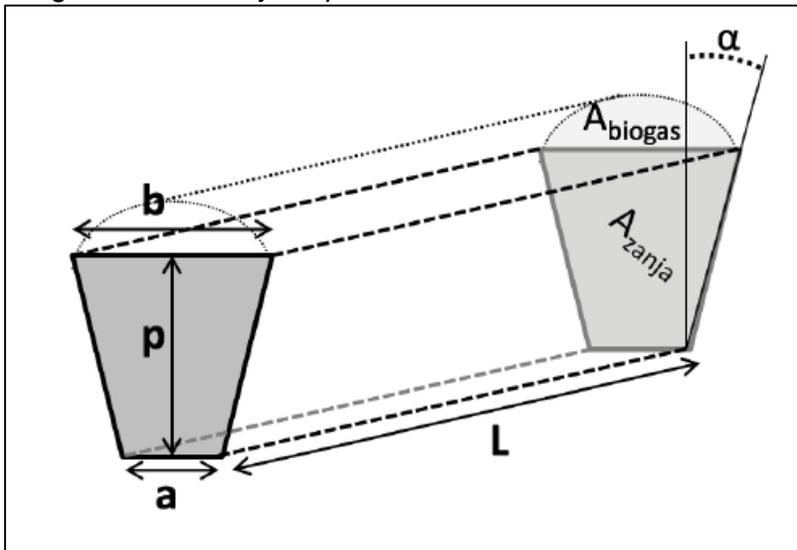
Ecuaciones relacionadas a la zanja del biodigestor.

Ecuación 7	$A_{zanja} = px \frac{(a + b)}{2}$	A zanja = Área del trapecio de la zanja (m ³)
		p = Profundidad (m)
		a = ancho inferior (m)
		b = ancho superior (m)
Ecuación 8	$V_{zanja} = VL = A_{zanja} \times L$	V zanja = Volumen de zanja (m ³)
	$L = \frac{VL}{A_{zanja}}$	VL = volumen líquido (m ³ o L)
		L = Longitud de la zanja (m)

Nota: Fuente.Martí (2019).

Figura 15

Diagrama de la zanja trapezoidal.



Nota: Fuente, Martí (2019).

Tabla 17*Parámetros de la zanja óptima del biodigestor.*

α (°) desde vertical	% VL	%VB	a(m)	b(m)	p(m)	Azanja (m ²)	A _{biogas} (m ²)	A _{Total} (m ²)
0	88	12	1.49xr	1.49xr	1.57xr	2.34xr ²	0.32xr ²	2.65xr ²
0	83	17	1.41xr	1.41xr	1.57xr	2.22xr ²	0.45xr ²	2.67xr ²
0	80	20	1.34xr	1.34xr	1.57xr	2.10xr ²	0.53xr ²	2.63xr ²
7.5	80	20	1.23xr	1.63xr	1.54xr	2.20xr ²	0.55xr ²	2.75xr ²
15	76	24	1.02xr	1.82xr	1.49xr	2.12xr ²	0.69xr ²	2.80xr ²
30	75	25	0.72xr	2.26xr	1.33xr	1.98xr ²	0.66xr ²	2.64xr ²
45	65	35	0.43xr	2.57xr	1.07xr	1.61xr ²	0.86xr ²	2.47xr ²

Nota: Fuente.Martí (2019).

2.5 Efecto de las nanopartículas de Fe₃O₄ en la digestión anaerobia

El proceso de metanogénesis es realizado por los microorganismos metanogénicos Arqueas, las cuales tienen un rol importante en el ciclo del carbono, participando en la descomposición de materia orgánica en sistemas anaeróbicos, como sedimentos, marismas y aguas residuales. Para los microorganismos Arqueas, como para todas las formas de vida, la homeostasis del hierro es fundamental. De hecho, los iones Fe²⁺ y el Fe³⁺ son esenciales para la generación de energía y la replicación del DNA, entre otras funciones vitales (Casals et al., 2014).

La facilidad con la que los iones absorben o pierden electrones, los convierte en un cofactor ideal y versátil para numerosas proteínas. Mientras que el exceso de hierro puede fácilmente generar radicales libres altamente reactivos y tóxicos que son perjudiciales para diferentes biomoléculas (ácidos nucleicos y lípidos, entre otros). Aunque se sabe que el hierro abunda en la superficie del planeta, su biodisponibilidad no es tan grande como cabría esperar dado que la mayoría se encuentra en el estado insoluble 3+. Los límites de la solubilidad, a pH 7, son 0.1M para Fe²⁺ y 10⁻¹⁸ M para Fe³⁺.

Entonces si se mantiene las concentraciones óptimas de hierro en un digestor anaeróbico es un paso fundamental para impulsar la actividad bacteriana. Para esta desafiante tarea, las pequeñas nanopartículas de óxido de hierro (NPsFe₃O₄), que en condiciones de no saturación se disuelven lentamente, son buenas candidatas para lograr dicha potenciación de la actividad. Se presenta aquí un concepto novedoso de dosificación de iones por tamaño e ingeniería de estado de superficie de nanopartícula (NP); aquí la NP actúa como portador y el ión liberado como compuesto activo. Gracias a la labilidad y persistencia específicas de tales NPs, pueden primero dispersarse y luego disolverse progresivamente durante un período prolongado de tiempo para producir el suministro dietético de hierro para los microorganismos en el reactor. A medida que la NP se vuelve más pequeño, la energía necesaria para mantener su superficie se vuelve cada vez más importantes. Por tanto, las NPs pequeñas son inestables y pueden diseñarse para proporcionar iones de forma controlada mediante la modificación de su tamaño, estado superficial y concentración. Vale la pena señalar que, en condiciones anaeróbicas metanogénicas del digestor cerrado, la adición de hierro da lugar a precipitados insolubles de hidróxido férrico que se reducen a Fe²⁺ que es soluble y por lo tanto se vuelve biodisponible (Casals et al., 2014).

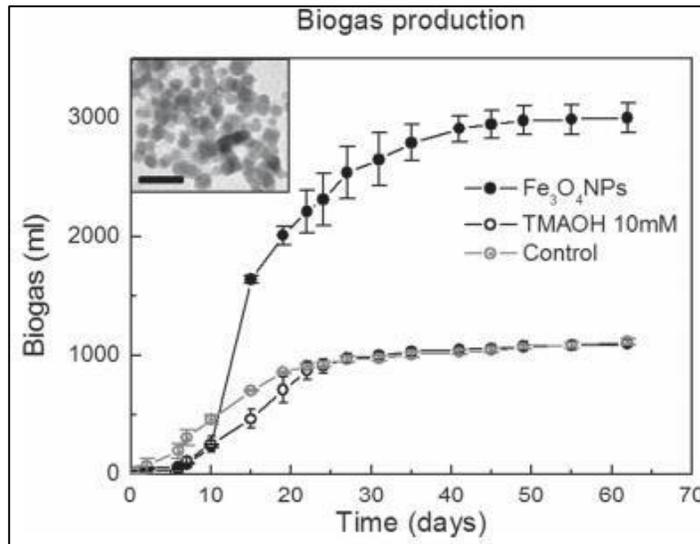
Las nanopartículas de magnetita tienen aplicaciones nanotecnológicas no solo en campos conocidos como la medicina o electrónica, sino también en construcción y la producción de energía, esto según se indica en la existencia de trabajos realizados por otras instituciones.

Existe evidencia para un único sustrato en la digestión anaeróbica (celulosa cristalina) y nanopartículas de Fe₃O₄ (7 nm) con una concentración de 100 ppm en un biorreactor a temperatura mesófila (37 ° C) durante 60 días y los resultados mostraron un aumento del 180% en la producción de biogás y el 234% de aumento en la producción de metano, encontrando que la disolución de nanopartículas de magnetita en un biodigestor

anaerobio puede interactuar con los microorganismos vivos sin causar toxicidad y producir biogás hasta valores no antes encontrados (Casals et al., 2014).

Figura 16

Comparación de la generación de biogás obtenido con nanopartículas de Fe_3O_4 , TMAOH y el control.



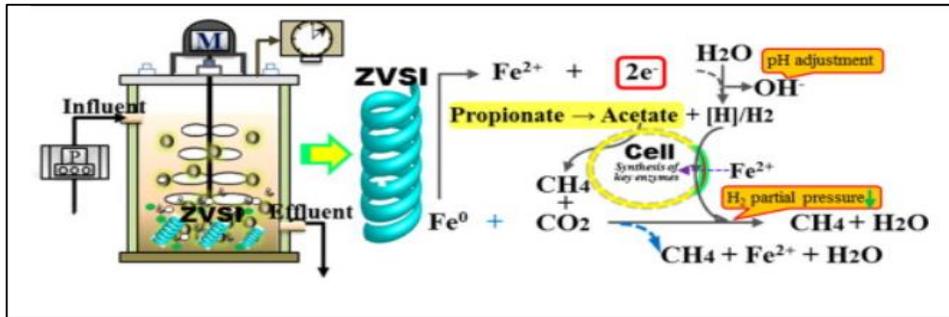
Nota: Fuente Anaerobic Digesters Boosts Biogas Production. (14), 2801–2808.

Una cierta cantidad de nanopartículas de hierro puede mejorar la producción de metano en el digestor de lodos. El hierro es esencial si se agrega en una concentración adecuada de iones en el reactor anaeróbico y puede aumentar la producción de biogás. Sin embargo, a una dosis más alta, las nanopartículas de Fe_3O_4 tienen un efecto depresor en el proceso de digestión anaerobia (Casals et al., 2014).

Cabe mencionar también que, los iones de hierro liberados por las nanopartículas de hierro pueden infiltrarse en el interior de las células y promover la síntesis de enzimas clave y el crecimiento de microorganismos, especialmente metanógenos (Zhen et al., 2015). De modo, que el efecto positivo de Fe^{2+} sobre la metanogénesis se reconoce ya que las nanopartículas de Fe_3O_4 aumentaron la actividad metanogénica asociada con una degradación orgánica acelerada.

Figura 17

Los iones de hierro penetran la célula y promueven la producción de enzimas clave y el crecimiento de microorganismos metanógenos.



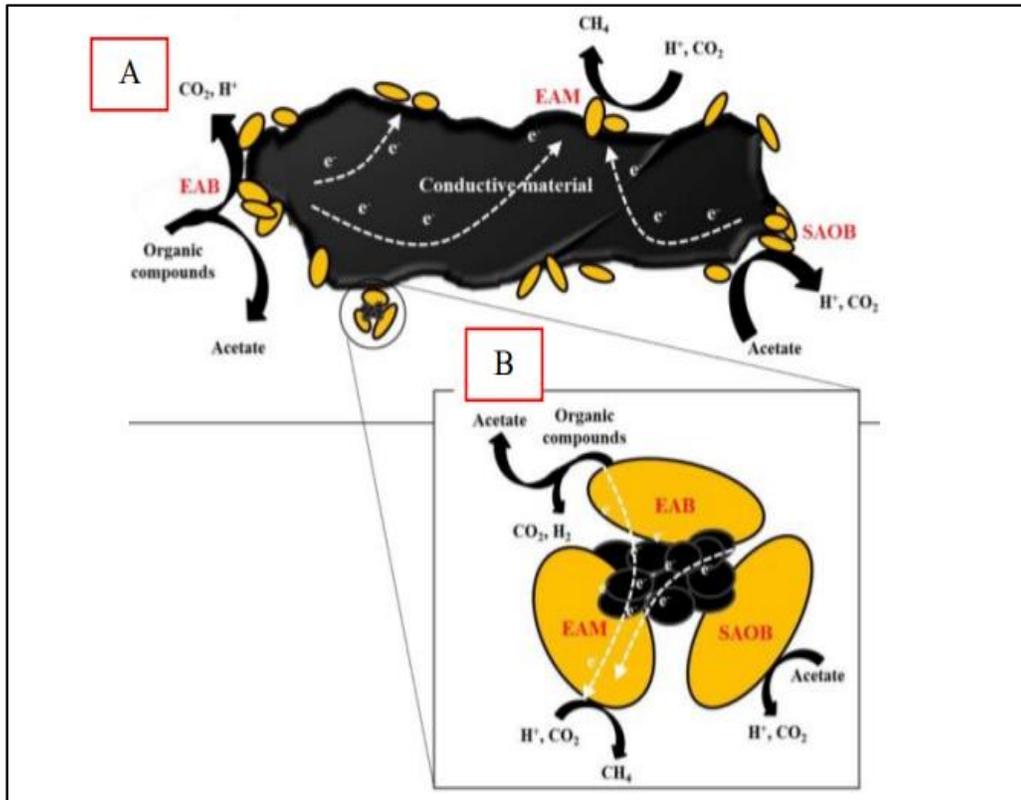
Nota: Fuente Influence of Zero Valent Scrap Iron (ZVSI) supply on methane production from waste activated sludge (Zhen et al., 2015).

En entornos metanogénicos, la transferencia electrónica entre especies (IET) entre bacterias acetogénicas (oxidantes de ácidos grasos) y bacterias metanogénicas (metanógenos hidrogenotróficos) (Richards et al., 2016) es crítica para la descomposición estable y completa de sustratos orgánicos. Se ha demostrado que las nanopartículas de Fe_3O_4 promueven la producción de metano al promover la transferencia directa de electrones entre especies (DIET) en la metanogénesis (Zhang et al., 2019); es por ello, que actualmente, una de las explicaciones del actuar de las Fe_3O_4 NPs en la digestión anaerobia cae directamente en la transferencia directa de electrones entre especies (DIET), esta es una ruta de suministro de electrones novedosa descubierta en las últimas décadas y ha sido ampliamente probada en sistemas anaeróbicos; según recientes hallazgos, algunos grupos clave de las comunidades microbianas en la digestión anaerobia intercambian electrones a través de DIET (Baek et al., 2019). Últimamente, se ha prestado cada vez más atención a cómo los minerales conductores afectan la actividad de las comunidades microbianas en entornos anaerobios; debido a la alta conductividad que presentan los minerales de hierro (magnetita), es posible que se pueda promover la DIET entre diferentes microorganismos involucrados en la simbiosis eléctrica, estos materiales conductores

serven como un conducto para la transferencia de electrones. (Martins et al., 2018). Esta transferencia (DIET) puede ser dividida de 2 formas: DIET biológica (bDIET) y DIET mineral (mDIET). En la primera (bDIET) los electrones se transfieren a través de conexiones eléctrico-biológicas vía redox, a través de proteínas activas que transfieren directamente los electrones generados por intermedios de bacterias sintróficas a microorganismos metanogénicos Archaea. En el segundo caso (mDIET) no se necesitan proteínas electroactivas para formar la conexión eléctrico-biológica, la transferencia de electrones es vía una red de materiales conductores entre bacterias exoeletrogénicas, incluyendo las bacterias sintróficas oxidantes de acetato que puede desviar el camino de la conversión de acetato a metano en ambientes de digestión anaerobia (Baek et al., 2019). Los componentes electrosintróficos involucrados en mDIET se desarrollan e interactúan en un material complejo conductor de microorganismos. La estructura física del complejo varía según el tamaño de los materiales conductores involucrados. Por ejemplo, los microorganismos se adhieren y forman biopelículas en la superficie de materiales conductores que son lo suficientemente grandes como para servir como medios de soporte para la unión celular (Fig. A), mientras que para pequeñas partículas conductoras junto con microorganismos para formar agregados similares a flóculos (Fig. B) (Baek et al., 2019).

Figura 18

Esquema de cómo el material conductor sirve para facilitar la transferencia de electrones entre especies. A) Interacciones entre microorganismos y materiales conductores grandes B) Interacciones entre microorganismos y materiales conductores.

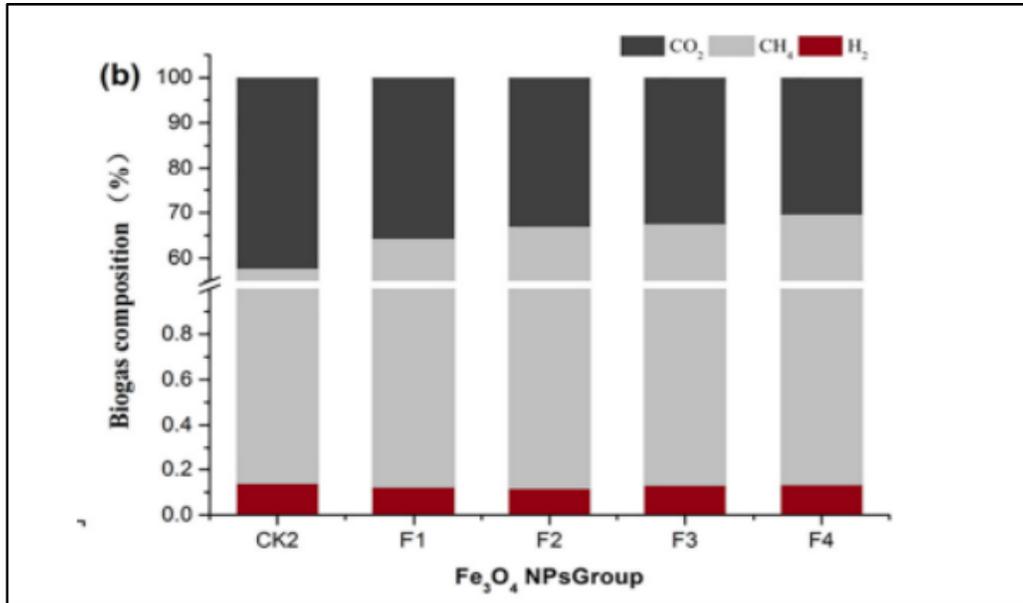


Nota: Fuente Renewable and Sustainable Energy Review (Baek et al., 2019).

Además, vale mencionar que estudios realizados muestran resultados favorables en la composición del biogás ya que al agregar las NPS de Fe_3O_4 no solo incrementan la generación de biogás, sino que también mejoran la calidad de este; exactamente se observó que el CH_4 varió de 64.1% a 69.44%. El biogás restante era principalmente CO_2 , mientras que el contenido de H_2 era el menor. Vale la pena señalar que el contenido de CH_4 también aumentó a medida que aumentaba la dosis de nanopartículas de Fe_3O_4 . (Zhang et al., 2019).

Figura 19

Porcentajes de metano, dióxido de carbono e hidrógeno en la generación de biogás al añadir diferentes dosis de Fe₃O₄ NPs.



Nota: Fuente Renewable and Sustainable Energy Review (Baek et al., 2019).

Varios estudios recientes han demostrado un efecto positivo de agregar minerales de hierro conductores en la metanogénesis a través de la promoción de mDIET. Sin embargo, hasta donde se tiene conocimiento las nanopartículas de Fe₃O₄ tienen el potencial de mejorar el rendimiento del biogás, pero todavía existen preguntas sobre cómo exactamente las nanopartículas de óxido de hierro afectarán cada etapa del proceso anaeróbico como la hidrólisis, la acidogénesis y la metanogénesis.

2.6 Marco Legal

Osinermin (2017) señala que, en el año 2008 se emitió un marco normativo especial introduciendo los mecanismos de subastas para la promoción de inversiones privadas y la adjudicación de proyectos RER en nuestro país. También Osinermin (2017) indica:

Este marco normativo define como RER a las fuentes de energía eólica, solar, de biomasa, de geotermia, mareomotriz y las pequeñas fuentes hidráulicas con una capacidad instalada de hasta 20MW; y está respaldado por la Ley de Promoción de la Inversión para la Generación de Electricidad con el Uso de Energías Renovables (Decreto Legislativo N°1002), el Reglamento de la Generación de Electricidad con Energías Renovables (Decreto Supremo, D.S., N°012-2011-EM), y el Reglamento para la Promoción de la Inversión Eléctrica en Áreas No Conectadas a la Red (D.S. N°020-2013-EM). (Osinermin, 2017, pág.99)

A continuación, en la siguiente figura se resumirá lo mencionado anteriormente.

Figura 20

Marco normativo RER.

<p>Normas Generales</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Decreto Legislativo N° 25844 - Ley de Concesiones Eléctricas y su Reglamento. • Ley N° 28832- Ley para asegurar el desarrollo eficiente de la generación eléctrica (2008): promueve licitaciones y contratos a largo plazo para el suministro de energía de clientes regulados. • Decreto Supremo N° 064-2010-EM - Política Energética Nacional del Perú.
<p>Marco Normativo de RER</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Decreto Legislativo N° 1002 - promoción de la Inversión para la Generación de Electricidad con el Uso de Energía Renovables (2008). • Decreto Supremo N° 012-2011-EM - Reglamento de la Generación de Electricidad con Energías Renovables¹. • Decreto Supremo N° 020-2013-EM - Reglamento para la promoción de la inversión eléctrica en Áreas no conectadas a red (<i>off-grid</i>). • Resolución Ministerial N° 203-2013-MEM/DM - Plan de Acceso Universal a la Energía.
<p>Procedimientos Regulatorios - Osinermin</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Resolución N° 200-2009-OS/CD: procedimiento sobre hibridación de instalaciones para generación RER. • Resolución N° 001-2010-OS/CD: procedimiento de cálculo de prima para la generación RER. • Resolución N° 289-2010-OS/CD: procedimiento sobre cálculo de la energía dejada de inyectar por causas ajenas al generador RER. • Procedimiento Técnico del COES N°20: procedimiento sobre el ingreso, modificación y retiro de instalaciones en el SEIN - COES.

Nota: ¹Modificado por el D.S.N°031-2012-EM y el D.S.N°024-2013-EM.Fuente:Osinermin(2017).

Con respecto al uso de bioenergía, Mendoza (2012) menciona que en nuestro país se tiene posibilidades de instalar centrales eléctricas convencionales de biomasa con una capacidad de biogás de 177MW y centrales de biogás de 5151MW.

Echeandía (2014) indica que, en el Perú, el potencial de generación eléctrica mediante biomasa, recurso renovable no convencional, es de 450MW y la potencia utilizada es de 27MW.

Existen tres zonas en donde la biomasa representa un importante potencial de uso: la costa norte (bagazo de caña, cascarilla de arroz, residuos hidrobiológicos), la selva alta (cascarilla de café, residuos forestales) y la selva baja (residuos forestales) (Green Energy 2005, citado en Fundación Friedrich Ebert 2010).

Finalmente, Osinergmin (2017) refiere que, como resultado de las subastas de RER realizadas, el Perú tiene en operación comercial en el sistema eléctrico Interconectado Nacional (SEIN), entre otras centrales, dos plantas de biomasa (26MW).

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Síntesis y caracterización de nanopartículas de óxido de hierro

En la presente investigación se inició la síntesis de nanopartículas con el método de coprecipitación mediante el cual en los diferentes testeos no se llegó al tamaño nanométrico (tamaño menor a 100nm). Posteriormente se continuó la síntesis con el método de poliol con el que sí se obtuvo tamaños menores a 100nm.

3.1.1 Método de poliol

Existen varios métodos de síntesis de nanopartículas de óxido de hierro, entre los cuales la descomposición térmica de un precursor de hierro en solución orgánica se considera uno de los enfoques más interesantes ya que producen nano cristales monodispersos, lo que significa que sus tamaños son similares (Lu et al, 2007). Dentro de estos enfoques, Vega (2020) menciona que, el método poliol consiste en la descomposición térmica de un precursor metálico disuelto en un poliol (etilenglicol, dietilenglicol, etc.). Este método permite la obtención de nanopartículas de metales y óxidos de metales como los óxidos de hierro (Feldman, 2005). La síntesis de nanopartículas de magnetita por el método de poliol fue introducida por Cai y Wan, la cual consiste en la descomposición térmica de acetilacetato de hierro (III) $\text{Fe}(\text{acac})_3$ disuelto en diversos polioles: etilenglicol, dietilenglicol, trietilenglicol, y tetraetilenglicol (Vega, 2020).

El tratamiento térmico se da a la temperatura de ebullición de cada solvente para formar las nanopartículas en condiciones de reflujo (Vega, 2020). Del estudio llegaron a la conclusión que el trietilenglicol (TEG) es el mejor disolvente, ya que permite obtener nanopartículas de magnetita monodispersas y dispersables en agua en una sola etapa (Cai & Wan, 2007). Véase los materiales, reactivos y equipos en el Anexo 1.

3.1.2 Caracterización de nanopartículas

Las nanopartículas obtenidas se caracterizó por DLS (Dispersión dinámica de luz) la cual mide el diámetro hidrodinámico promedio (Dh) de las nanopartículas en suspensión acuosa (pH 7), dicha caracterización se llevó a cabo en el laboratorio de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería. Se obtuvo que las nanopartículas en TEG (Trielenglicol) tienen un tamaño de 34.03nm y en suspensión acuosa miden 377nm. Véase las imágenes por DLS en el Anexo 3.

3.2 Estudio de tres reactores – Test AME

Los sistemas de Actividad Metanogénica Específica permiten analizar un determinado sustrato, y de esa manera conocer el porcentaje de biodegradabilidad, así como su factibilidad económica. Se realiza a nivel laboratorio con materiales simples y de fácil adquisición para economizar recursos y reactivos. Los resultados de este protocolo nos permite analizar si conviene llevarlo a una siguiente escala tipo piloto, siempre que el porcentaje sea mayor a 60% (ASTM,1992).

Se realizó el estudio AME con tres reactores: Blanco (inóculo), Sustrato más inóculo y Sustrato más inóculo con Nanopartículas de Fe_3O_4 , la cantidad de nanopartículas fue de 100ppm (Casals,2014); además se añadió a cada uno de los reactores sales macronutrientes y micronutrientes. El sustrato en estudio fueron las excretas de “*cavia porcellus*” o cuy. El inóculo usado fue del CEMTRAR (Agraria, UNALM) ya que cuentan con un biodigestor trabajando en óptimas condiciones. El sistema se monitoreó durante 7 días en uno de los ambientes de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería. Se usó un baño térmico en la cual la temperatura establecida fue de 38°C (medio mesofílico), que favorece al crecimiento de las bacterias metanogénicas.

Figura 21

Configuración de los 3 reactores.



Figura 22

Monitoreo del sistema. .



Se obtuvo la siguiente data:

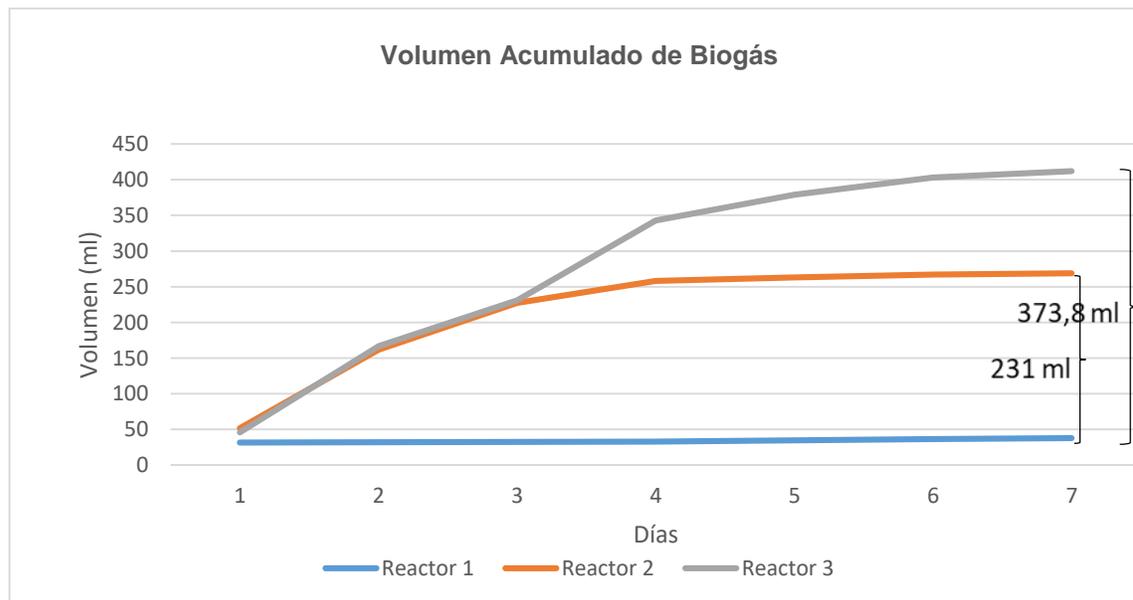
Tabla 18

Resultado de los volúmenes desplazados, volumen acumulado, biodegradabilidad y eficiencia.

VOLUMEN ACUMULADO (ML)								
Días/ Reactor	Reactor 1: Blanco	Reactor 2: Substrato	Reactor 3: Substrato + Magnetita	Δ Vol (Reactor 2 - Reactor 1)	Δ Vol (Reactor 3 - Reactor 2)	Biodegrada bilidad (Reactor 2)	Biodegrada bilidad (Reactor 3)	Eficiencia (Reactor 3 vs Reactor 2)
1	31.8	51.8	46	20	14.2	-	-	-
2	32	162	166.8	130	134.8	-	-	-
3	32.5	227.5	230.8	195	198.3	-	-	-
4	33	258	342.8	225	309.8	-	-	-
5	34.8	263	378.8	228.2	344	-	-	-
6	36.5	267	402.8	230.5	366.3	-	-	-
7	38	269	411.8	231	373.8	46.94%	75.95%	161.82%

Figura 23

Gráfica Volumen acumulado de biogás vs días.



3.3 Biodigestor piloto

3.3.1 *Diseño del biodigestor*

El material seleccionado para el biodigestor fue el de Geomembrana de PVC; según Martí (2019) señala que este material posee gran capacidad de expandirse, de estirarse, muy alta elongación alrededor de 300%, lo que permite almacenar abundante biogás en la cúpula según aumente la presión. Si se cubre de la radiación solar puede durar 20 años. Los biodigestores de geomembrana son prefabricados, y por su alta flexibilidad son fácilmente empacarles y transportables, la expansión del material implica hacer cubiertas altas, lo que significa su uso para climas fríos donde se recomiendan invernaderos compactos (Martí, 2019).

Si bien es cierto que, la ubicación geográfica del biodigestor se encuentra en la costa del país, debido a la estación del clima (Otoño – Invierno) en la que se instaló y se puso en marcha, se consideró también como aislantes térmicos en las paredes y base de la zanja, el uso de tecnopor, también plástico color negro, y además se construyó una caseta, tipo un invernadero para la absorción de la radiación solar, con el fin de mantener la temperatura de trabajo del biodigestor en rango mesofílico (25°C – 40°C).

Es relevante mencionar también el diseño de un gasómetro de 500L de capacidad del mismo material, geomembrana de PVC, que sirvió como método de cuantificación del volumen del biogás producido cada vez que llegó a su máxima capacidad.

En cuanto al dimensionamiento, los cálculos previos fueron realizados usando las ecuaciones anteriormente mencionadas, así como la Tabla 14. Véase en el Anexo 4, los planos del biodigestor y del invernadero.

Tabla 19*Dimensiones calculadas para la zanja y el reactor.*

DIMENSIONES - ZANJA		DIMENSIONES - BIODIGESTOR	
a (m) =	0.39	L (m) =	3.2
b (m) =	0.52	D (m) =	0.64
p (m) =	0.49	De y Ds (pulg) =	3
α (°) =	7.5	Ds.biog (pulg) =	1

Tabla 20*Diseño de planta piloto y parámetros operacionales.*

PARÁMETRO	BIODIGESTOR
Diseño del biodigestor y material	Tubular PVC
Volumen total y volumen líquido (m ³)	1.0 y 0.8
Temperatura: ambiente (°C)	16 +/- 5
Temperatura: caseta de invernadero (°C)	24 +/- 5
Temperatura: líquido (°C)	19 +/- 2
Tiempo de retención Hidráulica, TRH (días)	15
Carga periódica (kg)	54
	Excretas de cuy (%) 100
Sustrato	Dilución (excreta: agua) 01:08
	Afluente (% ST) 10
Inóculo (%Vol. Total)	Digestor de la Agraria 10

Figura 24

Prueba del biodigestor dentro de la zanja y con el Tecnopor (protección térmica).



3.3.2 Carga Inicial del biodigestor

i. Primer llenado de estiércol

Martí (2019) en este apartado recomienda:

Si se tiene estiércol acumulado se puede meter este dentro del biodigestor, mezclándolo con el agua necesaria para que fluya hacia el interior del biodigestor. Una cantidad interesante de estiércol para la carga inicial es de 80 - 100kg (unas dos carretillas). Esta carga inicial ayuda a que el biodigestor comience antes a producir biogás. (Martí, 2019, Pág. 93).

Si en caso no es factible acumular estiércol, el biodigestor se cargará diariamente con la cantidad que fue diseñado, de esta manera demora un poco más, aunque es igualmente aceptable. (Martí, 2019).

ii. Relación C/N

Al caracterizar el sustrato se obtuvo una relación de C/N de 20.46 y un 79.42% de ST. Véase el certificado del análisis en el Anexo 5.

Tabla 21

Residuos orgánicos comúnmente usados para degradarlos anaeróbicamente.

MATERIAS PRIMAS	Humedad %	Sólidos totales %	Carbono % (seco)	Nitrogeno % (seco)	Relacion C/N
Vacunos	79	21	32	1.5	21
Ovinos	73	27	60	3.7	16
Equinos (caballos, mulas , bueyes)	75	25	47	2.4	20
Porcinos	69	31	73	2.6	28
Gallinazas	44	56	70.2	5.85	12
Auquenidos	57	43	42	3.7	11
Cuyes	32	68	37.2	2.22	17
Conejos	20	80	47.2	2.02	23
Humano	80	20	33	5.5	6
Chala de maiz	15	85	39	0.7	56
Paja de arroz	8	92	41.2	0.7	59
Paja de cebada	7	93	42	0.88	48
Paja de trigo	8	92	46	0.53	87
Totorales	35	65	41	0.23	178
Hojas de platano	89	11	42	1.1	38
Pastos	67	33	40	2.52	16
Hierbas y hojas secas	50	50	41	1	41

Nota: Fuente. Energía Desarrollo y Vida - EDEVI

iii. Cantidad de componentes

Experimentalmente se ha demostrado que una carga de los biodigestores semicontinuos no debe tener más de 8% a 12% de sólidos totales (ST) para asegurar un buen funcionamiento del proceso (Varnero, 2011).

Respecto a la cantidad de inóculo se consideró el 10% del Volumen total (Quipuzco & Baldeón, 2011).

De la ecuación 6, tenemos lo siguiente.

Tabla 22

Volumen del líquido y de gas dentro del biorreactor.

Volumen total del reactor (L)=	1000
Volumen líquido (L)=	800
Volumen biogás (L)=	200

Dentro del volumen líquido, 100L son de inóculo y los 700L restantes de agua.

La cantidad en Kg de excretas a necesitar se halla al aplicar la siguiente ecuación, en la que se asume un 10% de ST.

$$\%ST (\text{Carga diluida}) = \frac{P_{\text{excreta}} * ST_{\text{excreta}}}{P_{\text{excreta}} + W} \dots \dots (9)$$

Donde:

$$\%ST (\text{Carga diluida}) = 0.1$$

$$ST_{\text{excreta}} = 0.79$$

$$W (\text{Cantidad de agua, L}) = 800$$

$$P_{\text{excreta}} (\text{peso de la excreta, Kg}) = ?$$

Reemplazando los datos se obtiene 138 Kg de excretas de cuy.

3.3.3 Carga periódica del biodigestor

Cabe mencionar que, normalmente la alimentación del biodigestor es diaria considerando que se tienen las excretas directamente porque se crían animales. Aunque, en realidad puede ser diaria, semanal o mensual; dependerá principalmente de la disponibilidad del sustrato.

Generalmente se asume un tiempo de retención entre 20 y 55 días (Martí, 2019).

Al utilizar un inóculo se asegura la presencia de poblaciones de microorganismos metanógenos y por consiguiente la digestión anaeróbica bajo estudio se lleva a cabo en un tiempo corto no superior a los 40 días (Cendales, 2011).

De la ecuación 5, tenemos:

$$C = \frac{VI}{TR} \dots \dots (10)$$

Donde:

$$VI \text{ (Volumen líquido, L)} = 800$$

$$TR \text{ (Tiempo de retención hidráulica, días)} = 15$$

$$C \text{ (Carga periódica, Kg)} = ?$$

Reemplazando los datos se obtiene 54 Kg de carga periódica.

Seguidamente se calcula las cantidades de excreta de cuy y agua en la carga periódica según la Tabla 12, tenemos:

$$\text{Relación estiércol de cuy : Agua} = 1:8 - 9 \dots \dots (11)$$

Entonces:

Si la proporción asumida es 1:8, tenemos:

$$\text{Estiércol de cuy (Kg)} = 6$$

$$\text{Agua (L)} = 48$$

Para los cálculos se hace una equivalencia entre 1kg de estiércol y 1 litro de estiércol, asumiendo que el estiércol, sea el que sea, tiene densidad 1kg/l (Martí, 2019).

Figura 25

Instalación final del biodigestor.



Figura 26

Carga de los 100L del inóculo.



Figura 27

Carga de las excretas de cuy.



Figura 28

Biodigestor tubular operativo.



Las nanopartículas fueron agregadas a los 18 días de estar operativo el biodigestor. La cantidad agregada fue de 14.59g lo que vendría ser 18ppm, como primera aproximación a la cantidad óptima de 100ppm que serían 80g (Casals,2014).

Figura 29

Adición de las nanopartículas de Fe_3O_4 en el biodigestor piloto.



3.3.4 Monitoreo del biodigestor piloto.

El arranque del biodigestor se realizó el 14 de mayo del 2024 y se monitoreó diariamente hasta el 14 de junio del 2024.

Los parámetros monitoreados diariamente fueron: pH, Temperatura de ambiente (T_{amb}), Temperatura de invernadero (T_{inv}), Temperatura del líquido dentro del biodigestor ($T_{liq.}$), Presión manométrica del biogás ($P_{man.biog}$). Se realizaron 3 mediciones en el rango de horas desde las 8am hasta las 7pm, y se obtuvo la siguiente información:

Tabla 23*Valores promedios de los parámetros medidos.*

Fecha	pH	Tprom.Inv (°C)	TpromLíqu. (°C)	Pprom.man.biog. (mmbar)	Tprom.amb. (°C)
14/05/2024	6.9	23	21	3	22
15/05/2024	6.9	22	19	2	21
16/05/2024	6.8	24	21	3.5	22
17/05/2024	6.9	26	20	5	22
18/05/2024	7	25	21	4.5	21
19/05/2024	7	24	22	4	21.5
20/05/2024	6.9	22.8	23	2	21
21/05/2024	6.8	22.1	20.8	1.5	21
22/05/2024	7	23.5	19.6	2	22
23/05/2024	7	26	19.3	5	20.5
24/05/2024	6.8	26.5	20	5.5	21
25/05/2024	6.7	27	22	6	21.5
26/05/2024	6.8	26	23	5	21.5
27/05/2024	7	23.1	20	3.5	21.5
28/05/2024	7	22.4	19.8	3.3	21.5
29/05/2024	6.7	24	21	4.5	21
30/05/2024	7	22.3	20	3.5	21
31/05/2024	6.9	20.9	20	2.3	21
1/06/2024	7	23	23	2.5	21
2/06/2024	6.9	22.5	22	2	21.5
3/06/2024	6.8	25.3	18.7	4.5	21
4/06/2024	6.6	24.6	18.8	4	20.5
5/06/2024	7	22.5	19	5	20.5
6/06/2024	6.7	25	20	4	21
7/06/2024	6.9	23.5	23	2.5	21
8/06/2024	7	23	22.5	2	21
9/06/2024	6.8	22.5	22	2	21.5
10/06/2024	6.6	26	18.8	5.5	21.5
11/06/2024	6.7	27	22.1	6	20.5
12/06/2024	7	24.8	20.9	3.5	21
13/06/2024	6.8	25.8	20.4	4.5	21
14/06/2024	6.9	24	23	5	22

Del cuadro anterior obtenemos:

Figura 30

Comportamiento del pH durante los 30 días de monitoreo.

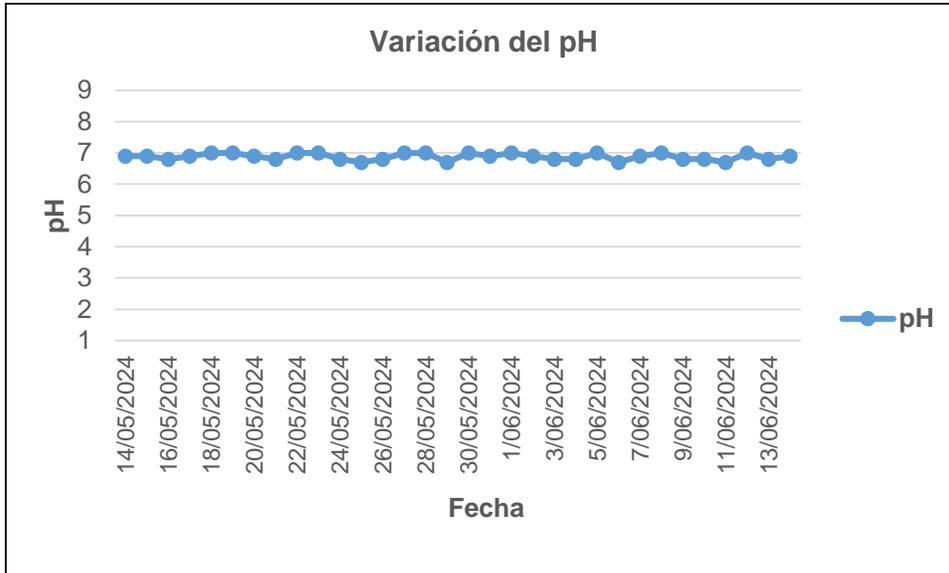


Figura 31

Temperaturas promedio registradas durante los 30 días de monitoreo.

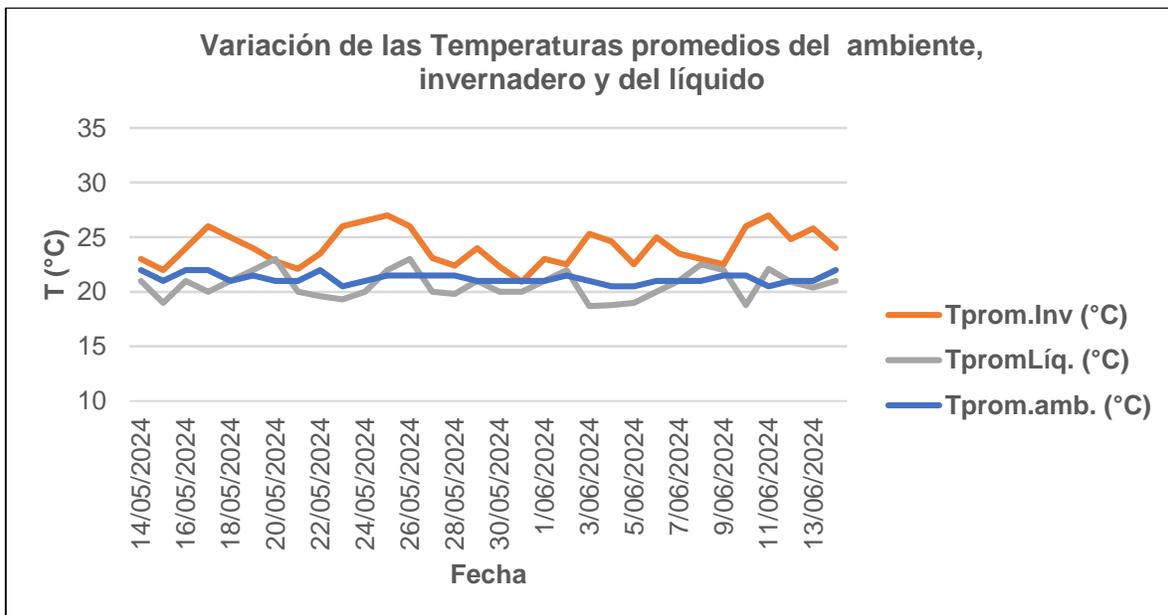
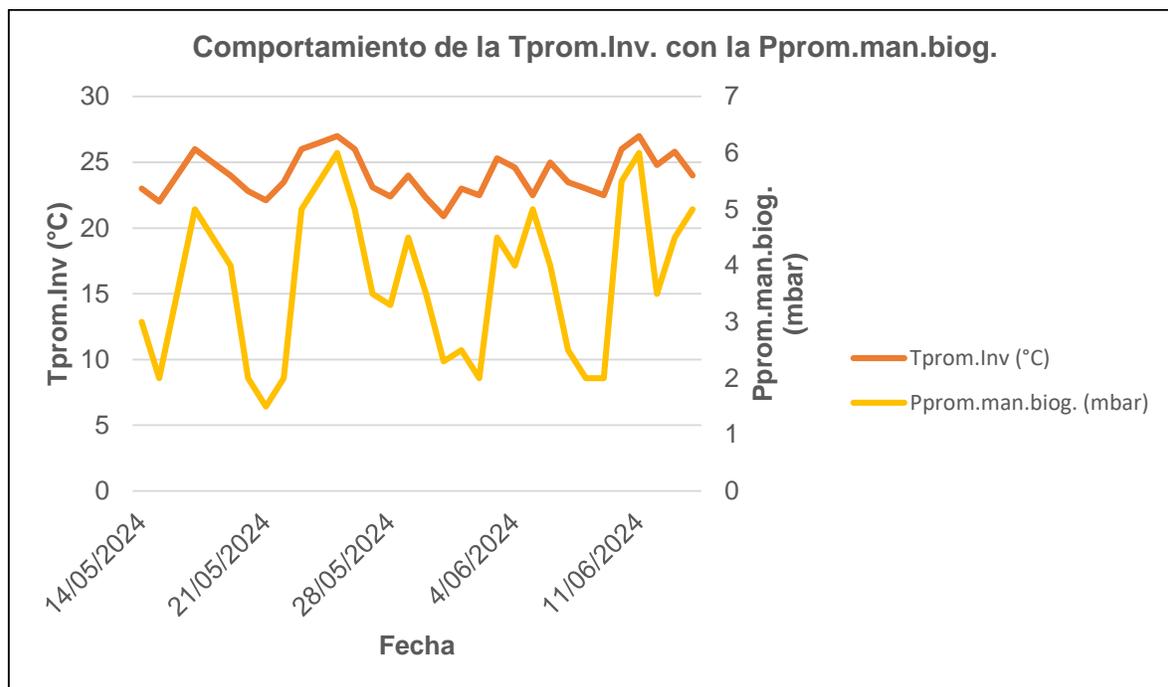


Figura 32

Relación entre la Temperatura promedio del invernadero con la Presión manométrica promedio del biogás.



Dentro de los métodos del cálculo del volumen producido de biogás, se eligió el del gasómetro que consiste en cuantificar las veces que se llena totalmente dicho colector, teniendo éste un volumen preestablecido. En esta investigación se optó por un colector de biogás de capacidad máxima de 500L.

Para calcular el volumen de metano obtenido se tomó una muestra antes de adicionar las nanopartículas de Fe_3O_4 y después de agregarlas; ambas muestras se caracterizaron en la Centro de Investigación del Departamento de Ingeniería Ambiental en la UNALM; el equipo usado fue Multitec® 545. Véase los análisis de ambas caracterizaciones del metano en biogás en el Anexo 6.

Tabla 24

Caracterización del biogás sin nanopartículas de Fe₃O₄ y luego de añadirlas.

FECHAS	COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS					NPs Fe ₃ O ₄
	% CH ₄	% CO ₂	% O ₂	% H ₂ S	ppm CO	
30-May-24	44.2	55	3.1	0.5	500	NO
3-Jun-24	53.9	42	3.3	0.5	108	SI

De la tabla 24, se tiene lo siguiente:

Tabla 25

Volumen de biogás y de CH₄ obtenido.

N° días	Vbiogás (L)	Vbiogás acc(L)	VCH4(L)	VCH4 acc(L)
0	0	0	0	0
6	500	500	221	221
14	500	1000	221	442
22	500	1500	269.5	711.5
31	500	2000	269.5	981

De la Tabla 25 podemos observar lo siguiente:

Figura 33

Cantidad de días en llenar un volumen de 500L de biogás y volumen total acumulado del biogás hasta el término del monitoreo.

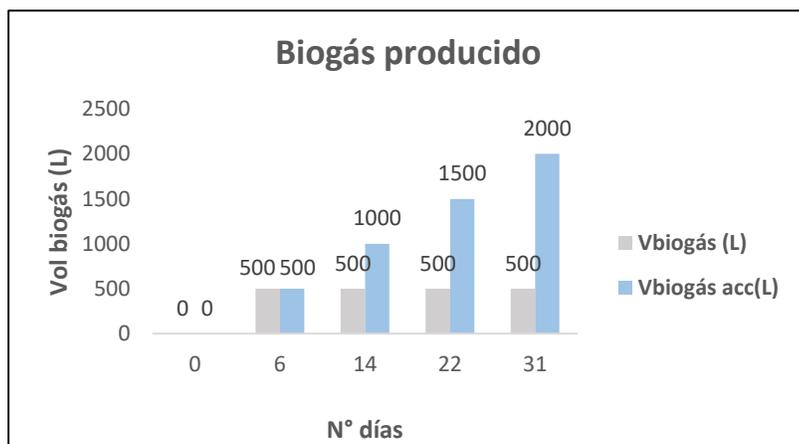
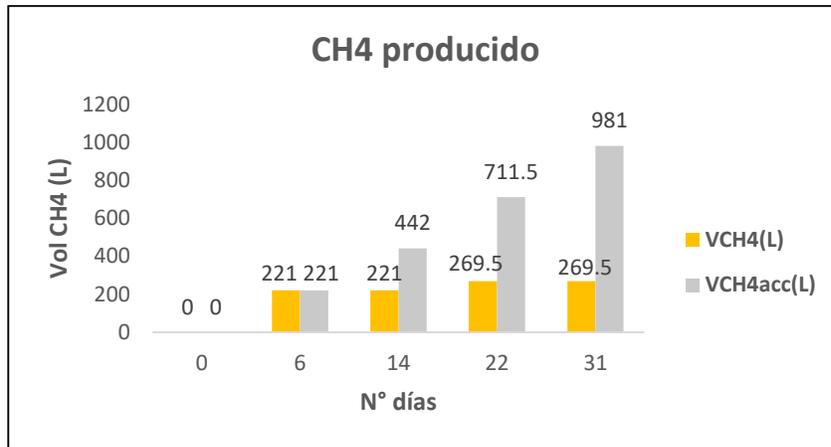


Figura 34

CH₄ por cada 500L de biogás y el total acumulado hasta el término del monitoreo.



Al adicionar las nanopartículas de Fe₃O₄ se observa lo siguiente:

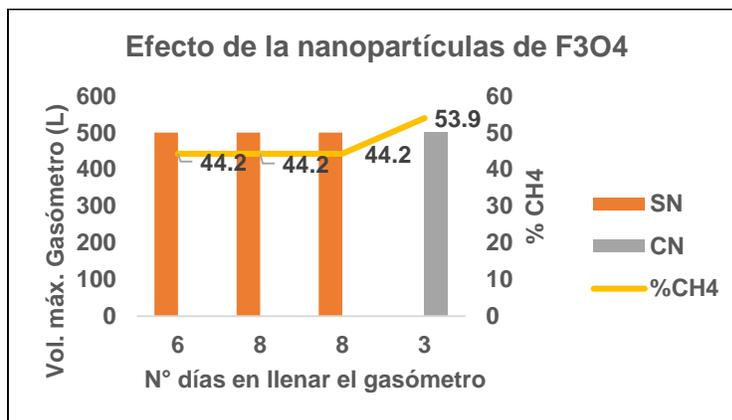
Tabla 26

Cantidad de días al llenar los 500L del gasómetro y calidad del biogás respecto al % CH₄.

N° días	SN	CN	%CH ₄
6	500	0	44.2
8	500	0	44.2
8	500	0	44.2
3	0	500	53.9

Figura 35

Cantidad de días en llenar el gasómetro y calidad del biogás al adicionar las nanopartículas de Fe₃O₄.



Del estudio a nivel laboratorio se obtuvo que con 40mg, cantidad óptima de nanopartículas de Fe_3O_4 (Casals, 2014) añadidas en un volumen líquido de 400mL dio como resultado un incremento en la producción de CH_4 del 61.82%. Además, se calculó que se obtuvo un incremento del 21.94% de CH_4 en el estudio a nivel piloto al añadir 14.59g (18ppm) de nanopartículas de Fe_3O_4 en un volumen líquido de 800L. En consecuencia, se hará una proyección en el estudio piloto para calcular cuánto será el incremento del % de CH_4 al añadir 80g (100ppm) cantidad óptima de nanopartículas de Fe_3O_4 .

Tabla 27

Proyección para hallar el incremento del % de CH_4 al adicionar la cantidad óptima de nanopartículas de Fe_3O_4 en el biodigestor piloto.

	Cant. ópt. NPs Fe_3O_4 (Casals,2014) 100ppm	Volumen liquido	Incremento CH_4 (%)
Escala laboratorio	40mg	400mL	61.82%
Escala piloto	80g	800L	120.30%
	Cant. agreg. NPs Fe_3O_4 (g)	Volumen líquido (L)	Incremento CH_4 (%)
Escala piloto	14.59	800	21.94
	29.18	800	43.88
	43.77	800	65.82
	58.36	800	87.76
	72.95	800	109.70
	80	800	120.30

Figura 36

Extrapolación para hallar el incremento del % de CH₄ con la cantidad óptima de nanopartículas de Fe₃O₄.

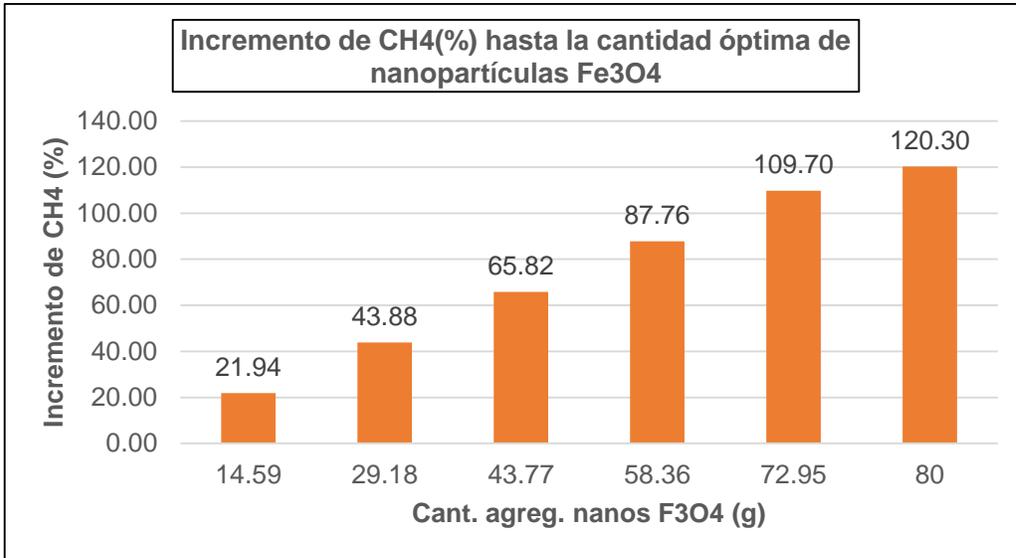


Figura 37

Monitoreo de la temperatura del líquido.



Figura 38

Monitoreo de la Presión manométrica.



Figura 39

Monitoreo de las temperaturas dentro y fuera del invernadero.



Figura 40

Gasómetro de 500L en su máxima capacidad.



Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

- En la síntesis y caracterización de las nanopartículas de Fe_3O_4 , se identificó el método de poliol como el más accesible y mediante la caracterización por DLS se confirma que tienen tamaño nanométrico. la cantidad escalada para el nivel piloto resultó como producción máxima de 14.59g; esto debido a los materiales y equipos disponibles. Esto significa que para obtener la cantidad óptima de nanopartículas de Fe_3O_4 para el piloto se necesitarían aproximadamente seis lotes de producción usando los mismos materiales y equipos, es decir en total sería 80g.
- El test de Actividad Metanogénica Específica (AME) que corresponde al estudio nivel laboratorio, se realizó como primera aproximación con 3 reactores de 500mL cada cual, y se obtuvo 75.95% de biodegradabilidad con la excreta de cuy, lo que significa que es válido ya que, se obtuvo un valor mayor del 60% de biodegradabilidad.

Por otro lado, al adicionar las nanopartículas de Fe_3O_4 a uno de los 3 reactores se obtuvo una eficiencia del 161.82% de producción de CH_4 , lo cual es una evidencia favorable de la interacción de las NPs de magnetita con los microorganismos metanogénicos.

Esto se debe principalmente a que las nanopartículas de magnetita favorecen la Transferencia Directa de Electrones entre las especies; también se menciona que actúa como un nutriente más para el desarrollo del consorcio bacteriano en la metanogénesis, dando como resultado mayor calidad en el biogás con un mayor porcentaje en la cantidad de metano.

- A nivel piloto, el monitoreo fue realizado en un tiempo bastante corto de 30 días; se obtuvo un biogás, sin nanopartículas de magnetita, con un 44.2% de CH_4 y luego de

añadir las nanopartículas de magnetita se obtuvo un biogás de mejor calidad con 53.9%.

Otro detalle que mencionar es el efecto de las manos en la cinética bioquímica del consorcio bacteriano ya que, en menor cantidad de días, es decir en 5 días menos, se obtuvo el llenado total del gasómetro después de agregar las nanopartículas de Fe_3O_4 .

Asimismo, el incremento del % de CH_4 calculado con la proyección de la cantidad óptima de nanopartículas de magnetita agregada al biodigestor fue de 120.3% lo cual es realmente significativo.

- Al evaluar los parámetros para estabilizar el proceso de la degradación anaeróbica; en la Figura 30 se observa como varía el pH en el tiempo y se obtuvo que el mínimo valor fue de 6.6 y el máximo valor de 7, estos valores se encuentran entre la escala de pH de 6 a 8, que es el rango adecuado para el desarrollo de las bacterias.
- El establecer los parámetros operacionales del biodigestor piloto se observa que en la gráfica de la Figura 31, la temperatura del invernadero siempre fue mayor que la temperatura del ambiente en unos 3 a 4°C. También, se observa que la temperatura del líquido en promedio fue de 19 °C; y por último es relevante destacar la relación directa de la Temperatura del invernadero con la Presión manométrica, que se evidencia en la Figura 32.

Conclusiones

- El método hallado más accesible para sintetizar las NPs Fe_3O_4 fue el método de poliol. La caracterización de las nanopartículas de magnetita por DLS (Dispersión dinámica de luz) confirma que el tamaño es nanométrico y tiene un valor medio de 34.03 nm. Este resultado sin duda alguna es fundamental como bien lo refiere Vega (2020), indicando que se puede aprovechar las propiedades únicas presentes en los nanomateriales que dependen de las dimensiones y formas de estos, además porque siendo nanopartículas tienen una alta fracción de sus átomos totales en la superficie de la partícula y una gran área de superficie por unidad de volumen, esto significa que, la naturaleza química y el tamaño de las nanopartículas controlan el potencial iónico o de afinidad de electrones y de esta manera, las propiedades de transporte de electrones.
- El estiércol de cuy es una alternativa prometedora al biogás. En el estudio a nivel laboratorio (Test AME) el volumen de metano producido con nanopartículas de magnetita fue de 373,8 ml y 231ml sin las nanopartículas de magnetita. Además, se obtuvo un porcentaje de biodegradabilidad del 75,95% y al añadir las nanopartículas de magnetita la producción de biogás aumenta en un 61,82%.
- Al adicionar la cantidad óptima de NPs Fe_3O_4 en el biodigestor piloto de 1m^3 , se obtiene un incremento del 120.3 % del CH_4 en el biogás producido; asimismo afecta positivamente a la cinética bioquímica de las bacterias metanogénicas por lo que se obtiene biogás en menos tiempo.

Por tanto, con nanopartículas de magnetita se logró la optimizar la digestión anaerobia relacionado con la velocidad de producción de biogás y en la calidad del biogás en el tiempo.

- Otro parámetro fundamental en la digestión anaerobia es el pH y debe encontrarse dentro del rango óptimo requerido que va de 6 a 8, esto es esencial para el desarrollo de los microorganismos y por ende de la obtención de biogás eficientemente.
- Como parámetro operacional del biodigestor piloto, la temperatura dentro del invernadero debe permanecer dentro del rango mesofílico que va 20°C a 40°C para asegurar de esa manera su desempeño óptimo.

Recomendaciones

- Se mencionó anteriormente que la cantidad de magnetita sintetizada fue escalada por diez debido a los materiales y equipos disponibles. Se sugiere mayor capacidad en materiales y equipos para que ello no fuese una limitante.
- Es crucial referir, que en el mercado actual de la investigación se ofrecen sistemas de Actividad Metanogénica Específica (AME) con determinados diseños preestablecidos, esto asegura que el tema de la hermeticidad no sea una dificultad como lo fue en esta investigación ya que tomó muchos meses de prueba para asegurar la hermeticidad del sistema.
- Una sugerencia clave relacionado a la prefabricación de un biodigestor de geomembrana de PVC, por una determinada empresa, es la certificación de la prueba de fugas o hermeticidad de 48 horas. Para evitar que el biodigestor entregado no funcione correctamente debido a micro fugas detectadas como resultó ser el caso de este proyecto de tesis, lo que conllevó a más de 6 meses para solucionar dicho tema, volviendo a comprar otro biodigestor sin fugas a otra empresa.
- Se recomienda proteger térmicamente el biodigestor piloto con un invernadero completamente cerrado, de modo que se incremente la temperatura de trabajo del biodigestor hasta en 10°C, y en consecuencia asegurar que el proceso de digestión anaerobia sea mesofílico.
- Las mediciones realizadas en el monitoreo piloto pueden mejorarse al usar equipos más sofisticados de medición, ya sea una termocupla conectada a un microcontrolador de placa arduino, etc. De esta manera se tendría mayor control de los parámetros operacionales del biodigestor piloto.

Referencias Bibliográficas

- Alrikabi, N. K. M. A. (2014). *Renewable Energy Types. Journal of Clean Energy Technologies*, 2(1), 61-64. Recuperado de <https://www.jocet.org/papers/092-J30008.pdf>
- ASTM: *Standard Test Method for Determining the Anaerobic Biodegradation Potential of Organic Chemicals*. (1992) En: American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- Baek, G., Kim, J., & Lee, C. (2019). *A review of the effects of iron compounds on methanogenesis in anaerobic environments. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113(July), 109282. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109282>
- Baumann, U., Müller, M. (1997). *Determination of anaerobic biodegradability with a simple continuous fixed-bed reactor*. En: *Wat. Res.* 31, p. 1513–1517
- Botero, R., Preston, R. (1987). *Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. Manual para su instalación, operación y utilización*. Escuela de agricultura de la Región Tropical Húmeda – Universidad EARTH. San José, Costa Rica, 20p.
- Cai, W., Wan, J. (2007). Facile synthesis of superparamagnetic magnetite nanoparticles in liquid polyols. En *Journal of Colloid and Interface Science* 305.366 -370. Recuperado de <https://doi:10.1016/j.jcis.2006.10.2023>
- Cairampoma, G. (2017). *Propuesta de generación de energía eléctrica mediante biogás obtenido por la materia orgánica del relleno sanitario Santa Cruz - Concepción*.

Ingenium vol.2 (1) enero-junio 2017. Recuperado de <https://idoc.tips/revista-ingenium-vol-1-pdf-free.html>

Campos, J.C. (2000). *Herramientas para Establecer un Sistema de Gestión Total Eficiente de la Energía*. Diplomado En Gestión Energética, Universidad Del Atlántico, Barranquilla, Colombia.

Casals, E., Barrena, R., García, A., González, E., Delgado, L., Busquets-fité, M., Puentes, V. (2014). *Programmed Iron Oxide Nanoparticles Disintegration in Anaerobic Digesters Boosts Biogas Production*. (14), 2801–2808. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/sml.201303703>

Casanovas, G., Della Vecchia, F., Reymundo, F., Serafini, R. (2019). *Guía teórico – práctico sobre el biogás y los biodigestores*.

Castells, X. E., Ripoll, X. F., & Pozuelo, E. C. (2012). *Procesos biológicos. La digestión anaerobia y el compostaje: Tratamiento y valorización energética de residuos*. Ediciones Díaz de Santos.

CIDELSA, Comercial Industrial Delta S.A. (2024, mayo). Biodigestores productivos: Energía y fertilizantes. CIDELSA. <https://www.cidelsa.com/es/lp/biodigestores-productivos/>

Cendales, E. D. (2011). *Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional UNAL: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7658>

Coelho, M. (2024,16 de mayo). *Generación de biogás y biometano a partir del biogás en Brasil*. [Presentación oral online]. Potencial y perspectivas de Biodigestores para la

Producción de Bioenergía y Biofertilizantes: Experiencias en Perú y Brasil, Lima, Perú.

Chernicaró, C. A. de L. (2007). *Biological Wastewater Treatment. Anaerobic Reactors*. Vol. 4. Iwa Publishing. ISBN: 1 84339 164 3

Doran, P. (1995). *Bioprocess Engineering Principles*. Elsevier. ISBN 0080528120, 9780080528120

El-Mashad, H., Zeeman, G., Wilko, K., Bot, G., Lettinga, G. (2004). *Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure*. En: *Bioresource technology* 95, p. 191-201

Fannin, K. (1987). *Start-up, operation, stability, and control in Anaerobic digestion of biomass*. En: *Elsevier applied science* 29, p. 101-1062

FAO (1986). *Reciclaje de Materias Orgánicas y Biogas. Una experiencia en China. Curso de capacitación*. Chengdu, China, (Septiembre – Octubre, 1984). 400pp.

Feldman, C. (2005). *Polyol-mediated synthesis of nanoscale functional materials, Solid State*. *Sci.* 7 (2005) 868-873. doi:10.1016/j.solidstatesciencias.2005.01.018.

Feldman, C., Jungk, H.O. (2001) *Polyol-Mediated Preparation of Nanoscale Oxide Particles, Angew Chemie Int Ed.* 40. 359-362. doi:10.1002/1521-3773(20010119)40:2<359::AID-ANIE359>3.3.CO;2-2.

Feldman, C. (2003). *Polyol-Mediated Synthesis of Nanoscale Functional Materials, Adv Funct Mater.* 13. 101-107. doi:10.1002/adfm.200390014.

Gabriel, D., & Sierra, H. (2017). *Purificación y usos del biogás*. Universidad Autónoma de Barcelona. ISBN 978-84-490-6961-1. Producción de gas y saneamiento de

efluentes

Guevara, V. A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. Documento OPS/CEPIS/96. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente – Organización Panamericana de la Salud. Lima, 80p.

Hilbert, J., Eppel, J. (2007). *Desafíos y Estrategias para Implemetar la Digestión Anaeróbica en los Agrosistemas*. Argentina.

Hobbs, P.; Holliman, P. & Jones, D. (2008). *Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources*. En: *Bioresource Technology* 99, p. 7928-7940

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007, octubre). Biomasa: Digestores anaerobios. IDAE.
https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_digestores_anaerobios_a2007_0d62926d.pdf

Islas, S. J., & Martínez, J. A. (2010). Bioenergía. *Revista ciencia*, 30 – 39.
https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/61_2/PDF/Bioenergia.pdf

Jangid, S., & Sabir, M. (2017). Renewable energy and other alternative energy sources: A review. *International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electronic Engineering (IJRMEE)*. ISSN: 2349-7947. Volume 4, Issue: 7, 53-56.
<https://www.ijrmee.org/index.php/ijrmee>

Kinyua, M. N., Rowse, L. E., & Ergas, S. J. (2016). *Review of small-scale tubular anaerobic digesters treating livestock waste in the developing world*. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 896–910.

Koster, I. (1984). *Liquefaction and acidogenesis of tomatoes in an anaerobic two-phase solid-waste treatment system*. En: *Agric Wastes* 11, p. 241-252.

- Lee, Y.J., & Lee, D.J. (2019). *Impact of adding metal nanoparticles on anaerobic digestion performance – A review. Bioresource Technology, 292*, 121926. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121926>
- Li, H., Han, K., Li, Z., Zhang, J., Li, H., Huang, Y., Wang, Y. (2018). *Performance, granule conductivity and microbial community analysis of up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors from mesophilic to thermophilic operation. Biochemical Engineering Journal, 133*,59–65. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.01.029>
- Li, Y., Chen, Y., & Wu, J. (2019). *Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review. Applied Energy, 240*(January), 120–137. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>
- Lu, A.H.; Salabas, E.L.; Schüth, F. (2007). *Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application, Angew Chem Int Ed Engl. 46* 1222-1244. doi:10.1002/anie.200602866
- Madigan, M., Martinko, J., Parker, J. (1999). *Biología de los microorganismos 10 edición*. Illionis: Pearson – Prentice hall.
- Martí, J. (2019). *Biodigestores Tubulares: guía de diseño y manual de instalación*. Redbiolac. Ecuador. ISBN: 978-9942-36-276-6. Recuperado de <https://redbiolac.org/publicaciones-1>
- Mazumdar, A. (1982). *Consolidation of Information: Biogas Handbook*, París: United Nations Educational Scientific and Cultural Organization.
- Molnar, L. & Bartha, I. (1989). *Factors influencing solid-state anaerobic digestion*. En: *Biol. Wastes 28*, p. 15 – 24

Monroy, O.A. (1998). Modelamiento y control de un sistema de digestión anaerobia en dos etapas. Tesis doctoral. UNAM. México.

Moreno, M. T. V. (2011). *Manual de biogás. In Proyecto CHI/00/G32 “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con energías Renovables”* (Vol. 64). Recuperado de <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2017). *La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático*. Osinergmin. <https://pdfcookie.com/documents/osinergmin-energia-renovable-peru-10anios-ov14d94zw6v1>

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2019). *Energías renovables: experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética*. Osinergmin. https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Osinergmin-Energias-Renovables-Experiencia-Perspectivas.pdf

Pavlostathis, S., Giraldo-Gómez, E. (1991). *Kinetics of anaerobic treatment: a critical review*. En: *Critical reviews in environmental Control* 21, p. 411-490.

Peña, J. (2024, 16 de mayo). *Avances tecnológicos en el empleo de la digestión anaerobia en la región Arequipa*. [Presentación oral online]. Potencial y perspectivas de Biodigestores para la Producción de Bioenergía y Biofertilizantes: Experiencias en Perú y Brasil, Lima, Perú.

Poul, L. (2015). *Synthesis, characterization and applications of iron oxide nanoparticles - A short review*. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 7(3), 267–276. Recuperado de <https://doi.org/10.5028/jatm.v7i3.471>

- Posada L., Mosquera S. (2007). *Biodegradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales de una empresa de pinturas*. Tesis presentada para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería de Procesos. Escuela de Ingeniería. Universidad EAFIT, Medellín.
- Prescott, L., Harley, J., Klein, D. (2002). *Microbiology* 5th edition. New York: McGrawHill
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2024, junio). *Objetivos de desarrollo sostenible*. PNUD. <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>
- Quipuzco L., Baldeón W. (2011). *Desempeño de un biodigestor cargado con lodo séptico y excreta de cuy para la producción de biogás y biol*.
- Rojas J. (2015). *Evaluación de la producción de biogás por medio de la biodigestión anaerobia semicontinua utilizando residuos del beneficiado del café como sustrato*. Tesis presentada para optar por el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Agrícola. Escuela de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Costa Rica.
- Salinas C. E., & Gasca Q. V. (2009). Los biocombusibles. *El Cotidiano*, núm. 157, 75 – 82. <https://www.redalyc.org/pdf/325/32512739009.pdf>
- Sanders, W., Angelidaki, I. (2004). *Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants*. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 3: 117–129.
- Siles, J., Li, Q. & Thompson, I. (2010). *Biorefinery of waste orange peel*. En *Crit. Rev. Biotechnol.* 30, p. 63 – 69
- Schink, B. (1994). *Diversity, ecology and isolation of acetogenic bacteria*. In Drake, H.L. (ed) *Acetogenesis*, Chapman y Hall, New York, NY., pp 211-212.

- Schmerler D, Velarde J. C., Rodríguez A., Solís B. (2019) *Energías renovables: experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética*. Organismo Supervisor de la Inversión en energía y Minería. Osinergmin, 2019.
- Stams, A. (1994). *Metabolic interactions between anaerobic bacteria in methanogenic environments*. En: Antonie van Leeuwenhoek. 66, p. 271-294.
- Taramona, L. A. (2014). *Producción de biogás en digestor tubular para la sostenibilidad energética y mejorar la calidad de vida en el distrito de Chilca – Cañete. Región Lima*.
- Tauseef, S.M., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S.A. (2013). *Methane capture from livestock manure*. Journal of Environmental Management, pp. 187-207
- Torres P., Pérez A. (2010). *Actividad Metanogénica Específica (AME): Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales*.
- Universidad Católica de Santa María (2018, marzo). *UCSM desarrolla planta que producirá combustible ecológico para maquinaria agrícola y vehículos*. UCSM <https://ucsm.edu.pe/ucsm-desarrolla-planta-que-producira-combustible-ecologico-para-maquinaria-agricola-y-vehiculos>
- Valle, U. (2010). *Actividad Metanogénica Específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales*. Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente, (9), 5-14.
- Varnero, M. (2011). *Manual de Biogás*. ISBN 978-95-306892-0. Gobierno de Chile: Ministerio de Energía. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

- Vásquez, L., Tamayo, J., Salvador, J. (2017). *La industria de la energía renovable en el Perú: 10 años de contribuciones a la mitigación del cambio climático*. Osinergmin.
- Veeken, B., Hamelers, B., Johansen, K. (1999). *Effect of temperature on hydrolysis rate of selected biowise components*. En: *Bioresour Technol* 69, p. 249-254.
- Vega, J. (2020). *Influencia de los parámetros experimentales de síntesis en la formación de nanopartículas de magnetita preparadas por método poliol* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional UNI. <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/21490>
- Wellinger, A., & Lindberg, A. (2000). *Biogas Upgrading and Utilisation*. IEA Bioenergy, Task 24: Energy from biological conversion of organic waste. [http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/5C49723EF624C237C125753F005B4AEF/\\$FILE/IEA%20UPGRADING%20AND%20UTILISATION%20OF%20BIOGAS.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/5C49723EF624C237C125753F005B4AEF/$FILE/IEA%20UPGRADING%20AND%20UTILISATION%20OF%20BIOGAS.pdf)
- Ward, A., Hobbs, P., Holliman, P., Jones, D. (2008). *Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources*. En: *Bioresource Technology* 99 (2008), p. 7928–7940
- Werner U., Stohr U., Hees N. (1989). *Biogas plants in animal husbandry*. A Publication of the Deutsche Zentrum für Entwicklungstechnologien GATE, a Division of the Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- Zhang, Y., Yang, Z., Xu, R., Xiang, Y., Jia, M., Hu, J., Cao, J., (2019). *Enhanced mesophilic anaerobic digestion of waste sludge with the iron nanoparticles addition and kinetic analysis*. *Science of the Total Environment*, 683, 124–133. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.214>

Anexos

Anexo 1: Materiales, reactivos y equipos por el método de poliol.....	1
Anexo 2: Costo de materiales y mano de obra del biodigestor tubular piloto.....	2
Anexo 3: Diagrama de flujo del proceso del método de poliol.....	4
Anexo 4: Caracterización por DLS de las nanopartículas.....	5
Anexo 5: Planos del biodigestor piloto y del invernadero.....	6
Anexo 6: Análisis de la caracterización de la alimentación, antes de la dilución.....	8
Anexo 7: Análisis del % en Volumen del CH ₄ en biogás con y sin nanopartículas de Fe ₃ O ₄	11
Anexo 8: Póster presentado y expuesto en la 49th IUPAC World Chemistry Congress. The Hague, The Netherlands 20 – 25 agosto,2023.....	13

Anexo 1: Materiales, reactivos y equipos del método de poliol

MATERIALES
1 vaso de precipitado de 25 mL.
1 cucharas de metal de laboratorio
Parafilm
Tijera
Balón de tres bocas con tapas
Pastilla magnética
Termómetro de rango > 280
Recipiente para baño maría
Tiras indicadoras de pH
Aceite
Probeta

REACTIVOS
Trietilenglicol (TEG)
Nitrato de hierro (III) $\text{FeNO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
Acetato de etilo ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)
Etanol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$)

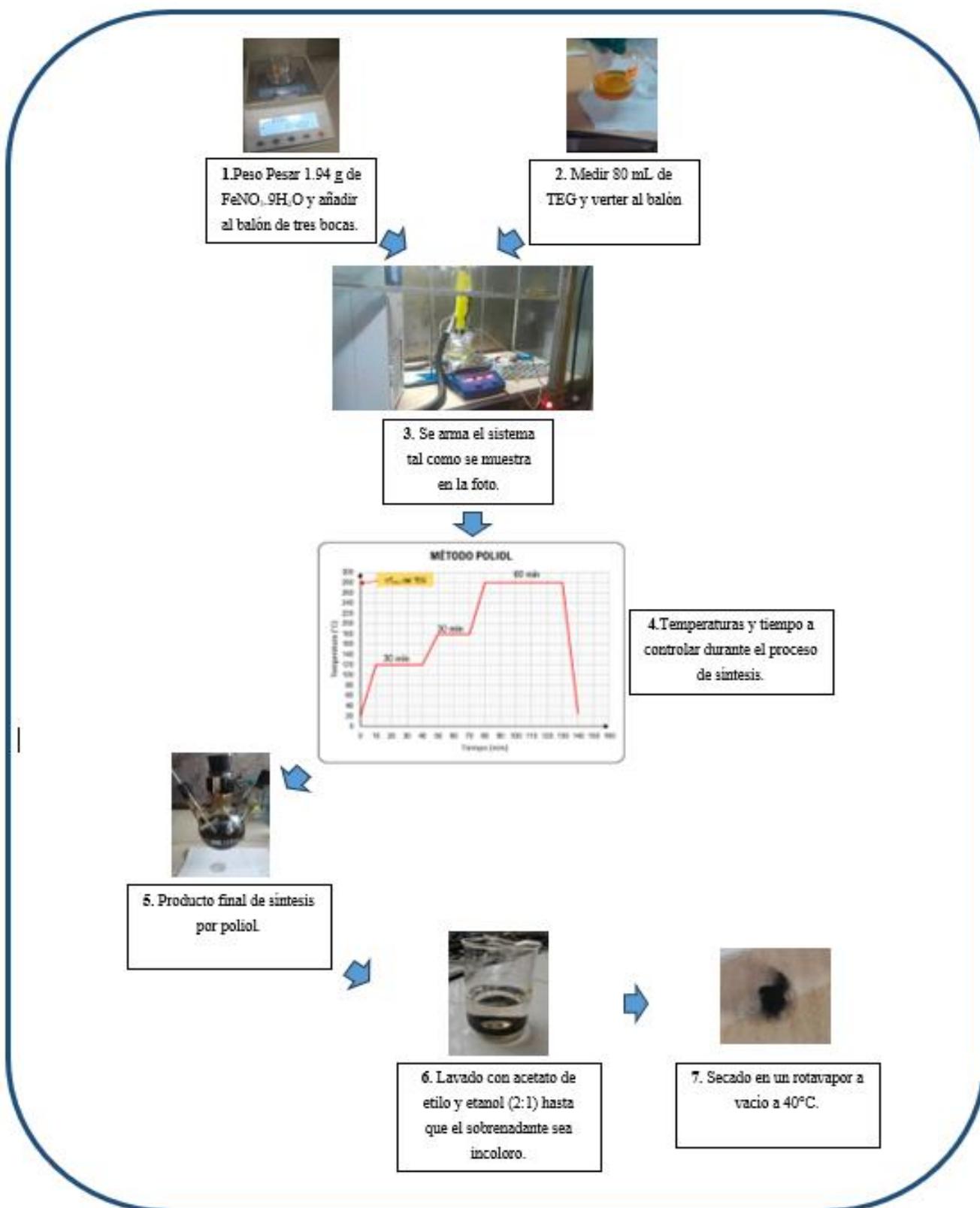
EQUIPOS
Balanza digital
Placa calefactora con agitación que llegue a 280°C
Horno de vacío
Balón de nitrógeno
Chiller

Anexo 2: Costo de materiales y mano de obra del biodigestor tubular piloto.

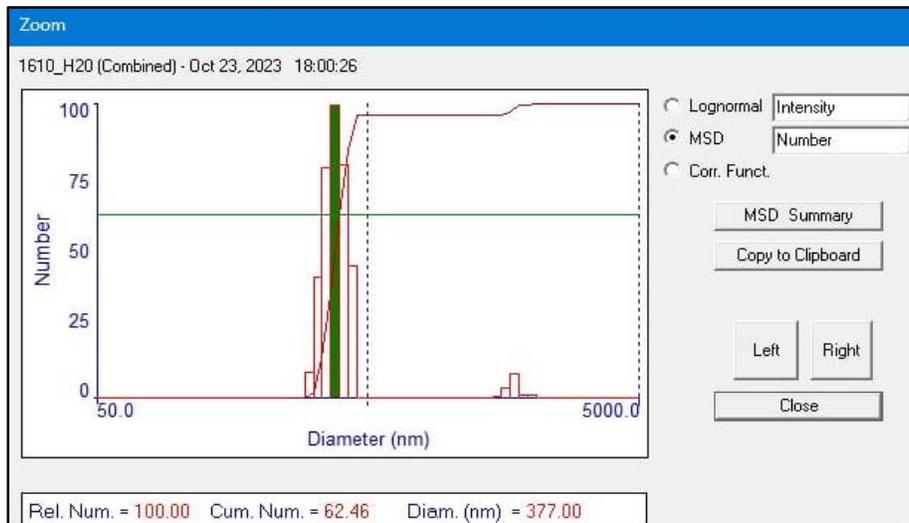
COMPONENTE	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (S/.)	COSTO TOTAL (S/.)
Zanja			
Sacos de arena	10	10	99,00
Plástico negro	5 m	8	40,00
Pico	3	67	200,70
Pala	2	20	39,80
Tecnopor	3	55	165,00
Flexo	2	17	34,00
Biodigestor			
Geomembrana de PVC prefabricado	1	850	850,00
Tubería de desagüe de PVC	3 metros que se dividirá en 2 piezas de 1.5m, una para la entrada y otra para la salida.	35	34,70
Liga de cámara de neumático (también llamada boya o tubo)	Dos cámaras de aro 14 o 16. O 30 a 40m de liga de neumático ya cortada.	16	63,60
Adaptador de tanque en PVC o polipropileno (también llamado flange, pasamuros o brida)	1	2	2,30
Tubería de agua	3 metros	23	22,90
Accesorios PVC	Los que haga falta para unir el adaptador de tanque con la Tee de la válvula de alivio.	50	50,00
Cuerda	2.5 veces en metros la longitud del biodigestor. $L = 2.5 \times 9.5 = 23.75m$	2	45,60
Teflón	5	2	7,50
Válvula de alivio	Se requiere al menos de una Tee, una pieza de tubería de 30cm, una botella de 2L de refresco vacía, y una llave de paso plástica. Considerar los accesorios necesarios para ajustar la tubería o manguera que viene del adaptador de tanque.	7	7,00
Manómetro	2	65	130,00

Conducción de biogas			
Tubería de agua	Tantos metros como haga falta para llevar el biogás desde el biodigestor al punto de consumo.	23	68,70
Llaves de bola	Mínimo 2	9	17,60
Tee	Mínimo 1	3	3,30
Codo	Mínimo 1	2	2,20
Unión Universal	Mínimo 1	5	5,20
Teflón	1 o 2, dependiendo de los accesorios de rosca que se usen.	2	3,00
Cocina	Se recomienda dos hornillas o quemadores.	120	119,90
Reservorio de PVC	Un reservorio que es la mitad del volumen del biodigestor.	650	650,00
Terraja (si se va a usar tubería de riego de polietileno o de PVC roscable)	1	37	37,30
Pegamento PVC (si se va a usar uniones de presión flex, para las abrazaderas)	4	13	50,00
Instalación incluido el invernadero y caseta para el reservorio			
Tijera (o navaja cutter)	2	7	13,00
Sierra de metal (para cortar las tuberías)	1	17	16,90
llave stilson (llave de tubo o de pico)	2	33	65,80
Marcador (rotulador)	1	6	5,90
Sacos arena gruesa	5	4	20,00
Cemento	2	21	42,00
Vigas de madera	12	55	660,00
Techo traslúcido	14	35	490,00
Plástico transparente	8	10	80,00
Bidón de 120L	1	145	145,00
Bidón de 50L	50	50	50,00
Mano de obra	4	100	400,00
Costo Total			4737,90
(s/.) =			

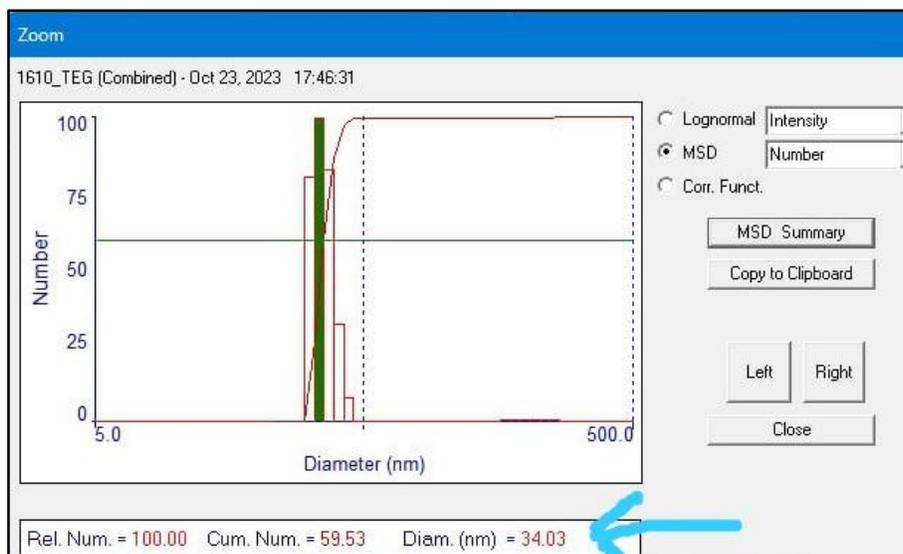
Anexo 3: Diagrama de flujo del proceso del método



Anexo 4: Caracterización por DLS de las nanopartículas de Hierro

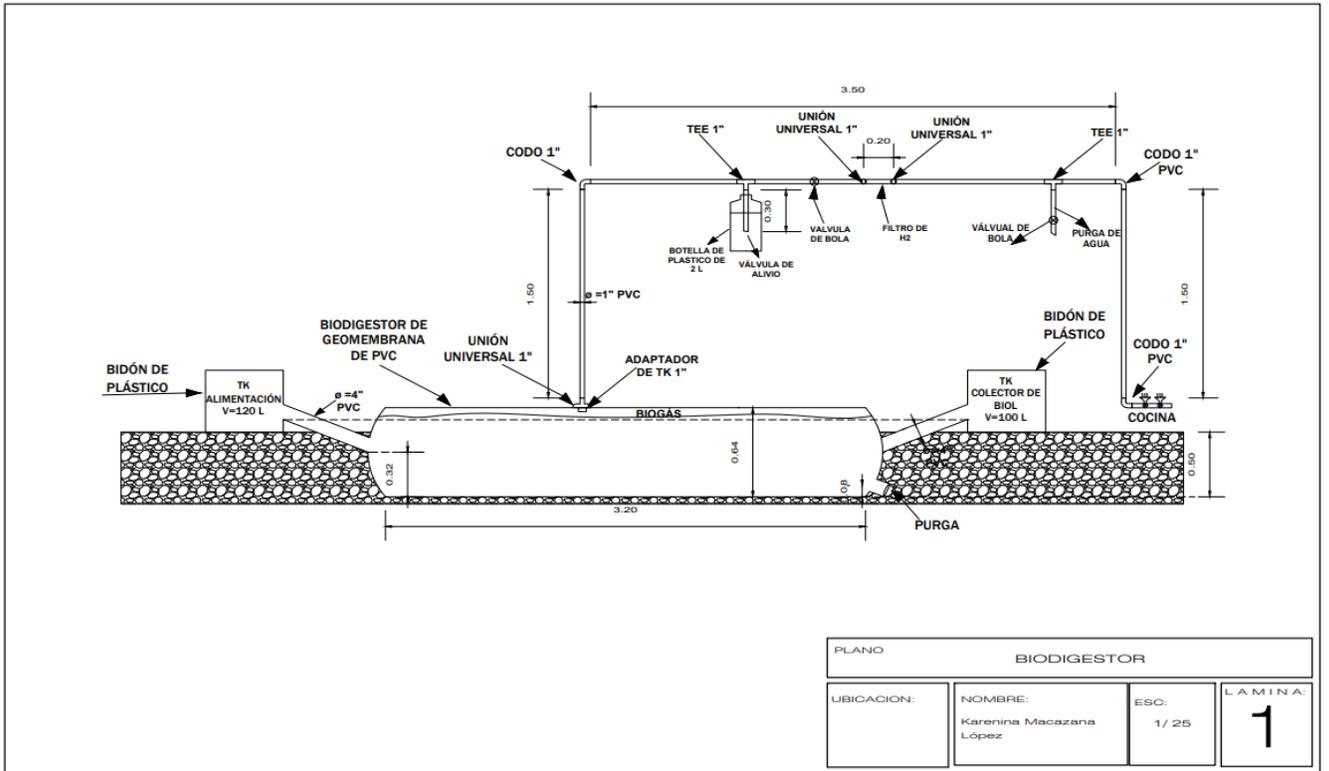


Caracterización por DLS de las nanopartículas en disolución acuosa. Dando como resultado un diámetro de 377nm.

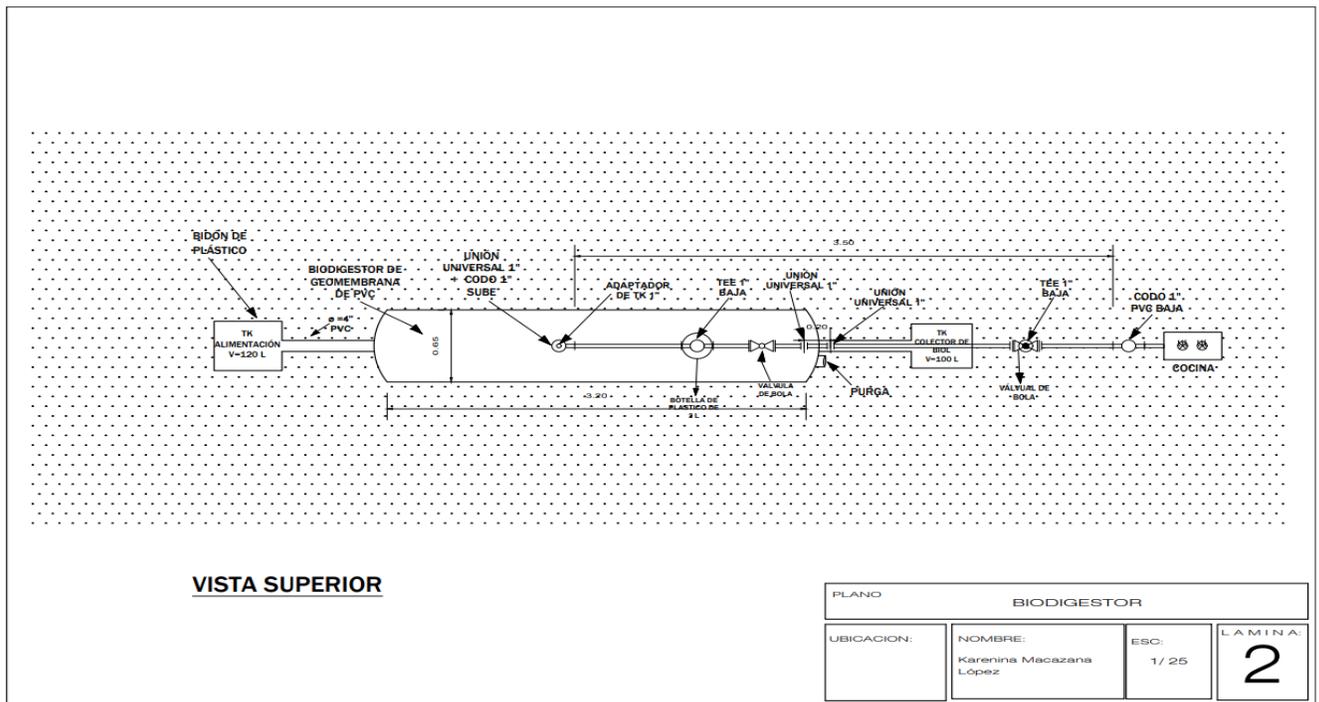


Caracterización por DLS de las nanopartículas en Trietilenglicol (TEG). Se obtuvo un resultado de un diámetro de 34.03nm.

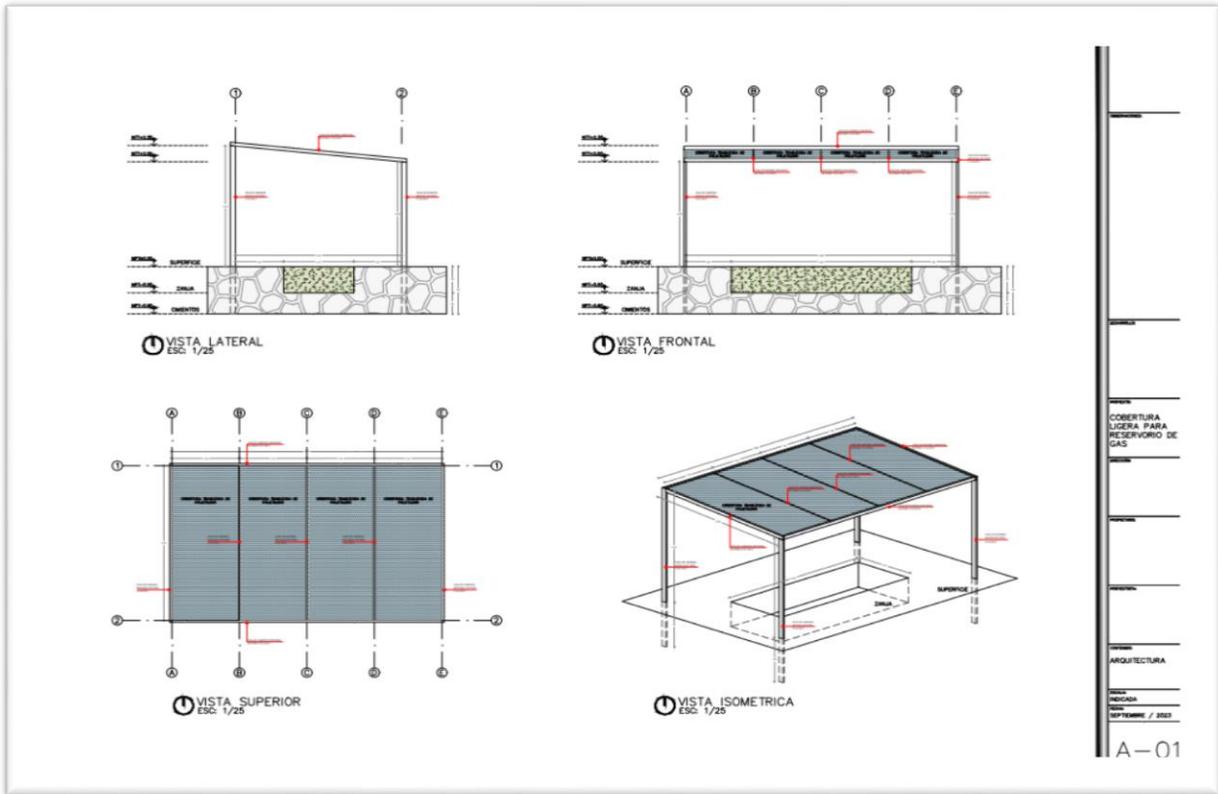
Anexo 5: Planos del biodigestor piloto y del invernadero.



Vista frontal del biodigestor.



Vista superior del biodigestor.



Plano del techo del invernadero.



Fotos en 3D del techo del invernadero

Anexo 6: Análisis de la caracterización de la alimentación, antes de la dilución.

INFORME DE ANALISIS ESPECIAL DE MATERIA ORGANICA

SOLICITANTE : ROSA LEIDY FLORES VARGAS
PROCEDENCIA : LIMA/ LIMA/ PACHACAMAC/ FUNDO CASA BLANCA
MUESTRA DE : EXCRETAS DE CUY
REFERENCIA : H.R. 82667
BOLETA : 11335
FECHA : 16/05/2024

Nº LAB	CLAVES	N %	C %	Relación C/N	Humedad %
241		1.89	38.77	20.46	13.64

*Dra. Lily Tello Peramás
Jefa de Laboratorio*

**INFORME DE ENSAYO
IE-2024-1034**

1. DATOS DEL CLIENTE

1.1 Cliente : UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA UNI
1.2 RUC o DNI : 20169004359
1.3 Dirección : AV. TUPAC AMARU 210, RIMAC 15333

2. DATOS DE LA MUESTRA

2.1 Producto : RESIDUOS ORGÁNICOS
2.2 Muestreado por : CLIENTE ¹⁴
2.3 Número de Muestras : 01
2.4 Fecha de Recepción : 2024-05-14
2.5 Período de Ensayo : 2024-05-15 al 2024-05-16
2.6 Fecha de Emisión : 2024-05-16
2.7 Fecha y Hora de Muestreo : No Precisa
2.8 N° de cotización : COT-121310-SL24

3. ENSAYO SOLICITADO - METODOLOGÍA UTILIZADA

ENSAYO	MÉTODO
<u>Sólidos Totales</u>	Análisis gravimétrico

4. RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA: EXCRETAS DE CUY. ¹⁴



Diego Benavente
DIEGO BENAVENTE BENAVENTE D'AMBRIS
químico
CQP. 1337

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS DE SÓLIDOS TOTALES

Tabla N°1: RESULTADOS OBTENIDOS

Código de Laboratorio	Parámetro	Unidad	LCM	Resultados
S-1952	SÓLIDOS TOTALES	%	0.01	79.42

Leyenda

LCM: Límite de Cuantificación de Método.

↗ Información suministrada por el cliente.

- 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 cómo 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.
- El muestreo está fuera del alcance de acreditación.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo.
- Este laboratorio está acreditado de acuerdo con la norma internacional reconocida ISO / IEC 17025. Esta acreditación demuestra la competencia técnica para un alcance definido y el funcionamiento de un sistema de gestión de calidad de laboratorio.

Laboratorio de ensayo e investigación

FIN DE DOCUMENTO

Anexo 7: Análisis del % en Volumen del CH₄ en biogás con y sin nanopartículas de Fe₃O₄.

	UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE CIENCIAS LABORATORIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL	
ANÁLISIS DE MUESTRA <u>LIAM/006-24</u>		
SOLICITANTE: Karenina Macazana López		
PROCEDENCIA DE MUESTRA:		
Dist.: Rimac Prov.: Lima Región: Lima.		
MUESTRA DECLARADA: Muestra de biogás a partir de excretas de cuy		
FECHA DE COLECCIÓN DE MUESTRAS: 30/05/2024		
FECHA DE RECEPCION: 31/05/2024		
MÉTODO DE ANÁLISIS: Directo		
Equipo: Multitec® 545		
Parámetros	Valores	Unidades
Metano (CH ₄)	44,2	(%)
Dióxido de carbono (CO ₂)	55	(%)
Oxígeno (O ₂)	3,1	(%)
Sulfuro de hidrogeno (H ₂ S)	0,5	(%)
Monóxido de carbono (CO)	500	(ppm)

La Molina, 03 de junio de 2024.



PhD. Diego Sotomayor Melo
DIRECTOR - DPTO. DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Dirección: Av. la Molina s/n - La Molina
Telf. 614-7800 anexo 394

Caracterización sin nanopartículas de Fe₃O₄.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE CIENCIAS
LABORATORIO DE INGENIERÍA AMBIENTAL



ANÁLISIS DE MUESTRA

LIAM/007-24

SOLICITANTE: Karenina Macazana López

PROCEDENCIA DE MUESTRA:

Dist.: Rimac **Prov.:** Lima **Región:** Lima.

MUESTRA DECLARADA: Muestra de biogás a partir de excretas de cuy

FECHA DE COLECCIÓN DE MUESTRA: 03/06/2024

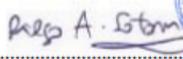
FECHA DE RECEPCION: 04/06/2024

MÉTODO DE ANÁLISIS: Directo

Equipo: Multitec® 545

Parámetros	Valores	Unidades
Metano (CH ₄)	53,9	(%)
Dióxido de carbono (CO ₂)	42	(%)
Oxígeno (O ₂)	3,3	(%)
Sulfuro de hidrogeno (H ₂ S)	0,5	(%)
Monóxido de carbono (CO)	108	(ppm)

La Molina, 04 de junio de 2024.




PhD. Diego Sotomayor Melo
DIRECTOR - DPTO. DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Dirección: Av. la Molina s/n - La Molina
Telf. 614-7800 anexo 394

Caracterización con nanopartículas de Fe₃O₄.

Anexo 8: Póster presentado y expuesto en la 49th IUPAC World Chemistry Congress. The Hague, The Netherlands 20 – 25 Agosto, 2023.

Application of nanocomposites in solid residues of wastewater

Karenina Macazana^{a,b*}, Rosa L. Flores^a, William E. Gómez^a & María E. Quintana^b

^a49th IUPAC World Chemistry Congress
The Hague, The Netherlands from 20/08/2023 to 25/08/2023
^aGroup of Biogas "URUPUNANO", National University of Engineering, Lima – Perú
^bCentre for the Development of Advanced Materials and Nanotechnology – CEMAT – UNI, Perú

INTRODUCTION

Guinea pig excreta biogas

Specific Methanogenic Activity Assay

Nanostructured of Fe₃O₄

Substrates: $(\text{NH}_4^+, \text{NO}_3^-, \text{SO}_4^{2-}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{CO}_2)$ + Biomass: $(\text{CO}_2 + \text{CH}_4, \text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{CO}_2)$

The objective of this work is to calculate how much methane we obtain and by what percentage biogas production increases by adding nanostructured iron III compounds to guinea pig excreta through the anaerobic digestion process.

RESULTS AND DISCUSSIONS

Figure 7. X ray diffraction of the sample

Figure 8. Scanning Electron Microscopy of the sample

(2) The size of the crystalline grains is calculated from the analysis of the most intense diffraction peaks using the Debye-Scherrer equation. (3) The SEM micrograph shows average size of magnetite.

Figure 4. Photographs of (a) Preparation of the reactor with inoculum, (b) Preparation of the reactor with excreta, (c) Preparation of the reactor with nanostructured Iron Oxide III.

MATERIALS AND METHODS

Magnetite synthesis

Figure 1. Magnetite synthesis by the coprecipitation method.

$$\text{Fe}^{2+} + 2\text{Fe}^{3+} + 8\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$$

Days/Reactor	Accumulate volume (ml)						Biodegradability (Reactor 2)	Biodegradability (Reactor 3)	Efficiency (Reactor 3 v)
	Reactor 1: Inoculum	Reactor 2: Substrate	Reactor 3: Magnetite	Reactor 2 connected	Reactor 3 connected	Reactor 2			
1	33.8	52.8	46	28	14.2				
2	32	162	166.8	130	134.8				
4	32.2	227.2	238.8	195	198.8				
4	85	258	342.8	225	309.8				
5	34.8	263	378.8	228.2	340				
6	36.2	267	402.8	243.2	366.8				
7	38	269	411.8	231	373.8	46.94%	75.96%	105.82%	

Table 1. Volumes displaced and accumulated by the biogas in 3 reactors with different components.

CONCLUSIONS

Guinea pig manure is a promising alternative to biogas. The volume of methane produced was 373.8 ml and with a percentage of biodegradability of 75,95%. By adding nanostructured iron oxide III, biogas production increases by 61,82%. XRD confirms that the crystalline size of iron oxide III is nanostructured and has an average value of 18,19 nm. The morphology of the nanostructured iron oxide III tends to be spherical as seen in the SEM images. This work provides an increase in biogas production subject to pilot scaling as the next step.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research is being financed by PROCIENCIA through the project N°123 Fondecyt – 2018. All the authors express their gratitude to the "49th IUPAC World Chemistry Congress", The Hague, The Netherlands.

