



**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER
EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA AMBIENTAL**

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR CODIGESTIÓN DE
ESTIÉRCOL DE GANADO BOVINO, LACTOSUERO Y
CÁSCARA DE PAPAYA**

Autor : Bach. Verastegui Hernandez, Claudia Yuliza

Asesor : Ing. Wildor Gosgot Angeles

Registro:

CHACHAPOYAS – PERÚ

2019



**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**TESIS PARA OBTENER
EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA AMBIENTAL**

**PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR CODIGESTIÓN DE
ESTIÉRCOL DE GANADO BOVINO, LACTOSUERO Y
CÁSCARA DE PAPAYA**

Autor : Bach. Verastegui Hernandez, Claudia Yuliza

Asesor : Ing. Wildor Gosgot Angeles

Registro:

CHACHAPOYAS – PERÚ

2019

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme la vida, fuerza y salud para cumplir un sueño más en mi camino.

A mis padres, porque creyeron en mí, dándome una educación, valores, virtudes y la confianza, para poder alcanzar mis objetivos, pues con sus enseñanzas y sabios consejos, pude solucionar cada obstáculo que se me presentaba, así mismo me dieron ánimo para no desistir, por ustedes que son mi mayor motivación es lo que me hizo ir hasta el final.

A mi hermana, por haber estado al pendiente de mis estudios, apoyándome en cada etapa de mi carrera profesional.

Y a todos mis familiares que me brindaron su apoyo para continuar con este sueño, esperando contar siempre con su sincera ayuda.

Claudia

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la vida y guiar mi caminar.

A mis queridos padres Guillermo y Arilda y a mi hermana Esther por su apoyo incondicional durante mi etapa de formación profesional, por enseñarme que todos los ciclos deben cerrarse y nuevos caminos deben emprenderse en este corto respiro de la vida.

A mi Asesor, Ing. Wildor Gosgot Angeles, por brindarme su tiempo, apoyo, enseñanzas y la motivación para poder realizar la presente tesis.

A los miembros de jurado, el Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón, el M.Sc. Gino Alfredo Vergara Medina y el M.Sc. Henry Mario Peláez Rodríguez, por la orientación, sugerencia y consejos dándome alternativas de solución, para poder mejorar la presente investigación de tesis.

Al equipo técnico del proyecto “Creación de los servicios del centro de investigación en climatología y energías alternativas de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza - Región Amazonas”.

A la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, en especial a la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, por formarme académicamente y brindarme una excelente calidad educativa que me permitirá estar preparada para asumir nuevos retos que me pondrá la vida.

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

DR. POLICARPIO CHAUCA VALQUI

Rector

DR. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN

Vicerrector Académico

DRA. FLOR GARCÍA HUAMÁN

Vicerrectora de Investigación

M.Sc. EDWIN ADOLFO DÍAZ ORTIZ

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS

El Docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada **“PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR CODIGESTIÓN DE ESTIÉRCOL DE GANADO BOVINO, LACTOSUERO Y CÁSCARA DE PAPAYA”**, de la tesista de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental:

Bach. CLAUDIA YULIZA VERASTEGUI HERNANDEZ

El Docente de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas que suscribe, da el Visto Bueno al Informe Final de la Tesis en mención, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de las observaciones y apoyar en la sustentación de tesis.

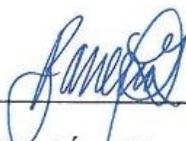
Chachapoyas, 20 de agosto del 2019



Ing. WILDOR GOSGOT ANGELES

Asesor

JURADO EVALUADOR



Dr. Miguel Ángel Barrena Gurbillón

Presidente



M.Sc. Gino Alfredo Vergara Medina

Secretario



M.Sc. Henry Mario Peláez Rodríguez

Vocal



ANEXO 2-N

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS

En la ciudad de Chachapoyas, el día 13 de Septiembre del año 2019, siendo las 11:00 horas, el aspirante: Claudia Yuliza Verastegui Hernandez defiende públicamente la Tesis titulada: Producción de Biogás por Coadigestión de Estercol de ganado bovino, lactosuero y cáscara de papaya

para optar el Título Profesional en Ingeniería Ambiental otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, ante el Jurado, constituido por:
Presidente: Dr. Miguel Angel Barrera Gurbillon
Secretario: M.Sc. Gino Alfredo Veraña Medina
Vocal: M.Sc. Henry Mario Peltzer Rodríguez



Procedió el (los) aspirante (s) a hacer la exposición de los antecedentes, contenido de la tesis y conclusiones obtenidas de la misma, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la tesis presentada, los miembros del jurado pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones u objeciones consideran oportunas, las cuales fueron contestadas por el los aspirante (s).

Tras la intervención de los miembros del jurado y las oportunas contestaciones del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los miembros del jurado presentes en el acto, a fin de que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el jurado determinará la calificación global concedida a la tesis, en términos de:

Notable o sobresaliente () Aprobado () No apto ()

Otorgada la calificación el presidente del Jurado comunica, en sesión pública, la calificación concedida. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las horas 12:00 del mismo día, el jurado concluye el acto de sustentación del Trabajo de Investigación.

[Signature]
PRESIDENTE

[Signature]
SECRETARIO

[Signature]
VOCAL

OBSERVACIONES: _____

DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO

Yo, Claudia Yuliza Verastegui Hernandez , identificado con DNI N° 72729882, Egresada de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.

DECLARO BAJO JURAMENTO QUE:

1. Soy autor de la Tesis titulada: **“PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR CODIGESTIÓN DE ESTIÉRCOL DE GANADO BOVINO, LACTOSUERO Y CÁSCARA DE PAPAYA”**, que presento para obtener el Título Profesional de **INGENIERA AMBIENTAL**.
2. La Tesis no sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. La Tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.
4. La Tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
5. La información presentada es real y no ha sido falsificada, ni duplicada, ni copiada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo toda responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la Tesis para obtener el Título Profesional, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. Asimismo, por la presente me comprometo a asumir además todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse para la UNTRM en favor de terceros por motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado a las que encontraren causa en el contenido de la Tesis. De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente, asumo las consecuencias y sanciones civiles y penales que de mi acción se deriven.

20 de agosto de 2019



Claudia Yuliza Verastegui Hernandez

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
AUTORIDADES UNIVERSITARIAS	v
VISTO BUENO DEL ASESOR.....	vi
JURADO EVALUADOR.....	vii
ACTA DE EVALUACIÓN Y SUSTENTACIÓN DE TESIS.....	viii
DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO.....	ix
ÍNDICE GENERAL.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT.....	xv
I.INTRODUCCIÓN.....	16
II.MATERIAL Y MÉTODOS	19
2.1. Descripción del área de estudio.....	19
2.2. Implementación de sistema experimental a nivel de laboratorio	20
2.3. Determinación de concentraciones de sustrato a nivel de laboratorio	21
2.4. Recolección de residuos orgánicos.....	22
2.5. Implementación del experimento a nivel de laboratorio	23
2.6. Medición de la producción de biogás.....	25
2.7. Medición de la temperatura ambiente	25
III.RESULTADOS	26
3.1. Temperatura.....	26
3.2. Producción de biogás.....	26
3.3. Optimización de producción de biogás	27

IV.DISCUSIÓN.....	30
V.CONCLUSIONES.....	32
VI.RECOMENDACIONES.....	33
VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de cada variable con el diseño estadístico Box- Behnken.	21
Tabla 2. Distribución de valores de variables según Box –Behnken.....	21
Tabla 3. Cantidades de sustrato que se utilizó para la codigestión.	23
Tabla 4. Concentraciones de sustratos que se utilizó a nivel de laboratorio.....	23
Tabla 5. Tabla del registro de la producción de biogás durante el experimento.	27
Tabla 6. Respuesta optimizada para maximizar la producción de biogás (2694,85 mL). ...	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fundamentos de la transformación anaerobia.....	17
Figura 2. Ubicación donde se realizó el experimento.....	19
Figura 3. Equipo experimental para producción de biogás a nivel de laboratorio.	20
Figura 4. Residuos orgánicos (Estiércol de ganado bovino A, lactosuero B y cáscara de papaya C).	22
Figura 5. Carga de los biodigestores con diferentes concentraciones de residuo orgánico. A) Estiércol de ganado bovino; B) lactosuero; C) cáscara de papaya y D) agua reposada. ...	24
Figura 6. Corrida experimental con 15 biodigestores.....	25
Figura 7. Variación de la temperatura durante el experimento de laboratorio.	26
Figura 8. Superficie de respuesta estimada con el software Statgraphics en función de la ecuación de regresión.....	28
Figura 9. Gasómetros con biogás.....	29

RESUMEN

Los residuos orgánicos que no reciben tratamiento alguno, durante su descomposición emiten múltiples gases de efecto invernadero contribuyendo al cambio climático. Una alternativa de solución es valorizar energéticamente estos residuos a través de la digestión anaerobia. En este contexto la investigación buscó la producción de biogás a nivel de laboratorio, mediante el uso de estiércol de ganado bovino, lacto suero y cáscara de papaya generados en la ciudad de Bagua, empleando botellas PET de 2,250 L (biodigestores) y de 225 mL calibrados cada 50 mL (gasómetros), ambos conectados por una manguera para medir el biogás producido por la técnica de desplazamiento de agua.

Se realizó 3 corridas de 15 experimentos en un periodo de evaluación de 7 días para cada corrida, a temperatura ambiente de 20 °C a 31°C, utilizando el diseño estadístico de Box-Benhken con variables de relación estiércol - agua en proporciones de 1:1, 1:2, 1:3; lactosuero en volúmenes de 2 mL, 4 mL, 6 mL y cáscara de papaya con respecto al volumen de estiércol: 3 g, 6 g, 9 g. Los resultados demostraron que la mayor producción de biogás fue de 2285 mL, correspondiente al experimento 1, empleando proporciones de 1000 mL de estiércol de ganado bovino, 120 mL de lactosuero y 90 g de cáscara de papaya. Por otro lado con el Statgraphics 5.0 se permitió predecir que se puede obtener un máximo de biogás de 2694.85 mL a partir de las porciones de 500 mL de estiércol de ganado bovino; 40,8 mL de lactosuero y 90 g de cáscara de papaya.

Palabras clave: Tratamiento de residuos, digestión anaerobia, tiempo de retención y Box-Behnken.

ABSTRACT

Organic waste that does not receive any treatment, during its decomposition emit multiple greenhouse gases contributing to climate change. An alternative solution is to energy recovery of these wastes through anaerobic digestion. In this context, the research sought the production of biogas at the laboratory level, through the use of manure from cattle, whey and papaya peel generated in the city of Bagua, using 2,250 L PET bottles (biodigesters) and 225 mL calibrated every 50 mL (gasometers), both connected by a hose to measure the biogas produced by the water displacement technique.

Three runs of 15 experiments were performed in a 7-day evaluation period for each run, at room temperature of 20 ° C to 31 ° C, using the statistical design of Box-Benhken with variables of manure-water ratio in proportions of 1 : 1, 1: 2, 1: 3; whey in volumes of 2 mL, 4 mL, 6 mL and papaya peel with respect to manure volume: 3 g, 6 g, 9 g. The results showed that the highest biogas production was 2285 mL, corresponding to experiment 1, using proportions of 1000 mL of cattle dung, 120 mL of whey and 90 g of papaya peel. On the other hand, with Statgraphics 5.0 it was allowed to predict that a maximum biogas of 2694.85 mL can be obtained from the 500 mL portions of cattle manure; 40.8 mL of whey and 90 g of papaya peel.

Keywords: Waste treatment, anaerobic digestion, retention time and Box-Behnken.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la crisis de la producción de petróleo y al agotamiento de los recursos naturales, conduce a buscar nuevas fuentes de energías limpias (Akila et al., 2019). Asimismo, existe un incremento de los residuos orgánicos, que no son tratados correctamente, lo cual representan un problema ambiental, ya que se emiten gases de efecto invernadero contribuyendo al cambio climático (Sarabia Méndez et al., 2017). Una de las tecnologías de valorización de residuos alimentarios, rastrojo de cosechas agrícolas, cáscaras de frutas, estiércol de ganado y residuos de la agroindustria, es la utilización de biodigestores para producir biogás y bioabonos, contribuyendo con el desarrollo sostenible y producción de energía renovable (Burg, Bowman, Haubensak, Baier, & Thees, 2018).

La composición y el valor calorífico del biogás producido dependen del sustrato utilizado y de las condiciones de digestión proporcionadas (Abbasi, Tauseef, & Abbasi, 2012). Para la producción de biogás se prioriza el uso de fuentes de biomasa alternativas que no sean competitivas con la producción de alimentos (Bedoić et al., 2019). El biogás se puede utilizar como combustible para motores de vehículos, en sistemas de calefacción y para la cocción de alimentos (Salazar-Rojas, Porras-Acosta, Vaquerano-Pineda, & Quirós-Rojas, 2017).

La digestión anaeróbica, consiste en una transformación biológica (actividad microbiana) en falta de oxígeno para transformar los sustratos orgánicos en una mezcla de gases como el metano, ácido sulfhídrico, vapor de agua, etc., que se denomina biogás, también se produce abono orgánico (biol y biosol) (Zhang, Hu, & Lee, 2016). Los parámetros que intervienen en la digestión anaeróbica, son temperatura, pH, relación carbono- nitrógeno (C/N), alcalinidad, velocidad de carga orgánica, tiempo de retención hidráulica y concentración de ácidos grasos volátiles (Mussoline, Esposito, Giordano, & Lens, 2013).

El proceso de digestión anaeróbica comprende cuatro etapas (Figura 1), la primera, es la hidrólisis que consiste en la transformación de biopolímeros complejos (lípidos, carbohidratos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos), en compuestos solubles tales como monómeros, azúcar, aminoácidos, ácidos grasos, purinas y pirimidinas. La siguiente etapa, es la acidogénesis, la conversión de monómeros simplificados, azúcar, aminoácidos y ácidos grasos en propiónico intermedio, ácido butírico, etc. se lleva a cabo por bacterias fermentativas. En la tercera etapa se lleva a cabo el proceso de acetogénesis, que consiste en la conversión de producto de acidogénesis en acetato por homoacetógenos. En la etapa final, tiene lugar la metogénesis, en la cual el metano se obtiene de la transformación del acetato y dióxido de carbono, por dos grupos metanógenos. Los metanógenos acetoclástico convierten el acetato en metano y dióxido de carbono; mientras que los metanógenos que emplean hidrógeno producen metano utilizando dióxido de carbono e hidrógeno como aceptor de electrones y donante, respectivamente (Shah et al., 2015)

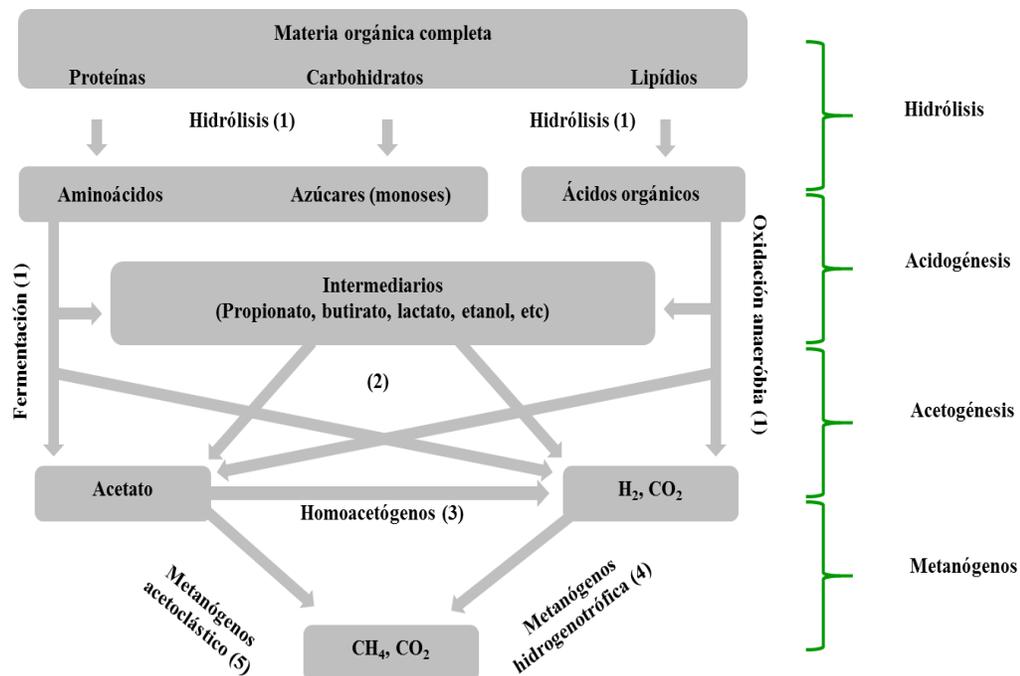


Figura 1. Fundamentos de la transformación anaerobia.

Fuente: Adaptado de Khanal (2009).

Los desafíos relacionados con la digestión anaeróbica de los residuos orgánicos son el bajo rendimiento de biogás, la capacidad de amortiguación deficiente, los productos finales de baja calidad y la posible variabilidad. Estas deficiencias se deben a una baja transferencia de masa (alto contenido sólido, mala estructura nutricional) o pueden acreditarse a la naturaleza recalcitrante de los residuos. Para superar estos desafíos existen diversas técnicas, como la codigestión con diferentes sustratos, es una alternativa para aumentar el rendimiento del proceso anaeróbico (Kainthola, Kalamdhad, & Goud, 2019).

Existen trabajos en producción de biogás a través de codigestión, por ejemplo, Akila et al., (2019), realizaron la biometalización y la producción de biofertilizantes a partir de algas *Ulva sp.*, con la mezcla de estiércol de ganado vacuno en proporción 3:1, respectivamente; logrando obtener un volumen de 574 ± 26 mL de biogás. La codigestión de estiércol bovino, lactosuero y totora (*Scirpus californicus*), para la producción de biogás, fue aplicando por Barrena, Gamarra, Milla, Fellenberg & Ordinola (2017), haciendo uso del diseño estadístico de Box-Behnken, empleando variables de estiércol - agua en proporciones de 1:5, 1:4, 1:3, lactosuero con volúmenes de 2, 4 y 6 mL y chips de totora por volumen de estiércol en 3, 6 y 9 g. obteniendo 1400 mL de biogás constituido como mayor rendimientos, manejando 1,7 y 2,5 L de estiércol, con 400 y 200 mL de lactosuero.

Por consiguiente, en la investigación, se evaluó la transformación anaerobia para la producción de biogás, a partir de estiércol de ganado bovino, lactosuero y cáscara de papaya a nivel experimental, a través del diseño estadístico de Box-Behnken.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Descripción del área de estudio

El estudio se desarrolló en la ciudad del distrito y provincia de Bagua, del departamento de Amazonas, ubicada dentro de las coordenadas $5^{\circ}38'00''\text{S}$ y $78^{\circ}32'00''\text{O}$, a 420 m.s.n.m., con temperaturas altas que va de los $30\text{-}32^{\circ}\text{C}$, mínimas de 18°C y máximas entre $40\text{-}43^{\circ}\text{C}$. La instalación de los biodigestores a nivel de laboratorio se realizó en la vivienda ubicada en las coordenadas $5^{\circ}88'31''\text{S}$ y $78^{\circ}31'34''\text{O}$ a 487 m.s.n.m.

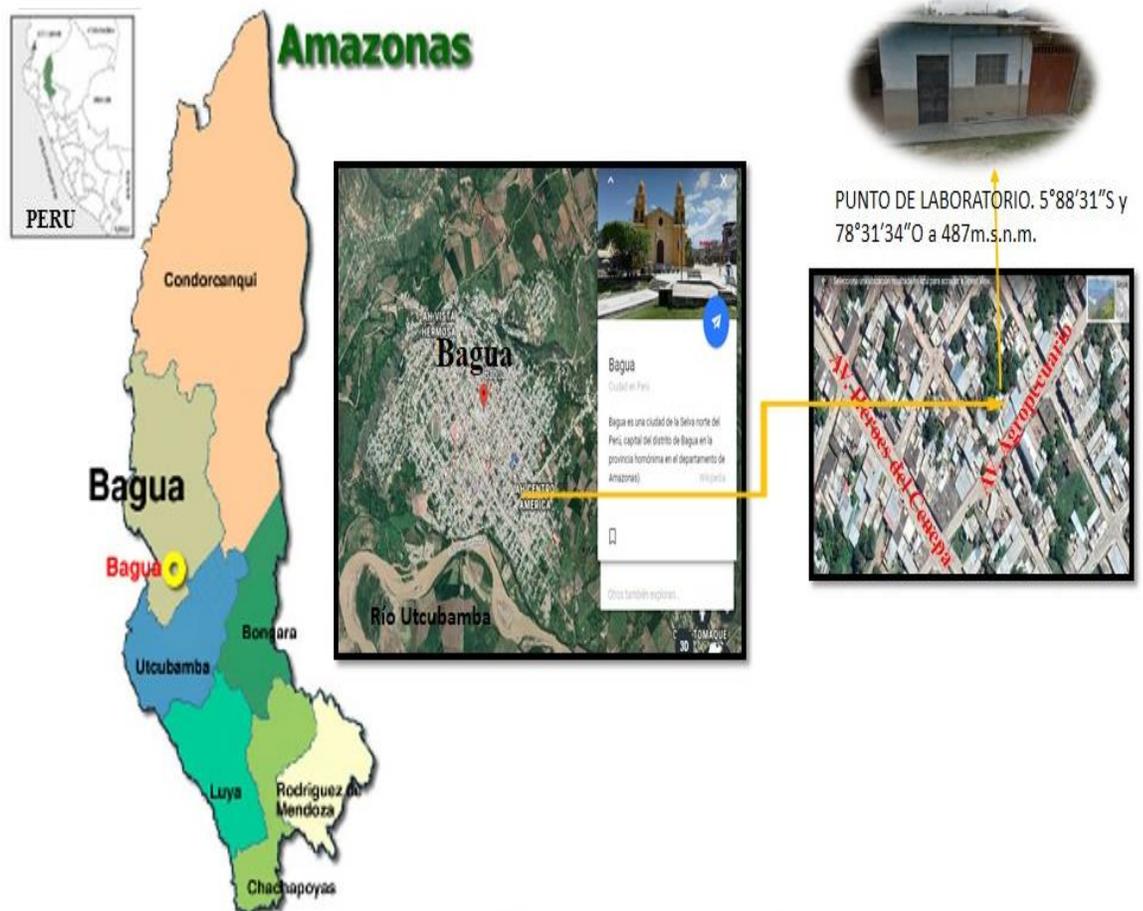


Figura 2. Ubicación donde se realizó el experimento.
Fuente: Google Earth.

2.2. Implementación de sistema experimental a nivel de laboratorio

Se implementó un biodigestor anaeróbico a nivel de laboratorio propuesto por Barrena et al., (2017), el sistema estuvo compuesto de 15 biodigestores, cada uno conformado por una botella tereftalato de polietileno (PET) con un volumen de 2000 mL y una botella PET de 225 mL como gasómetro. El gasómetro fue calibrado con una jeringa de 50mL. En la tapa de la botella del biodigestor se realizó un orificio, por donde se introdujo una manguera de ¼” que conectó al gasómetro (calibrado) con el biodigestor, realizando el sello hermético con silicona líquida para evitar la fuga del biogás. Además se construyó un soporte de fierro con dimensiones 75cm x 25 cm de alto. Los gasómetros se llenaron completamente con agua y se colocaron boca abajo con un tercio de su cuerpo superior en una tina con agua. Se sujetó al soporte con alambre galvanizado los gasómetros, quedando el sistema listo para trabajar (Figura 3).

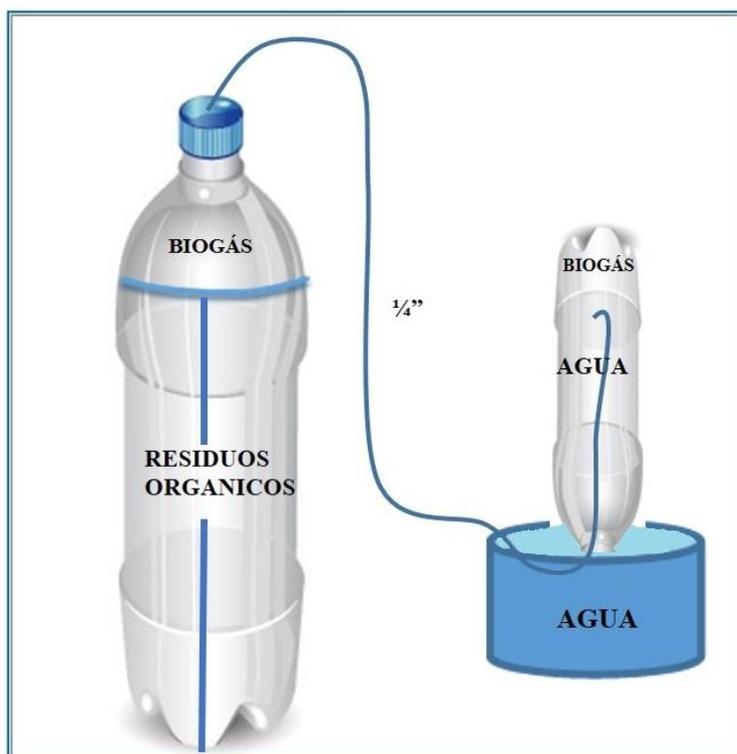


Figura 3. Equipo experimental para producción de biogás a nivel de laboratorio.

2.3. Determinación de concentraciones de sustrato a nivel de laboratorio

Los rangos de los valores fueron calculados a través del diseño estadístico de Box-Behnken. Las cantidades de biomasa se calcularon con la relación estiércol: agua (porcentaje volumen/volumen), lactosuero (porcentaje volumen/volumen de lactosuero en relación al volumen del biodigestor) y cáscara de papaya (porcentaje de cáscara de papaya en relación al volumen de estiércol), propuesto por Barrena, Gamarra, & Maicelo, (2010), las proporciones de estiércol, lactosuero y cáscara de papa utilizados en la investigación se presentan en la Tabla 1 y la distribución de las variables, se realizó de acuerdo a la Tabla 2.

Tabla 1. Valores de cada variable con el diseño estadístico Box- Behnken.

Concentración	Estiércol (mL)	Lactosuero (mL)	Cáscara de papaya (g)
Alto (+)	1:1	6	9
Medio (0)	1:2	4	6
Bajo (-)	1:3	2	3

Fuente: Barrena et al., (2010).

Tabla 2. Distribución de valores de variables según Box –Behnken.

Nº Experimento	Estiércol (mL)	Lactosuero (mL)	Cáscara de papaya (g)
1	+	+	+
2	+	+	0
3	+	0	+
4	0	+	+
5	+	+	-
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	0	0
9	0	0	0

(Continúa la tabla)

N° Experimento	Estiércol (mL)	Lactosuero (mL)	Cáscara de papaya (g)
10	0	-	-
11	-	-	0
12	+	0	-
13	-	0	+
14	0	-	+
15	+	-	-

Fuente: Barrena et al., (2010).

2.4. Recolección de residuos orgánicos

Para realizar la investigación, se trabajó con estiércol de ganado bovino, lactosuero y cáscara de papaya, producidos en la ciudad de Bagua, los cuales fueron recolectados en diferentes lugares tales como: camal, agro-productores de lácteos y juguerías, un día antes de la ejecución del experimento, para evitar la aceleración de su descomposición antes de iniciar el experimento.



Figura 4. Residuos orgánicos (Estiércol de ganado bovino A, lactosuero B y cáscara de papaya C).

2.5. Implementación del experimento a nivel de laboratorio

Los residuos orgánicos frescos fueron triturados y licuados (cáscara de papaya) para facilitar el proceso de digestión anaerobio de los microorganismos y disminuir el tiempo de retención de los sustratos empleados dentro del biodigestor para la producción de biogás, después se calcularon las cantidades de cada sustrato en base a la Tabla 1 y el volumen del biodigestor (2000 mL), cuyos datos se observan en la Tabla 3 y la distribución de sus valores según la Tabla 2 y en la Tabla 4 las concentraciones de los sustratos empleados por cada experimento.

Tabla 3. Cantidades de sustrato que se utilizó para la codigestión.

Concentración	Estiércol (mL)	Lactosuero (mL)	Cáscara de papaya (g)
Alto (+)	1000	120	90
Medio (0)	667	80	40
Bajo (-)	500	40	15

Tabla 4. Concentraciones de sustratos que se utilizó a nivel de laboratorio.

Nº Experimento	Estiércol (mL)	Lactosuero (mL)	Cáscara de papaya (g)
1	1000	120	90
2	1000	120	40
3	1000	80	90
4	667	120	90
5	1000	120	15
6	1000	40	90
7	500	120	90
8	1000	80	40
9	667	80	40
10	667	40	15
11	500	40	40
12	1000	80	15
13	500	80	90
14	667	40	90
15	500	40	15

Enseguida se procedió a cargar cada biodigestor guiándose de la Tabla 4. Después, los biodigestores fueron completados con agua reposada hasta el 80 % de su volumen, quedando un espacio de 20%, para el almacenamiento del biogás (Figura 5).



Figura 5. Carga de los biodigestores con diferentes concentraciones de residuo orgánico. A) Estiércol de ganado bovino; B) lactosuero; C) cáscara de papaya y D) agua reposada.

El biogás generado por el biodigestor, se transportó mediante una manguera de $\frac{1}{4}$ pulg de diámetro, hacia el gasómetro lleno de agua libre de burbujas de aire. El gasómetro instaló en forma invertida, sujetado a la estructura de fierro, con su boca debajo del nivel del agua contenida en la tina de 10 L, por donde se introdujo la manguera. El biogás producido desplazará el agua del gasómetro facilitando la medida del volumen de biogás producido en base a la escala del gasómetro calibrado (Figura 6). Se ejecutaron 3 corridas de 15 experimentos en un periodo de 7 días por corrida, teniendo como variable de respuesta el volumen de biogás generado.



Figura 6. Corrida experimental con 15 biodigestores.

2.6. Medición de la producción de biogás

El registro de datos con respecto a la generación de biogás se realizó cada 24 horas desde el inicio de la puesta del experimento, durante 7 días por corrida. El biogás producido deslizo el agua contenida en la botella calibrada (gasómetro). Los datos tomados se realizaron en promedio aritmético, además con el software Statgraphics, se estimó la producción teórica y la ecuación de regresión.

2.7. Medición de la temperatura ambiente

La medición de la temperatura ambiente se realizó con un termo - hidrómetro JUMBO. El registró de las temperaturas se hizo cada hora, durante los días que se realizó el experimento a nivel de laboratorio.

III. RESULTADOS

3.1. Temperatura

La temperatura ambiente en los días de la realización del experimento (24 junio al 14 de julio del 2019), no ha variado significativamente durante las tres corridas. En la Figura 7, se muestra las temperaturas promedio por hora en los días de evaluación. La variación de las temperaturas durante el día, se encontró en el intervalo de 20 °C (a las 6:00 am) a 31 °C (entre la 1:00 pm a 3:00 pm).

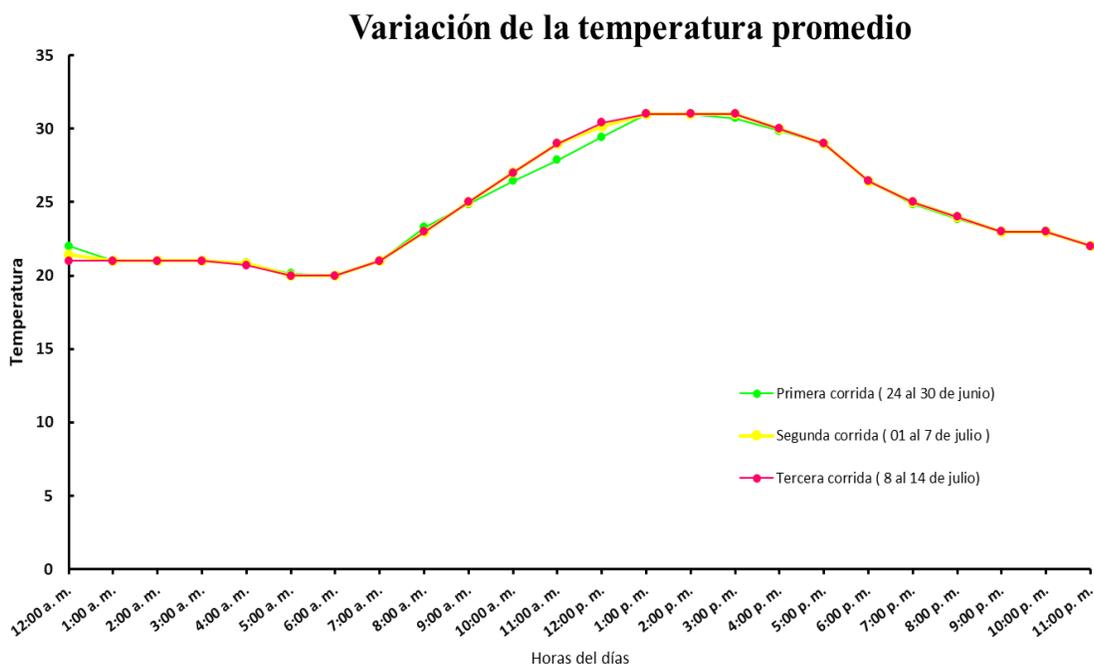


Figura 7. Variación de la temperatura durante el experimento de laboratorio.

3.2. Producción de biogás

El biogás producido se dio durante los primeros cuatro días de cada corrida (7 días). La mayor producción promedio de biogás fue el experimento 1: 2280 mL de estiércol de ganado bovino (relación estiércol: agua de 1:1), 120 mL de lactosuero y 90 g de cáscara de papaya y la mínima fue el experimento 12: 130 mL de producción de biogás (estiércol de ganado bovino 1000 mL, 80 mL de lactosuero y 15 g de cáscara de papaya). Además, los experimentos (2, 3, 5, 6, 8, 10, 13 y 14), no mostraron alguna producción de biogás (Tabla 5).

Tabla 5. Tabla del registro de la producción de biogás durante el experimento.

N° Experimentos	Estiércol (mL)	Lactosuero (mL)	Cáscara de papaya (g)	24-30 Junio Total	1-7 Julio Total	8-14 Julio Total	Promedio
1	1000	120	90	2220	2300	2320	2280
2	1000	120	40	0	0	0	0
3	1000	80	90	0	0	0	0
4	667	120	90	830	1310	1250	1130
5	1000	120	15	0	0	0	0
6	1000	40	90	0	0	0	0
7	500	120	90	980	940	980	966.7
8	1000	80	40	0	0	0	0
9	667	80	40	850	1160	1120	1043.3
10	667	40	15	0	0	0	0
11	500	40	40	960	1000	990	983.3
12	1000	80	15	60	160	170	130
13	500	80	90	0	0	0	0
14	667	40	90	0	0	0	0
15	500	40	15	170	410	240	273.3

3.3.Optimización de producción de biogás

Los resultados promedios (Tabla 5), se procesaron con el software Statgraphics, con a un nivel de confianza de 95%, teniendo como efectos un p-valor inferior a 0,05, siendo significativamente diferentes de cero. Se determina que la variable A (estiércol de ganado bovino) influye en la producción de biogás en la codigestión de lactosuero (B) y cáscara de papaya (C).

El estadístico Durbin-Watson = 2,01164 (P = 0,2870), evaluó los residuos con el propósito de determinar correlación significativa basada en el orden en el que sucede en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es superior a 0,05, no hay correlación de serie en los residuos con un nivel de significancia de 95,0%. Con los coeficientes de regresión para la producción de biogás, se obtuvo la ecuación de regresión del modelo ajustado a los datos:

$$Y = 6609.04 - 8.73 A - 77.06 B + 30.32 C + 0.01 A^2 + 0.01 AB - 0.01 AC + 0.14 B^2 - 0.02 BC + 0.14 C^2$$

Donde:

A: Estiércol de ganado.

B: Lactosuero.

C: Cáscara de papaya.

La superficie de respuesta estimada en función a la ecuación, mantuvieron con el software Statgraphics la variable cáscara de papaya en 52,5 g, donde se observa en la Figura 8.

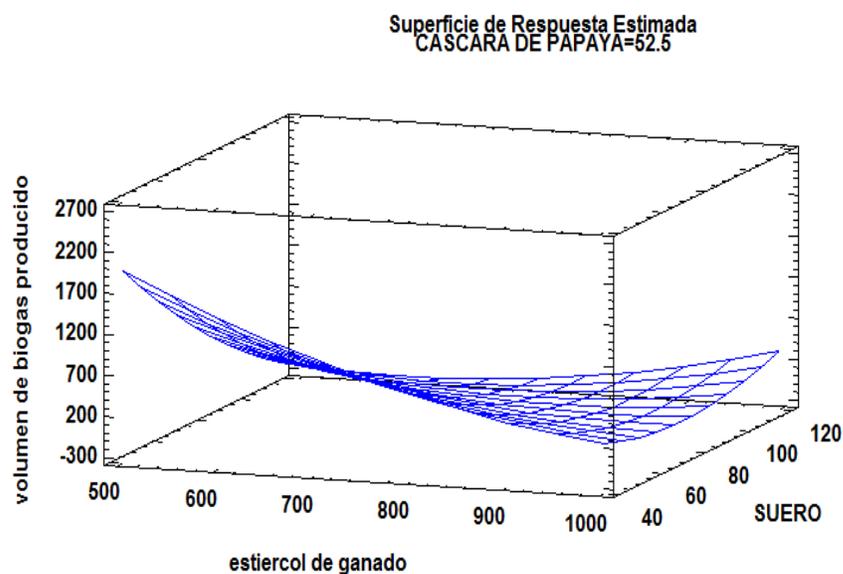


Figura 8. Superficie de respuesta estimada con el software Statgraphics en función de la ecuación de regresión.

A través del software Statgraphics, se optimizó el valor de las variables y para maximizar la producción en base a los valores experimentales, dando como resultado un volumen máximo de 2694,85 mL de biogás, obteniendo los valores que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Respuesta optimizada para maximizar la producción de biogás (2694,85 mL).

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Estiércol de ganado bovino (mL)	500	1000	500
Suero (mL)	40	120	40.8
Cáscara de papaya (g)	15	90	90

Fuente: Software Statgraphics.



Figura 9. Gasómetros con biogás.

IV. DISCUSIÓN

La temperatura es un parámetros influyente en el proceso de la digestión anaerobia de los microbiana presentes en un biodigestor, así como en la calidad del biogás obtenido (Zhang, Baeyens, & Tan, 2014).

Las bacterias beneficiosas en la digestión anaeróbica pueden crecer en condiciones psicrófilas (<25 C), mesofílicas (25–40 C) y termofílicas (> 45 C) (El-mashad, Zeeman, & Loon, 2004). Olatunde et al., (2017), observó que la generación de biogás fue en el cuarto día y en aumento al sexto día, debido a la temperatura (25 °C a 55°C), obteniendo bacterias anaerobias, metanógenos y hongos. También, menciona que la cáscara de papaya, revela riqueza en macro, micronutrientes y elementos minerales necesarios para los microbios en crecimiento en el medio de fermentación con el sustrato. Por lo tanto, el rango de temperatura ambiente (20 °C a 31 °C) en que se llevó a cabo la producción de biogás fue adecuada, debido a la digestión anaeróbica en condiciones mesofílicas proporciona estabilidad en la conversión del sustrato y permite la actuación de una diversidad de bacterias metanogénicas (Mao, Feng, Wang, & Ren, 2015).

Las adecuadas condiciones de temperatura ambiental en la ciudad de Bagua, ha influido en una producción de biogás máxima de 2280 mL a partir de la codigestión de 1000 mL de estiércol de ganado bovino con 120 mL de lactosuero y 90 g de cáscara de papaya, durante 7 días. Los resultados encontrados en esta investigación, son menores en cuanto a días de retención hidráulica pero mayores en producción de biogás, comparado con el estudio realizado por Barrena et al (2010), quienes trabajaron a una temperatura ambiente promedio de 17 °C, logrando producido 195 mL de biogás en un biodigestor de 1750 mL, a través de la codigestión de 583 mL de estiércol (estiércol: agua de 1:2), 35 mL de agua de desagüe (2% v/v) y 79 g de cáscara de papa (9% p/v), durante las tres corridas (45 días).

En la presente investigación, el máximo volumen de producción predicho fue de 2694,85 mL de biogás, con los valores óptimos de 500 mL de estiércol de ganado bovino, 40,80 mL de lactosuero y 90 g de cáscara de papaya; producción de biogás 18 % mayor a lo obtenido experimentalmente; cuyo valor es mayor a lo estimado por Barrena et al (2017), quienes predijeron una producción óptima de biogás de 1745,74 mL, valor superior a los resultados que obtuvieron en su experimento a nivel de laboratorio, la cual fue de 1,7 L, empleando 282,942 mL de lactosuero y 186,829 g de chips de totora.

Los resultados logrados en la investigación determinan que el sistema de tratamiento de residuos orgánicos a través de la codigestión anaerobia en biodigestores, para la producción del biogás como combustible es factible, reduciendo el impacto ambiental al producir una energía renovable. Donde González et al (2007), da a conocer un técnica del diseño de una planta productora de 2.440 m^3 de biogás por día, con rendimientos de 500 kW de energía eléctrica, a partir de residuos de estiércol de 1.300 reses de ganado.

También Hernández, Oechsner, Brulé, & Marañon (2014) estudiaron algunos residuos orgánicos para producir biogás a partir de la cáscara de yuca, maíz, malanga, girasol, papa y de maní, teniendo como resultados una producción máxima 0,393 m^3 /kg de biogás con el girasol y el mínimo valor 0,095 m^3 /kg con cáscara de maní, mediante la codigestión de deposiciones de animales en condiciones ambientales. Concluyendo, que este sistema (biodigestores) es el más adecuado para la producción del biogás, dándole una valorización a los residuos orgánicos generando una energía renovable.

V. CONCLUSIONES

- El factor que ha intervenido en rendimiento del biogás y la disminución del tiempo de retención hidráulica en los biodigestores a nivel de laboratorio, fue la temperatura ambiental, ya que se encontró en un intervalo de 20 a 31 °C, cerca de las condiciones mesófilas, donde se propicia el desarrollo de las bacterias metanogénicas para favorecer la transformación de materia orgánica en biogás.
- La codigestión de estiércol de ganado bovino, lactosuero y cáscara de papaya es factible para la producción de biogás, a nivel de laboratorio, teniendo la mayor producción de 2280 mL, con las proporciones de mezcla de sustratos de 1000 mL de estiércol de ganado, 120 mL de lactosuero y 90 g de cáscara de papaya.
- La optimización realizada en el software Statgraphics, ha permitido obtener la ecuación $Y = 6609.04 - 8.73 A - 77.06 B + 30.32 C + 0.01 A^2 + 0.01 AB - 0.01 AC + 0.14 B^2 - 0.02 BC + 0.14 C^2$, para la estimación óptima de 2694,85 mL de biogás que se puede producir con una mezcla de 500 mL de estiércol de ganado bovino, 40,8 mL de lactosuero y 90 g de cáscara de papaya.
- La codigestión es una alternativa de valorización energética de residuos orgánicos, para producir un combustible renovable (biogás) y bioabonos de aplicación directa a los cultivos.

VI. RECOMENDACIONES

Para las siguientes investigaciones se recomienda tener en cuenta las consideraciones siguientes:

- Tomar en cuenta los parámetros de pH, relación C: N: P, sólidos totales para la codigestión de diferentes residuos orgánicos.
- Realizar la evaluación durante un tiempo mayor, hasta 35 días, para conocer el comportamiento de producción de biogás en las diferentes fluctuaciones de temperatura.
- Realizar el análisis de concentración de metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico para determinar la calidad del biogás producido.
- Utilizar el modelo obtenido, para implementar un sistema a escala piloto y verificar los resultados.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, T., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2012). Anaerobic digestion for global warming control and energy generation - An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.046>
- Akila, V., Manikandan, A., Sahaya Sukeetha, D., Balakrishnan, S., Ayyasamy, P. M., & Rajakumar, S. (2019). Biogas and biofertilizer production of marine macroalgae: An effective anaerobic digestion of *Ulva* sp. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *18*(January), 101035. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101035>
- Barrena, G. M., Gamarra, T. O., & Maicelo, Q. J. (2010). Producción de biogás en laboratorio a partir de residuos domésticos y ganaderos y su escalamiento. *APORTE SANTIAGUINO*, *3*(1), 86. <https://doi.org/10.32911/as.2010.v3.n1.425>
- Barrena, M., Gamarra, O., Milla, M., Fellenberg, T., & Ordinola, C. (2017). Optimización de la producción de biogas a escala de laboratorio a partir de estiércol de bovino, lactosuero y totora (*Scirpus californicus*). *INDES Revista de Investigación Para El Desarrollo Sustentable*, *3*(2), 60. <https://doi.org/10.25127/indes.201502.007>
- Bedoic, R., Čuček, L., Čosić, B., Krajnc, D., Smoljanić, G., Kravanja, Z., Duić, N. (2019). Green biomass to biogas – A study on anaerobic digestion of residue grass. *Journal of Cleaner Production*, *213*, 700–709. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.224>
- Burg, V., Bowman, G., Haubensak, M., Baier, U., & Thees, O. (2018). Resources , Conservation & Recycling Valorization of an untapped resource: Energy and greenhouse gas emissions benefits of converting manure to biogas through anaerobic digestion. *Resources, Conservation & Recycling*, *136*(March), 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.004>
- El-mashad, H. M., Zeeman, G., & Loon, W. K. P. Van. (2004). *Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure*. 95, 191–201. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2003.07.013>

- González, M., Miguel, J., Daza, D., Alberto, C., Urueña, G., & Humberto, C. (2007). *Diseño y estudio económico preliminar de una planta productora de biogas utilizando residuos orgánicos de ganado vacuno Preliminary design and economical study of a biogas production-*.
- Hernández, C. M. M., Oechsner, H., Brulé, M., & Marañón, M. E. (2014). Estudio de algunas propiedades físico-mecánicas y químicas de residuos orgánicos a utilizar en la producción de biogás en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(2), 63–69.
- Kainthola, J., Kalamdhad, A. S., & Goud, V. V. (2019). A review on enhanced biogas production from anaerobic digestion of lignocellulosic biomass by different enhancement techniques. *Process Biochemistry*, (January), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2019.05.023>
- Khanal, S. K. (2009). Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production. In *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production*. <https://doi.org/10.1002/9780813804545>
- Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>
- Mussoline, W., Esposito, G., Giordano, A., & Lens, P. (2013). The anaerobic digestion of rice straw: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(9), 895–915. <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.627018>
- Salazar-Rojas, T., Porras-Acosta, M., Vaquerano-Pineda, N., & Quirós-Rojas, A. (2017). Estimación del potencial metanogénico de la codornaza considerando las variables de dilución, adición de nutrientes y codigestión. *Revista Tecnología En Marcha*, 29(4), 102. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i4.3041>
- Sarabia Méndez, M. A., Laines Canepa, J. R., Sosa Olivier, J. A., Escalante Espinosa, E., Sarabia Méndez, M. A., Laines Canepa, J. R., Escalante Espinosa, E. (2017). Producción de biogás mediante codigestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales. *Revista*

Internacional de Contaminación Ambiental, 33(1), 109–116.
<https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.10>

Shah, F. A., Mahmood, Q., Rashid, N., Pervez, A., Raja, I. A., & Shah, M. M. (2015). Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.053>

Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>

Zhang, Q., Hu, J., & Lee, D. (2016). Biogas from anaerobic digestion processes : Research updates. *Renewable Energy*, 98, 108–119.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.029>