

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



*Una Institución Adventista*

**Determinación del Potencial Bioquímico de Metano (PBM) de las  
sangres residuales de camal a escala laboratorio, 2019.**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Por:

Lizbeth Yauli Yucra

Asesor:

MSc. Jael Calla Calla

**Juliaca, diciembre 2019**

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

MSc. Jael Calla Calla, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

### **DECLARO:**

Que el presente informe de investigación titulado: **“DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM) DE LAS SANGRES RESIDUALES DE CAMAL A ESCALA LABORATORIO, 2019”** constituye la memoria que presenta el Bachiller **Lizbeth Yauli Yucra** para obtener el título de Profesional de Ingeniero Ambiental, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 30 días del mes de diciembre del año 2019.



---

MSc. Jael Calla Calla  
Asesor

Determinación del Potencial Bioquímico de Metano (PBM) de las  
sangres residuales de camal a escala laboratorio, 2019.

# TESIS

Presentado para optar el título Profesional de Ingeniero Ambiental

## JURADO CALIFICADOR



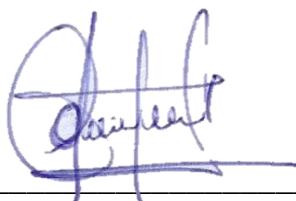
---

Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera  
**Presidente**



---

MSc. Rose Adeline Callata Chura  
**Secretario**



---

Ing. Verónica Haydeé Pari Mamani  
**Vocal**



---

MSc. Jael Calla Calla  
**Asesor**

**Juliaca, 30 de diciembre de 2019**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de mis anhelos más deseados.

A Emilda, mi querida madre, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ti pude llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que este trabajo se realice con éxito, en especial a todas aquellas personas que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por ser mi guía y acompañarme en el transcurso de mi vida, brindándome paciencia y sabiduría para culminar con éxito mis metas propuestas.

A la Universidad Peruana Unión, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental por permitirme formarme como un profesional en mis estudios de pre grado.

Al MSc. Jael Calla Calla, mi asesor, por haber sido un gran mentor y guía durante el asesoramiento de la tesis de pre grado.

A Glen Madrigal, por impartirme sus conocimientos y por guiarme durante la ejecución de la investigación.

Al Ing. Juan Eduardo Vigo Rivera, por su orientación y por abrirme las puertas de los centros de investigación para poder llevar a cabo la ejecución de mi proyecto.

Y a todas las personas que formaron parte de esta investigación, les agradezco por sus conocimientos impartidos, por su amistad, apoyo y motivación.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	xiv
<b>ABSTRACT</b> .....	xv
<b>CAPÍTULO I: EL PROBLEMA</b> .....	16
1.1. Identificación del Problema .....	16
1.2. Justificación de la investigación .....	19
1.3. Presuposición filosófica.....	21
1.4. Objetivos .....	22
1.4.1. Objetivo general .....	22
1.4.2. Objetivos específicos.....	22
<b>CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	23
2.2. Fundamentos del objeto de estudio .....	23
2.2.1. Sangres.....	23
2.2.2. Composición de la sangre .....	23
2.2.3. Digestión Anaerobia .....	24
2.2.4. Bases microbiológicas del proceso anaerobio .....	25
2.2.4.1. Hidrólisis o licuefacción. ....	25
2.2.4.2. <i>Acidogénesis</i> .....	26
2.2.4.3. <i>Acetogénesis</i> .....	26
2.2.4.4. <i>Metanogénesis</i> .....	26
2.2.5. Parámetros ambientales y operacionales.....	27
2.2.5.1. <i>Tamaño de las partículas</i> .....	27
2.2.5.2. <i>Relación inoculo – sustrato (RIS)</i> .....	28
2.2.5.3. <i>pH</i> .....	28
2.2.5.4. <i>Nutrientes</i> .....	28
2.2.5.5. <i>Temperatura</i> .....	29
2.2.5.6. <i>Ácidos Grasos Volátiles (AGV)</i> .....	29
2.2.5.7. <i>Alcalinidad Total (AT)</i> .....	29
2.2.5.8. <i>Sólidos Totales (ST)</i> .....	29
2.2.6. Biogás .....	29

2.2.6.1. Biogás en el Mundo.....	30
2.2.6.2. Biogás en el Perú.....	31
2.2.6.3. Usos del biogás.....	33
2.2.7. Biofertilizantes.....	33
2.2.8. Mataderos.....	34
2.3. Métodos para la acción del objeto de estudio.....	35
2.3.1. Las características de los sustratos.....	35
2.3.2. La producción de metano.....	35
2.3.3. Los Solidos Volátiles.....	36
2.3.4. El potencial bioquímico de metano (PBM).....	36
2.4. Resultados anteriores de investigación.....	37
2.4.1. Antecedentes Internacionales.....	37
2.4.2. Antecedentes Nacionales.....	39
2.5. Marco Legal.....	39
<b>CAPÍTULO III: MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>42</b>
3.1. Descripción del lugar de ejecución.....	42
3.1.1. Datos de ubicación del lugar experimental.....	42
3.2. Materiales, insumos y equipos.....	42
3.2.1. Materiales.....	42
3.2.4. Equipos.....	43
3.3. Métodos de análisis.....	43
3.3.1. Pretratamiento del inculo.....	43
3.3.2. Pretratamiento del sustrato.....	44
3.4. Activación de los Microorganismos Eficientes.....	44
3.5. Características físico-químicas del inculo y el sustrato.....	44
3.6. Diseño de experimentos.....	45
3.7. Métodos analíticos.....	46
3.8. Metodología.....	47
3.8.1. Tipo de estudio y diseño de investigación.....	47
3.9. Variables en estudio.....	47
3.10. Diseño de investigación.....	48

3.10.1. Factores y niveles .....	48
3.10.2. Diseño del aparato experimental.....	48
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>50</b>
4.1. Caracterización de las propiedades físico-químicas .....	50
4.2. Determinación de la relación optima de inóculo/sustrato .....	52
4.2.1. Diseño Experimental .....	52
4.2.2. Métodos analíticos .....	55
4.3. Determinación del Potencial Bioquímico de Metano .....	55
4.3.1. Resultados y Discusión .....	56
4.3.1.1. <i>Producción de biogás a condición psicrófila.</i> .....	56
4.3.1.2. <i>Producción de biogás a condición mesófila.</i> .....	61
4.3.1.3. <i>Transformación de los Sólidos Totales y Sólidos Volátiles.</i> .....	65
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>71</b>
5.1. Conclusiones.....	71
5.2. Recomendaciones.....	73
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>80</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Producción de biogás</i> .....	31
Tabla 2. <i>Composición de los residuos del matadero estudiado</i> .....	34
Tabla 3. <i>Materiales de Laboratorio</i> .....	43
Tabla 4. <i>Equipos utilizados</i> .....	43
Tabla 5. <i>Diseño Factorial A*B</i> .....	48
Tabla 6. <i>Caracterización fisicoquímica del inóculo y sustrato</i> .....	51
Tabla 7. <i>Volúmenes para la operación</i> .....	52
Tabla 8. <i>Diseño de tratamiento a Temperatura psicrófila y mesófila.</i> .....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Esquema del proceso de digestión anaerobia. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<i>Figura 2.</i> Flujograma de la Metodología.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<i>Figura 3.</i> Unidad Experimental. ....	49
<i>Figura 4.</i> Purificación y cuantificación del biogás por el método volumétrico. ....	55
<i>Figura 5.</i> Producción diaria de biogás por tipo de RIS. ....	57
<i>Figura 6.</i> Producción acumulada de biogás con los respectivos blancos por cada RIS.....	59
<i>Figura 7.</i> Gráfico de medias .....	60
<i>Figura 8.</i> Producción diaria de biogás por tipo de RIS. ....	62
<i>Figura 9.</i> Producción acumulada de biogás con los respectivos blancos por cada RIS.....	63
<i>Figura 10.</i> Gráfico de medias .....	64
<i>Figura 11.</i> Gráfica de gST/L para cada RIS – 15°C .....	65
<i>Figura 12.</i> Gráfica de gSV/L para cada RIS – 15°C .....	66
<i>Figura 13.</i> Gráfica de gST/L para cada RIS – 30°C .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<i>Figura 14.</i> Gráfica de gSV/L para cada RIS – 30°C .....	67
<i>Figura 15.</i> Gráfica de pH para cada RIS – 15°C .....	68
<i>Figura 16.</i> Gráfica de pH para cada RIS – 30°C .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<i>Figura 17.</i> Actividad Metanogénica Especifica del inóculo (estiércol de vaca).....	81

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A: Actividad Metanogénica Especifica (AME) .....	81
Anexo B: Panel Fotográfico.....	83
Anexo C: Diseño del reactor batch - Escala laboratorio.....	75

## SÍMBOLOS UTILIZADOS

AGV	: Ácidos Grasos Volátiles (mg/L)
AME	: Actividad Metanogénica Específica
APHA	: Métodos Estándar – Asociación Estadounidense de Salud Pública
AT	: Alcalinidad Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)
CH <sub>4</sub>	: Metano
CMNUCC	: Convenio de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
C/N	: Carbono/Nitrógeno
CO <sub>2</sub>	: Dióxido de Carbono
DA	: Digestión Anaerobia
EAFIT	: Escuela de Administración, Finanzas e Instituto Tecnológico
EM	: Energía y minas
FAO	: ONU para la alimentación y la agricultura
FEDNA	: Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal
GEI	: Gases de Efecto Invernadero
GFE	: Gerencia de Fiscalización Eléctrica – Osinergmin
GTITT	: Investigación y Transferencia Tecnológica en Bioenergía
HCl	: Ácido Clorhídrico
IGU	: Unión Internacional del Gas
MINAM	: Ministerio del Ambiente
MINAGRI	: Ministerio de Agricultura
MINEM	: Ministerio de Energía y Minas
NaOH	: Hidróxido de Sodio
ONU	: Organización de las Naciones Unidas

Osinergmin	: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería
Pa	: Pascal
PBM	: Potencial Bioquímico de Metano
pH	: Potencial de Hidrógeno
RIS	: Relación Inóculo – Sustrato
RER	: Recursos Energéticos Renovables
SENASA	: Servicio Nacional de Sanidad Agraria
SF	: Sólidos Fijos
SGA	: Asociación Sueca de Gas
SV	: Sólidos Volátiles
ST	: Sólidos Totales
T° Mesofílica	: Temperatura en torno a los 20° C y 45° C
T° Psicofílica	: Temperatura en torno a los 15 °C y 18° C.
TRH	: Tiempo de Retención Hidráulica
WBA	: Asociación Mundial de Bioenergía

## RESUMEN

Los mataderos y camales en el Perú generan gran cantidad de desechos como las sangres residuales, siendo una oportunidad su tratamiento; la digestión anaerobia es una gran alternativa para la conversión de los residuos en energía renovable. El objetivo de esta investigación fue determinar el potencial de producción de metano a través de las pruebas de potencial bioquímico de metano (PBM).

Los ensayos se llevaron a cabo en tres tipos de dosis a las cuales llamamos relaciones inóculo – sustrato (RIS) 2, 3 y 4 gSVinóculo/gSVsustrato. El proceso de digestión anaerobia se realizó a diferentes temperaturas, las cuales fueron condiciones mesofílicas (35 °C) y psicofílicas (15 °C) y tiempos de residencia hasta finalizar las pruebas PBM. Además, se midieron los parámetros más importantes que influyen en esta digestión: sólidos volátiles, sólidos totales, sólidos fijos, humedad, ácidos grasos volátiles, alcalinidad total y pH; estos parámetros se midieron al inicio y al finalizar las pruebas. El biogás que se obtuvo se purificó por medio de la eliminación de CO<sub>2</sub> con trampas de NaOH 0.1N. Finalmente en el ensayo a condiciones psicofílicas la mayor producción de biogás obtuvo la RIS 2 con 90.94 mL CH<sub>4</sub>/g SV; y a condiciones mesofílicas los tratamientos RIS 2 y 3 no tuvieron tanta diferencia en sus producciones, los cuales estuvieron entre 196.325 y 226.79 mL CH<sub>4</sub>/g SV.

**Palabras clave:** Digestión anaerobia, Potencial Bioquímico de Metano (PBM), relación inóculo/sustrato. sangres residuales de matadero.

## ABSTRACT

Slaughterhouses in Peru generate a large amount of waste such as waste blood, with the opportunity to treat it; anaerobic digestion is a great alternative for converting waste into renewable energy. The objective of this research is to determine the potential for methane production through biochemical methane potential (BPM) testing.

The tests were carried out in three types of doses which we call inoculum/substrate ratio (ISR) 2, 3 and 4 gSVinoculum/gSVsubstrate. The anaerobic digestion process was carried out at different temperatures, which were mesophilic (35 °C) and psychrophilic (15 °C) conditions and residence times until all the organic matter was consumed. In addition, the most important parameters that influence this digestion were measured: volatile solids, total solids, fixed solids, humidity, volatile fatty acids, total alkalinity and pH; these parameters were measured at the beginning and at the end of the tests. The biogas obtained was purified by removing CO<sub>2</sub> with NaOH 0.1N traps. In the case of the test to psychrophilic conditions the treatment with the highest production was 90.94 mL CH<sub>4</sub>/g SV corresponding to RIS 2; and to mesophilic conditions the RIS 2 and 3 treatments did not have so much difference in their productions, which were between 196.325 and 226.79 mL CH<sub>4</sub>/g SV.

**Keywords:** Anaerobic digestion, Biochemical Methane Potential (PBM), inoculum / substrate ratio. slaughterhouse residual blood.

# **CAPÍTULO I**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1. Identificación del Problema**

En la actualidad el ser humano tiene como un desafío el poder encontrar nuevas formas de generación de energía que no impliquen hacer el uso de los combustibles fósiles. Así mismo, se debe tener muy en cuenta que el consumo energético tiene que ser de manera sostenible, preservando los recursos naturales (Molina Tirado, Restrepo Velez, Moreno Toro, & Sanchez Restrepo, 2016). Es por ello que se están desarrollando técnicas para poder reaprovechar los residuos orgánicos, una de estas es la producción de biogás mediante la digestión anaerobia.

La digestión anaerobia (DA) es una de las tantas alternativas que conlleva a la producción de bioenergía, este proceso se da partir de biodegradación de la materia orgánica de los diferentes residuos produciendo gas combustible (Castells, Ripoll, & Pozuelo, 2012), con una alta composición de metano (superior al 60 %), este combustible es conocido como biogás. Este proceso es una alternativa viable por ser de carácter económico, ambiental y tecnológico; además de poder contrarrestar con la deficiente gestión de residuos sólidos y tener un desarrollo sostenible por medio de la generación de energía limpia (FAO, 2012).

La DA es un proceso complejo por las diversas reacciones bioquímicas empleadas y la cantidad de microorganismos involucrados, además estos organismos necesitan distintas condiciones ambientales y de operación para que de esta manera puedan obtener una apropiada interacción con la materia orgánica sometida al tratamiento (Varnero, 2011).

No obstante, la DA es una alternativa tecnológica que fue diseñada para controlar la contaminación ambiental, pero se evidenció un gran interés por su capacidad de poder aprovechar y darles un valor agregado a los diferentes tipos de residuo (Cárdenas Cleves, Parra Orobio, Torres Lozada, & Vásquez Franco, 2016), además de lograr dos subproductos fundamentales y de manera simultánea. Uno de estos productos es el biogás como fuente de energía renovable por su alto contenido de CH<sub>4</sub> predominando en un (60-70 %) aprovechándolo como combustible o generador de calor y el otro es el material digerido como potencial de aplicación agrícola, empleándolo como fertilizante.

Por ende, la DA será una gran alternativa para la conversión de los residuos en energía renovable, asumiendo la gran cantidad de desechos que se producen diariamente en los mataderos del Perú. En el departamento de Cusco existen 2 mataderos autorizados por la entidad competente el Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA); uno de ellos es del tipo 1 y el otro es del tipo 2 (SENASA, 2018). En la provincia de Espinar se encuentra uno de los dos mataderos que es del tipo 1, el cual realiza el faenado de alpacas, llamas y equinos.

Cabe mencionar, que los mataderos del país son establecimientos sin bases tecnológicas, resaltando la ineficiencia en los procesos de sacrificio y faenado del ganado; por ejemplo, el desaprovechamiento de los residuos generados y la inadecuada gestión de los residuos, trayendo como consecuencia impactos negativos sobre el medio ambiente (SENASA, 2018).

El matadero estudiado reaprovecha algunos de sus residuos generados, de las 200 alpacas sacrificadas por cada dos horas, se reaprovecha el estiércol de alpaca la cual se utiliza como abono y la sangre generada en el proceso de sacrificio se aprovecha como nutriente para la elaboración de las galletas contra la anemia. Pero la sangre se reaprovecha en un 30 % y el 70 % restante se deriva al desagüe junto con las aguas residuales.

Es por ello que las sangres residuales serán reaprovechadas mediante la DA, debido a que es una alternativa tecnológica para la producción de biogás a partir de cualquier residuo (Cárdenas Cleves et al., 2016); adicionalmente el biogás podría ser utilizado en calefactores para algunas áreas del matadero, ya que la zona estudiada se ubica a más de 3900 msnm. Pero para poder aprovechar las sangres residuales, es obligatorio medir y/o cuantificar el potencial de producción de metano a través de las pruebas de Potencial Bioquímico de Metano (PBM).

El potencial bioquímico de metano (PBM) o con sus siglas en ingles BMP en un indicador mediante el cual podemos ver la biodegradabilidad de un determinado residuo a partir de la producción de metano acumulado, además se puede determinar la viabilidad del proceso de la DA (Owen, Stuckey, Healy Jr, Young, & McCarty, 1979).

El problema identificado en esta investigación es la limitada evaluación del potencial bioquímico de metano (PBM) de los residuos orgánicos, dentro de ello las sangres residuales de los camales en el Perú.

Las causas de este problema son la falta de conocimiento y el desinterés por reaprovechar los residuos que se producen en estos camales, los limitados antecedentes de investigaciones que puedan determinar técnicamente si existe la posibilidad de reaprovechar la biomasa residual local y nacional en plantas para la producción de biogás y electricidad.

Por otro lado, tenemos el elevado costo de investigación y reducido número de laboratorios que estén a disposición para poder determinar experimentalmente los potenciales de producción de biogás en diferentes residuos producidos por las distintas actividades que se dan nuestro país.

Asimismo, el Ministerio del Ambiente (MINAM) y el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), nos proporcionan limitadas iniciativas que puedan reaprovechar las biomásas residuales de las diferentes actividades, para poder generar energía a partir del biogás producido (Gomez Alvarez, 2017).

Los efectos son el desaprovechamiento de la utilización de los residuos generados en los camales para obtener un beneficio, lo que conlleva a que estos sean desechados en los botaderos o rellenos sanitarios. Este problema no solo termina en la disposición de estos residuos, sino que, al no ser tratados, su descomposición descontrolada genera gases de efecto invernadero que se dispersan en la atmosfera contribuyendo con el calentamiento global. Además, el metano que se genera en los rellenos sanitarios pueden generar incendios si se acumulan excesivamente, generando gases tóxicos.

En base a todo este proyecto plantea el reaprovechamiento de las aguas residuales (sangre) para poder convertirlos en biogás, a partir de la digestión anaerobia. Esto se hace con el fin de que este camal pueda ser auto sostenible con respecto a la energía eléctrica.

## **1.2. Justificación de la investigación**

La digestión anaerobia es un proceso con enormes primacías, el cual trae ventajas en el ámbito ambiental, además de lograr dos subproductos uno de estos es la producción de metano el cual podrá suplir las demandas energéticas y el otro son los biofertilizantes que poseen nutrientes como fosforo, potasio y nitrógeno para

aprovecharlos como abono en los suelos. Asimismo, permite que los residuos sólidos orgánicos cumplan con su ciclo de descomposición y transformación completa. De la misma forma genera el uso de energías renovables y de menor costo, como el combustible, electricidad y demás atenciones ya sea de uso doméstico o industrial (Molina Tirado et al., 2016).

El alto contenido orgánico de los flujos de desechos generados en los mataderos es considerado materia prima atractiva para la digestión anaeróbica (DA). La DA ha sido considerada una de las mejores alternativas para la recuperación de nutrientes y energía de los desechos sólidos orgánicos con alto contenido de proteínas y grasas. En la DA, los desechos orgánicos se convierten en biogás, principalmente metano, y en un digestato rico en nutrientes a través de una sucesión de procesos bioquímicos.

El metano producido puede utilizarse para la producción de energía, mientras que el digestato rico en nutrientes puede emplearse como acondicionador del suelo. Este método de tratamiento alternativo es una opción efectiva, que combina la recuperación de materiales y energía, lo que permite la posibilidad de una industria autosuficiente en energía al mismo tiempo que incorpora un sistema integral de tratamiento de residuos.

El presente proyecto plantea una opción para poder reaprovechar la carga orgánica que de los residuos que se producen en los faenados de los mataderos, específicamente las sangres residuales, transformándolos en biogás y así generar energía. Asimismo, esta es la primera investigación que implica la determinación de la DA o PBM de las sangres residuales, es por ello que también esto ayudará a poder tener bases tecnológicas con respecto a la DA para futuras investigaciones.

### 1.3. Presuposición filosófica

En el libro de Génesis nos menciona, cuando Dios creó este mundo toda la creación fue puesta a disposición de la humanidad (Génesis 1:26, 28). Por ello es indudable el hecho que Dios nos dio el dominio y potestad sobre toda la naturaleza. El mundo de entonces era "bueno en gran manera" (Génesis 1:31).

El universo entero es de Dios y todos nosotros somos sus representantes aquí en la tierra (Gen 2:15), por ello todo lo que aquí tenemos nos fue confiado, pero para poder aprovecharlo de manera sostenible y no a nuestro capricho. Dios demanda de nosotros una fiel mayordomía de nuestro hábitat.

En (Deuteronomio 28:23-24; Salmos 107:33-34), menciona que Dios nos proporciona bendición a causa de la obediencia, pero también menciona que nuestra desobediencia nos conlleva a castigos como las sequías, cambios climáticos, deforestaciones, desaparición de ecosistemas y todo aquello que afecta la calidad de vida. Sin embargo, en la actualidad podemos ver que nuestro mundo está enfrentando una crisis ecológica de dimensiones cataclísmicas.

Recordar que Dios nos dice que "destruirá a los que destruyen la tierra" (Apocalipsis 11:18). No por el hecho que Dios nos permitió tomar los recursos que hay en la tierra para satisfacer nuestras necesidades, pero eso no nos da derecho a explotarlo incontrolablemente. Lo único que Dios nos pide es aprovechar los recursos de este planeta de manera sostenible, tomando solo lo necesario; porque no solo nuestra generación estará en este planeta, sino que vendrán más generaciones hasta la segunda venida de Dios.

Por ello para seguir preservando lo poco que nos queda de nuestro planeta, es preciso realizar investigaciones que sean concernientes con la preservación del medio ambiente, así como está destinada la presente investigación.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

- Determinar el Potencial Bioquímico de Metano (PBM) de las sangres residuales de camal a escala de laboratorio, 2019.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar las propiedades físico-químicas de las sangres residuales de camal.
- Determinar la relación óptima de inóculo/sustrato para la producción de biogás a partir de las pruebas PBM.

## **CAPÍTULO II:**

### **REVISIÓN DE LA LITERATURA**

#### **2.2. Fundamentos del objeto de estudio**

##### **2.2.1. Sangres**

La sangre es uno de los primeros subproductos que se obtienen a partir del sacrificio de los animales, en muchos casos se desecha o se sub utiliza a pesar de representar alrededor de un 60 % del potencial de producción de proteínas (plasma) y un contenido de hierro (corpúsculos) de 400-500 mg/L; su rendimiento es alrededor del 4.5 % del peso vivo del animal en bovinos (Venegas, 1995).

##### **2.2.2. Composición de la sangre**

La sangre está formada por plasma, fracción celular y fracción fibrilar. El plasma contiene en solución de diversas sustancias como lipoproteínas, ácidos grasos no esterificados, azúcares, proteínas solubles (albúminas y globulinas) y sales minerales. La fracción celular (eritrocitos, leucocitos y plaquetas) es rica en hemoglobina. Las proteínas de la fracción sérica y la fibrina son de mejor calidad que la hemoglobina. La sangre debe obtenerse en condiciones asépticas (preferiblemente por extracción directa) (FEDNA, 2013).

El plasma, que es un componente rico en proteínas, en el que están suspendidos los elementos celulares como eritrocitos, leucocitos y trombocitos. Los glóbulos rojos contienen el pigmento sanguíneo llamado hemoglobina. Los glóbulos blancos son células que poseen núcleo, pero no tienen membrana ni color y son mucho menos abundantes que los eritrocitos. En el plasma se encuentran las sales sanguíneas (fosfato potásico, cloruro sódico y pocas sales de Ca, Mg y Fe), una gran cantidad de proteínas, entre las que se destaca la albúmina, diversas globulinas y el fibrinógeno (Zamora Huaman, 2016).

### **2.2.3. Digestión Anaerobia**

La DA llamada también biometanización, es un proceso biológico que se lleva a cabo en ausencia del oxígeno molecular ( $O_2$ ) en el cual la materia orgánica se descompone por la acción conjunta de diferentes microorganismos (grupos de arqueas y bacterias) para producir biogás y un digerido muy degradado o estabilizado (Madrigal Pérez, 2019).

La DA es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que suceden por la variedad de microorganismos presentes, estos organismos biológicos requieren de diversas condiciones ambientales y de operación que les permitan una adecuada interacción con los sustratos (Varnero, 2011). El proceso se divide por fases diferenciadas por los diversos grupos de bacterianas que intervienen y los productos que generan (Pavlostathis & Giraldo Gómez, 1991).

La DA de materia orgánica produce biogás, con una alta composición de metano, lo cual conlleva a la eliminación/depuración de la carga orgánica (Castells et al., 2012); es también una alternativa viable para poner en valor diversos residuos orgánicos por medio de la generación de energía limpia (FAO, 2012).

El término co-digestión anaerobia se utiliza para señalar que es un proceso de DA de dos o más sustratos. El principal aspecto positivo de la co-digestión radica en el

aprovechamiento de la sinergia de los co-sustratos, compensando entre ellos las carencias de cada uno, lo cual puede resultar en un incremento importante en el PBM (Esposito et al., 2012).

El principal producto generado a partir de la DA es el biogás, que está compuesto principalmente por CH<sub>4</sub> (50-70 %) y CO<sub>2</sub> (30-50 %), también se presencia otros gases, pero en pequeñas cantidades. La composición dependerá del tipo de residuo a tratar, así como del proceso. Además, por su elevado contenido en CH<sub>4</sub> este biogás puede ser utilizado en una amplia variedad de aplicaciones, como fuente de calor (cocina y alumbrado), uso en calderas, en motores de cogeneración, combustible de vehículos o ser incorporado a la red de gas natural (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2005).

#### **2.2.4. Bases microbiológicas del proceso anaerobio**

El proceso de DA se da principalmente por la ausencia del oxígeno. En este proceso un gran número de microorganismos trabajan en serie o en forma paralela degradando y consumiendo la materia orgánica presente en los residuos. La degradación se da en las distintas etapas que tiene la digestión anaerobia.

En la experiencia ingenieril se considera principalmente tres niveles para los residuos sólidos o lodos (hidrólisis, acidogénesis, metanogénesis) y dos para residuos líquidos (acidogénesis y metanogénesis); pero en el proceso completo está constituido las cuatro etapas o niveles tróficos hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2005).

##### **2.2.4.1. Hidrólisis o licuefacción.**

En este primer nivel los compuestos de la materia orgánica son solubilizados por enzimas excretadas por los microorganismos hidrolíticos que operan en la superficie

celular por ello se consideran exoenzimas. La hidrólisis es, por tanto, la conversión de los polímeros en sus respectivos monómeros (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2005).

#### **2.2.4.2. Acidogénesis.**

En esta etapa los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos derivados de la hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico, fundamentalmente (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2005).

#### **2.2.4.3. Acetogénesis.**

También llamada acidogénesis intermediaria, en esta etapa los productos derivados son convertidos en ácido acético, hidrógeno y CO<sub>2</sub> (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2005).

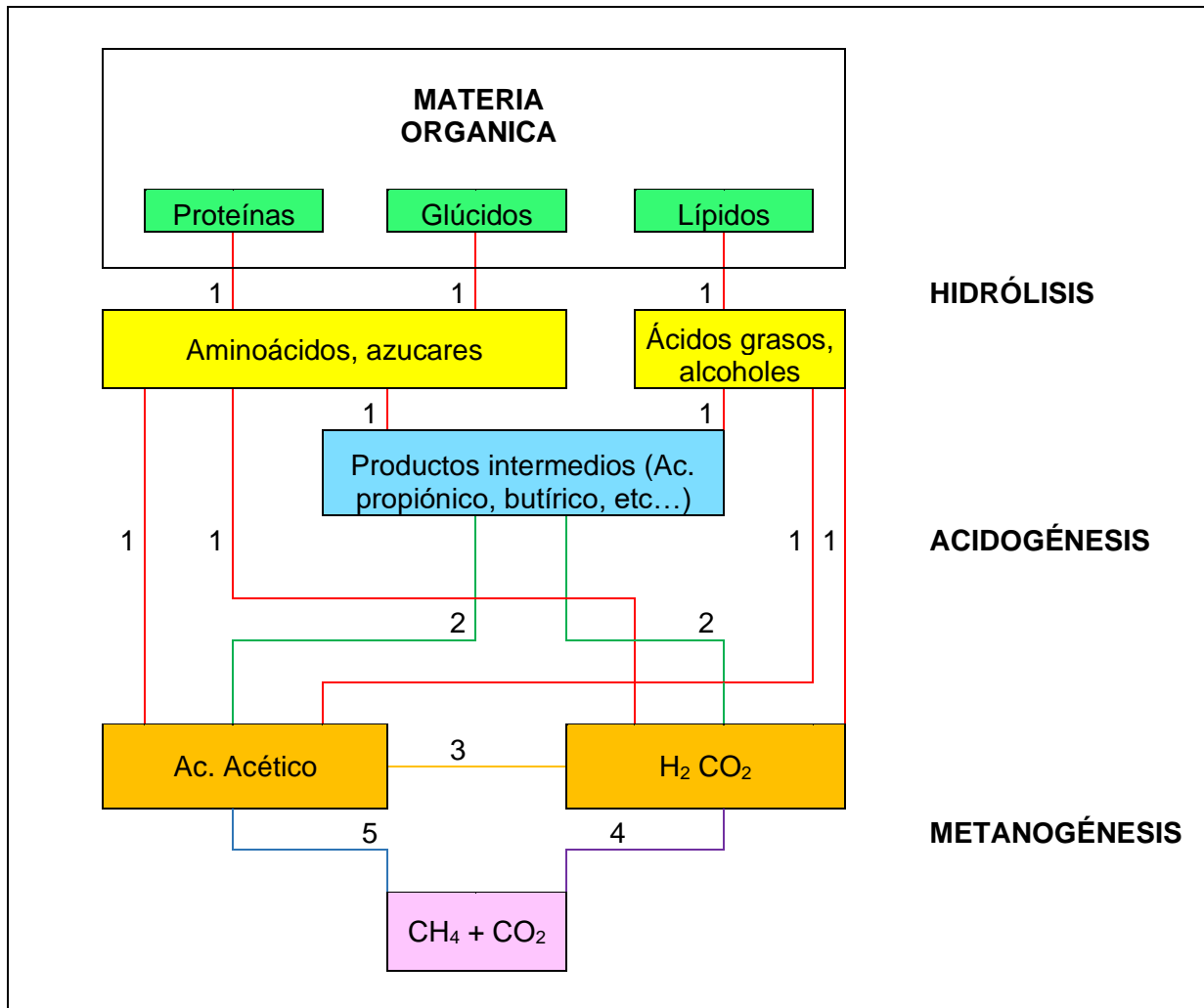
#### **2.2.4.4. Metanogénesis.**

Las bacterias metanogénicas son caracterizados estrictamente como anaerobias estricta porque producen metano, el cual es un producto principal del metabolismo energético (Whitman, WB, Bowen, & Boone, 1992). La actividad metanogénica se da más en los ecosistemas de agua dulce y terrestres, pero con menor actividad detectada en los océanos, esto se debe a una alta concentración de sulfatos, condición que favorece la sulfato reducción en sedimentos marinos (Zinder, 1998).

Finalmente ocurre la metanogénesis, que produce principalmente CH<sub>4</sub> a partir de ácido acético y/o a partir de las mezclas H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. El rol de las bacterias metanogénicas se define por el tipo de sustrato disponible (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2005).

A continuación, se muestra el proceso de la DA:

Figura 1. Proceso de la digestión anaerobia



*Leyenda:* 1 bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno; 3: bacterias homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas. Obtenido de (Pavlostathis & Giraldo Gómez, 1991).

## 2.2.5. Parámetros ambientales y operacionales

### 2.2.5.1. Tamaño de las partículas

Las características físicas del sustrato a utilizar influyen durante el proceso de DA y su producción de metano. Por ello es necesario reducir el tamaño del residuo a trabajar, ya que este acto incrementara el área superficial para que las enzimas de los microorganismos puedan reducir con facilidad las macromoléculas, además mejora el proceso biológico, reduce el tiempo de retención hidráulico e incrementa la producción del biogás (Raposo, Fernández-Cegrí, de la Rubia, et al., 2011).

### **2.2.5.2. Relación inoculo – sustrato (RIS)**

La RIS es un parámetro importante que nos indica la optimización del proceso; la RIS se expresa en términos de Sólidos Volátiles (SV) del inoculo y sustrato ( $\text{gSV}_{\text{inoculo}}/\text{gSV}_{\text{sustrato}}$ ) (Cárdenas Cleves et al., 2016).

Aunque no hay estudios que especifiquen una RIS adecuada, (Madrigal Pérez, 2019) en trabajos anteriores nos muestran que hay más rendimiento a rangos elevados (mayores a 1.5) porque el proceso se estabiliza, en cambio en valores menores a 1 el proceso tiende a desestabilizarse por los fenómenos de acidificación, en ese caso los rangos más recomendados serían entre 1.5 y 2 (Raposo, Fernández-Cegri, De la Rubia, et al., 2011).

### **2.2.5.3. pH**

El rango de pH que se requiere en el proceso de DA es de 6.5 – 8 (Madrigal Pérez, 2019), si los valores están por encima o por debajo de los rangos mencionados, se puede desestabilizar el proceso.

El pH debe estar siempre próximo a la neutralidad, es muy importante recordar que este valor determina la producción de metano en el biogás y la presencia de otros componentes (Agrowaste, 2013).

### **2.2.5.4. Nutrientes**

La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) es muy importante en la DA, ya que estos son fuente de alimento para las bacterias metanogénicas, recomendando una relación C/N de 20-30 (Agrowaste, 2013).

### **2.2.5.5. Temperatura**

La DA habitualmente se trabaja en temperaturas mesofílicas (25-45 °C) y termofílicas (>45 °C), pero pocas veces se trabaja a temperaturas psicofílicas (<20 °C), ya que las reacciones biológicas aceleran cuando la temperatura aumenta (Madrigal Pérez, 2019), pero los ensayos generalmente se trabajan a condiciones mesofílicas.

### **2.2.5.6. Ácidos Grasos Volátiles (AGV)**

Los AGV es otro de los parámetros importantes que influyen en este proceso, por ser el precedente de la metanogénesis, es importante considerar que la concentración de los AGV no debe ser mayor a 2000 mg/L (Lorenzo Acosta & Obaya Abreu, 2005) porque una acumulación excesiva conlleva a que el pH baje y se dé el fenómeno de acidificación.

### **2.2.5.7. Alcalinidad Total (AT)**

Los valores en este parámetro deben ser mayores a 3000 mg<sub>CaCO<sub>3</sub></sub>L<sup>-1</sup> (Holliger et al., 2016).

### **2.2.5.8. Sólidos Totales (ST)**

Los SV son el contenido de materia orgánica que será consumido durante el proceso de DA (Madrigal Pérez, 2019), gracias a este parámetro se sabe si se biodegradó en su totalidad la materia orgánica o no.

## **2.2.6. Biogás**

El biogás se produce a partir de la DA de diferentes tipos de residuo y en su composición principalmente está el metano (CH<sub>4</sub>) con un 50 % y 75 % de predominancia, seguido por el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) entre 25 % y 50 % (World Bioenergy

Association, 2015). Además, posee otros compuestos en menor proporción como el agua ( $H_2O$ ), el oxígeno ( $O_2$ ), trazas de azufre ( $S_2$ ) y sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ).

Cabe mencionar, que si el biogás producido llegara a purificarse aproximadamente en un 98 % (hasta convertirlo en biometano) obtiene las mismas propiedades que el gas natural (Da Costa, 2013).

#### **2.2.6.1. Biogás en el Mundo**

Según International Gas Union (2015), nos menciona que en el mundo hay varias plantas que realizan la DA ya sea con digestores pequeños o digestores a escala industrial, estas plantas reaprovechan los residuos de matadero, residuos domésticos, residuos industriales y excretas de animales. El biogás que se produce habitualmente se emplea como combustible de uso doméstico (cocina, iluminación) y en otros casos se utiliza en la en la producción de electricidad y/o fuente de calor.

El país que se destaca como el país con mejores avances en la producción y uso de biogás es Suecia, además de esto ellos lograron purificar el biogás con diferentes procesos, el cual les permitió que este se pueda emplear como combustible para vehículos.

Son varios los países que invierten en estos sistemas. Por ejemplo, Corea del Sur y Reino Unido cada vez incrementan más rellenos sanitarios que cuentan con un sistema avanzado y que permite la obtención del biogás. En los países del continente europeo se construyeron varias plantas de tratamiento de aguas residuales destinadas a la producción de biogás. Además, en Dinamarca se tiene como sustrato principal al estiércol mientras que en Suecia y Alemania se utilizan residuos de alimento (International Gas Union, 2015).

En el año 2012 se produjeron 1212 PJ (Petajulios), el cual es un aproximado de 56,1 millones de m<sub>3</sub> de biogás. Cabe destacar que el biogás se instaura como un sustituto principal frente a las demás fuentes de energía. En el continente africano el biogás es una fuente sostenible que sustituye el uso tradicional de la leña y carbón vegetal. En la actualidad se conoce que Europa es el mayor productor de biogás en el mundo (World Bioenergy Association, 2015). En la Tabla 1, se puede observar algunos datos mundiales de producción de biogás perteneciente al año 2012.

Tabla 1.

*Producción de biogás*

Año	Mundo	África	América	Asia	Europa	Oceanía
2000	285	-	132	50.5	95.1	7.11
2005	500	-	169	150	171	9.24
2010	939	0.08	236	325	362	15.7
2011	1100	0.12	247	397	439	16.5
2012	1212	0.3	282	398	511	20.2

*Nota:* Las unidades de medida para la producción de biogás se muestran en Petajulios (PJ). Obtenido de (World Bioenergy Association, 2015).

Los digestores domésticos convencionales de bajo costo son considerados tecnologías viables para el crecimiento de servicios de energía en países que están en desarrollo. Diversos países realizan campañas que inducen al uso y producción del biogás, teniendo buenas aceptaciones por las personas en las últimas décadas (Cheng et al., 2014). En cambio en América Latina desde 1953 se poseía digestores destinados a la producción de biogás netamente doméstico, sin embargo desde 1975 se empezaron a crear digestores con una trascendencia más extensa (Caceres & Chilibingua, 1986).

#### **2.2.6.2. Biogás en el Perú**

A finales del año 70 en el Perú se llevaron a cabo investigaciones y promoción de biodigestores para el uso doméstico llamados “domo fijo”, los cuales estuvieron a cargo

del Instituto de Investigación Tecnológica Industrial de Normas Técnicas. En esta iniciativa resaltaron dos proyectos que fueron ejecutados por la Universidad Nacional de Cajamarca y por la empresa Gloria S.A. – Arequipa (GTITT, 2010).

En el año 2007, se realizaron más proyectos de DA, en la provincia de Canas (Yanaoca) perteneciente al departamento de Cusco, se colocaron 13 digestores de forma tubular, además se instaló una planta piloto en el Fundo K'ayra de la Universidad San Antonio del Cusco. Para que esta investigación obtenga mayor promoción también se instalaron digestores tubulares de polietileno en Cajamarca, este último fue proporcionado por Soluciones Prácticas (GTITT, 2010).

También tenemos otros antecedentes de proyectos con biodigestores a escala industrial, uno de ellos es del Fundo América (empresa dedicada al cultivo de productos agrícolas y crianza de animales) ubicado en el departamento de Arequipa, esta empresa cuenta con dos biodigestores de geo membrana que realizan el tratamiento de las excretas de ganado vacuno (GTITT, 2010). La otra experiencia se encuentra en Ica, en la avícola La Calera, donde cuentan con 4 biodigestores, los cuales realizan el proceso de DA con una disposición de 100 toneladas de gallinaza por día (Minag & Prácticas, 2011), en total la capacidad de producción instalada corresponde a los 7000 m<sub>3</sub> de biogás por día (Acosta, Martí, Gonzales, & Veen, 2013).

Pero una de las instalaciones principales del Perú es la Central Térmica de Biomasa de Huaycoloro, este inició sus operaciones el 28 de octubre del 2011. Esta central captura el biogás que es producido por 3,500 t/día de residuos sólidos urbanos transformándolos en energía eléctrica la cual es insertada al Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) (Petramás, 2016).

### **2.2.6.3. Usos del biogás**

El biogás se puede utilizar en diversas actividades. Este compuesto se puede utilizar para generar calor en un punto de generación estable o para la calefacción a distancia (redes de calefacción urbana). También se puede generar energía eléctrica o combustible para vehículos, tal como lo mencionan (Uusitalo, Soukka, Horttanainen, Niskanen, & Havukainen, 2013), además nos dicen que el biogás más se emplea en la generación de calor, sin embargo, en su aplicación como combustible para vehículos su uso será mucho más eficiente en términos de reducción de emisiones de GEI.

### **2.2.7. Biofertilizantes**

Uno de los subproductos que tiene el proceso de DA es el biofertilizante, un producto final que no contiene ningún agente contaminante que puede ser usado como fertilizante de suelos, previamente evaluado y comparado con la norma técnica del país que corresponda (Swedish Gas Association, 2011).

La eficacia de los biofertilizantes generados durante el proceso de la DA dependerá al tipo de residuo que se utilizó y al método empleado. Los residuos que se obtienen se clasifican en dos tipos un es el biosol (subproducto sólido) y el biol (subproducto líquido).

Asimismo, los abonos líquidos se originan en los biodigestores continuos con una alta tasa de carga y con bajo contenido de sólidos totales (ST) (inferior al 12 %), este tipo de abono presenta un inconveniente en su comercialización pues porque se presenta en estado líquido. En cambio los abonos sólidos luego de ser secados se pueden trasladar y comercializar sin ningún tipo de problema, estos abonos se generan en digestores batch o semicontinuos (Guevara, 1996).

### 2.2.8. Mataderos

Los mataderos tienen la finalidad de producir carne preparada, estos cuentan con un debido proceso en el sacrificio de animales, además se emplean técnicas higiénicas y realizan adecuada gestión de sus residuos sin generar impactos negativos (FAO, 2012).

Según Tritt & Schuchard (1992) nos menciona que los residuos de los mataderos, en específico las sangres residuales se caracterizan por un elevado contenido en materia orgánica, principalmente compuesta por proteínas.

Existen pocas referencias bibliográficas en cuanto a la cuantificación, características y potenciales de metanización de los subproductos animales y de las corrientes residuales de matadero; pero los autores Edström, Nordberg, & Thyselius (2003), realizaron una primera revisión de los flujos de producción y estrategias de tratamiento de la industria cárnica Alemana y Suiza. Así mismo, Hejnfelt & Angelidaki (2009) han caracterizado de forma individual las fracciones y los potenciales de metanización en mataderos de Dinamarca como se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2.

*Composición de los residuos del matadero estudiado*

<b>Sustrato</b>	<b>Sólidos Totales - ST (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Materia Orgánica (% ST)</b>	<b>Proteína* (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Grasa (g kg<sup>-1</sup>)</b>
Sangre	150-200	92-95	145-200	-
Grasa bovino	800-850	95-98	20-40	820-850
Decomisos(vísceras)	230-250	85-95	150-170	40-60
Tripería	180-190	95-98	70-80	85-90
Contenido ruminal	115-120	90-95	70-80	85-90
Harinas de carne	950-970	70-80	520-560	110-130

*Nota: El contenido en proteína se estimó a partir de una relación 6,25 proteína/Norg. Obtenido de (Hejnfelt & Angelidaki, 2009).*

### **2.3. Métodos para la acción del objeto de estudio.**

En los trabajos que revisados se pudo obtener diferentes metodologías para poder determinar el potencial bioquímico de metano a escala laboratorio. Lo primero que debe tener en cuenta en este trabajo es verificar qué características tienen los sustratos con el que se va a trabajar

#### **2.3.1. Las características de los sustratos**

En uno de los trabajos Lopes do Carmo & Silva (2012), nos muestra su metodología que uso en su trabajo, menciona que los sustratos fueron determinados mediante los métodos estándar (APHA, 2005).

Se utilizó un Multiparámetro Hanna (HI 9828) para caracterizar el pH. También se usó una Estufa Memmert (UN 55), una Mufla Naberthen (LE 2/11/R6) y una Balanza Analítica de Alta Sensibilidad Sartorius (98648-019-82) para determinar el contenido de humedad, ST, SV, y SF de las muestras. Para la determinación del carbono orgánico total se consideraron los SV. La determinación del nitrógeno total fue ejecutada con un juego de reactivos de nitrógeno total, alto rango, TNT (Hach) y un espectrofotómetro Único SQ-2800 (Method 10072).

#### **2.3.2. La producción de metano**

El autor Gómez (2017) en su trabajo de investigación nos dice que la producción de metano se midió a partir de la producción de biogás. Además, menciona que el biogás producido se retiró diariamente de las unidades experimentales para luego ser almacenadas en un dispositivo de látex expansible, este estuvo inmerso en el agua en un sistema especialmente diseñado.

El método empleado fue por volumetría lo que indica que, al ingresar el gas, este desplazó el agua del sistema hacia una probeta graduada, con ello se determina el volumen generado en mL. Para poder determinar la calidad del biogás se usó un Detector de gases Altair 5X IR, este equipo está habilitado con sensores infrarrojos y electroquímicos para medir %v/v de CH<sub>4</sub>, %v/v de O<sub>2</sub>, ppm de H<sub>2</sub>S y ppm de NH<sub>3</sub>. La producción de metano se determinó multiplicando el %v/v de CH<sub>4</sub> de la muestra por el volumen total de biogás generado.

### 2.3.3. Los Sólidos Volátiles

Los sólidos volátiles son fundamentales en el diseño de los experimentos, cada tratamiento o dosis está fijado por la mezcla entre Sustrato 1 y Sustrato 2 en términos de sólidos volátiles. Tener en cuenta que los SV se miden al inicio y al final de cada ensayo en gSV. Los parámetros ST y SV son proporcionales a la cantidad de materia orgánica degradable en una muestra (R. Zhang et al., 2007).

### 2.3.4. El potencial bioquímico de metano (PBM)

El potencial bioquímico de metano se determinó dividiendo la producción acumulada de metano por unidad experimental (mLCH<sub>4</sub>) entre los gramos de sólidos volátiles adicionados en los experimentos (gSVadicionados), según el manual del Laboratorio de Biotecnología & Universidad Industrial Santander (2015) como se observa en la Ecuación 1.

$$PBM = \frac{\text{mL CH}_4}{\text{gSVadicionados}} \dots\dots\dots (1)$$

## 2.4. Resultados anteriores de investigación

### 2.4.1. Antecedentes Internacionales

En el artículo que lleva el título “Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares” se hizo con la finalidad obtener de biogás y determinar PBM al final del proceso. Mediante la DA se pudo descomponer la materia orgánica presente en los residuos alimenticios de cocina (sustrato) con lodo (inóculo) de una planta de tratamiento de aguas residuales. Los ensayos que se llevaron a cabo fueron con relaciones sustrato: inóculo (S:I) 1:2 y 1:3, en términos de sólidos volátiles (SV). Estos ensayos fueron a condiciones mesofílicas (35 °C) y tiempos de residencia de 15 días. El método para la purificación del gas se eliminó el H<sub>2</sub>S y NH<sub>3</sub> con trampas de NaOH y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1M. La cuantificación de este gas se llevó a cabo por cromatografía de gases. En la determinación de PBM se obtuvieron 124.82 y 127.89 mL CH<sub>4</sub>/g SV para experimentos S:I-1:3 y para la relación 1:2, 103.39 y 116.27 mL CH<sub>4</sub>/g SV. (Sánchez Reyes et al., 2016).

Asimismo, el artículo “Biochemical methane potential (BPM) test: Reducing test time by early” nos da a conocer sobre lo importante que es hacer pruebas de sobre el potencial bioquímico de metano (PBM) a escala laboratorio. Este estudio desarrolla una estrategia matemática donde utiliza funciones de sensibilidad para la predicción temprana de los parámetros del modelo de primer orden de PBM, es decir, el rendimiento de metano (B<sub>0</sub>) y la tasa de cinética constante (k). El tiempo mínimo de prueba para la estimación temprana de parámetros mostró una correlación potencial con el valor k, donde los sustratos lentamente biodegradables ( $k \leq 0.1 \text{ d}^{-1}$ ) tienen un tiempo de prueba mínimo de  $\geq 15$  días, sustratos moderadamente biodegradables ( $0.1 < k < 0.2 \text{ d}^{-1}$ ) tienen un tiempo de prueba mínimo entre 8 y 15 días, y los sustratos rápidamente biodegradables ( $k \geq 0.2 \text{ d}^{-1}$ ) tienen tiempos de prueba inferiores a 7 días. (Da Silva, Astals, Peces, Campos, & Guerrero, 2017).

Por otro lado, tenemos el proyecto de investigación que lleva por título “Determinación a escala laboratorio de la relación sustrato/inoculo en la biodigestión de residuos orgánicos de la universidad EAFIT”, en su proyecto de investigación se han trabajado diferentes relaciones entre sustrato e inóculo (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % g inóculo/g totales) a fin de encontrar la relación óptima para realizar el proceso de biodigestión de los residuos orgánicos de la universidad EAFIT. En los ensayos se ha registrado la cantidad de biogás producida diariamente para las diferentes proporciones mediante desplazamiento volumétrico y se ha determinado que la relación que ofrece mayor cantidad de biogás en un periodo de 15-20 días es de 10 %. (Molina Tirado et al., 2016).

En el trabajo de investigación “Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland” nos da conocer cómo se da la producción de metano a partir de los residuos de matadero. Este estudio se llevó a cabo para evaluar el potencial de recuperación de energía de los subproductos industriales orgánicos de una instalación de sacrificio de ganado. Se utilizaron lodos, trozos, despojos suaves y una corriente de residuos mixta (combinación de corrientes de residuos individuales) determinado a través de una serie de ensayos bioquímicos de potencial de metano en condiciones mesofílicas. El potencial de metano de los flujos de residuos caracterizados osciló entre 49.5 y 650.9 mLCH<sub>4</sub>/gVS 1. (Aidan Ware, 2016).

Por último, en el artículo “Influence of inoculums/substrate ratios (ISRs) on the mesophilic anaerobic digestion of slaughterhouse waste in batch mode: Process stability and biogas production” realizaron experimentos de digestión por lotes para determinar los efectos de la proporción de inóculos/sustrato de tres proporciones diferentes (RIS) de 0,3, 0,5 y 1. El sustrato elegido en este estudio fue el desperdicio de mataderos. La inoculación se realizó mediante lodos emitidos desde la planta de tratamiento de aguas residuales. El método que se utilizó fue el volumétrico. La variación del pH y los valores

de AGV/AT han mostrado una alta estabilidad en el proceso de digestión anaeróbica. La producción de biogás aumentó a medida que disminuía el valor (RIS). La producción acumulada de biogás después de 47 días de digestión para los diferentes 1, 0.5 y 0.3 (ISR) fue de 504, 856 y 864 mL, respectivamente. (Slimane, Fathya, Assia, & Hamza, 2014).

#### **2.4.2. Antecedentes Nacionales**

El autor Gomez Alvarez (2017) en su proyecto de investigación que se titula “Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) y del potencial de suministro eléctrico neto de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de mercados de abasto de Arequipa” el objetivo de este trabajo fue determinar el PBM y el potencial de suministro eléctrico neto que puede producir los residuos urbanos. El método que utilizó para la cuantificación del gas producido fue el volumétrico y para la cuantificación del gas producido fue el volumétrico y para la ver la calidad del biogás purificado se determinó con un Detector de gases Altair 5X IR habilitado con sensores infrarrojos y electroquímicos para medir %v/v de CH<sub>4</sub>, %v/v de O<sub>2</sub>, ppm de H<sub>2</sub>S y ppm de NH<sub>3</sub>. Los resultados nos muestran que, de los 7 tratamientos realizados, el tratamiento 2 fue el más óptimo porque en este se puede tratar mayor volumen de residuos sólidos y también fue uno de los que más produjo gas. Se obtuvo un PBM de 362.22 mLCH<sub>4</sub>/gSV.

#### **2.5. Marco Legal**

En las normas peruanas se tiene como principal a la Constitución Política del Perú del año de 1993, en el Art. 2°, inciso 22, menciona “toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida”.

En el Perú se implementaron políticas que fomentan el desarrollo del país asegurando el uso responsable y sostenible de nuestros recursos naturales. Además de contribuir con un desarrollo económico, social, cultural y sobre todo en armonía con el

entorno. Es por ello que se ha venido promoviendo el desarrollo de proyectos como el manejo de los residuos sólidos, uso de energías renovables, entre otros (DS N°012-2009-MINAM, 2009).

- **DECRETO SUPREMO N° 012-2009-MINAM: “POLÍTICA NACIONAL DEL AMBIENTE”**

El objetivo de la Política Nacional del Ambiente (2009) es mejorar la calidad de vida de las personas, garantizando la existencia de ecosistemas saludables, viables y funcionales en el largo plazo; y el desarrollo sostenible del país, mediante la prevención, protección y recuperación del ambiente y sus componentes, la conservación y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales.

- **DECRETO LEGISLATIVO N° 1002: “Decreto Legislativo de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables”**

El presente DL N°1002 (2008) tiene por objeto promover el aprovechamiento de los Recursos Energéticos Renovables (RER) para mejorar la calidad de vida de la población y proteger el medio ambiente, mediante la promoción de la inversión en la producción de electricidad; el uso de las energías renovables.

- **DECRETO SUPREMO N° 021-2007-EM: “Reglamento para la comercialización de Biocombustibles”**

El presente Reglamento DS N° 021-2007-EM (2007) establece los requisitos para la comercialización y distribución de los Biocombustibles, así como lo referente a las normas técnicas de calidad de los mencionados productos.

- **DECRETO SUPREMO N° 064-2010-EM: “APRUEBAN LA POLÍTICA ENERGÉTICA NACIONAL DEL PERÚ 2010-2040”**

El DS N° 064-2010-EM (2010) tiene como visión ser un sistema energético que satisface la demanda nacional de energía de manera confiable, regular, continua y eficiente, que promueve el desarrollo sostenible.

Asimismo, el Perú es parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) desde 1993; y en tal condición comparte el objetivo de la Convención es estabilizar la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera y evitar llegar a un nivel de interferencia antropogénica peligrosall (Resolución Legislativa N° 26185, 1993). De igual manera el Perú se ratificó también en el Protocolo de Kioto en 2002 (Resolución Legislativa N°27824, 2002). Asumiendo como compromiso promover la aplicación, difusión, transferencia de tecnologías que controlen, reduzcan o prevengan emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (ONU, 1992).

## **CAPÍTULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Descripción del lugar de ejecución**

##### **3.1.1. Datos de ubicación del lugar experimental**

La población de estudio es la sangre residual de los camales que se dedican al faenado de alpacas. Las muestras se trajeron del camal municipal, ubicado en la provincia de Espinar, departamento de Cusco; esta zona es considerada alto andina porque está a una altitud de 3938 msnm.

El lugar donde se realizó la parte experimental fue en el Laboratorio de Saneamiento Ambiental de la Universidad Peruana Unión – Filial Juliaca.

#### **3.2. Materiales, insumos y equipos.**

##### **3.2.1. Materiales**

En la Tabla 3 se muestran todos los materiales que se utilizaron en el laboratorio, durante la ejecución del proyecto.

Tabla 3.

*Materiales de Laboratorio*

<b>Materiales</b>		
<b>Laboratorio</b>	<b>Biodigestor</b>	<b>Reactivos</b>
Agujas hipodérmicas	Recipiente hermético	Acetato de sodio (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> NaO <sub>2</sub> )
Bureta	Manguera transparente	Ácido clorhídrico (HCl)
Gas Nitrógeno 5.0 UAP	Termostato acuático	Fenolftaleína (C <sub>20</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub> )
Botellas de vidrio (reactores batch) de 250 ml	Bandeja de acero inoxidable	Hidróxido de sodio (NaOH)
Llave de tres vías		
Matraz Erlenmeyer de 50 ml		
Pipetas de 5 y 10 ml		
Probetas de 25, 50 y 100 ml		
Vaso precipitado de 50 ml		

*Fuente:* Elaboración propia.

### 3.2.4. Equipos

Tabla 4.

*Equipos utilizados*

<b>EQUIPO</b>	<b>MARCA</b>	<b>MODELO</b>	<b>CODIGO</b>
Estufa	BINDER	FD 23	
Mufla	NABERTHERM	LE2/11/R6	LE020K1RN
Potenciómetro de Mesa	MILWAUKEE	Mi 150	
Balanza analítica	SARTORIUS ENTRIS 0.1 mg		
Centrifuga	FARLAB	80 - 4	
Agitador magnético	VELP SCIENTIFICA	169978	F20530162
DBO (estufa)	SHELOLAB	SRI3-2	10018418

*Fuente:* Elaboración propia.

### 3.3. Métodos de análisis

#### 3.3.1. Pretratamiento del inóculo

El inóculo (estiércol de vaca) se recolecta de la finca de la Universidad Peruana Unión, Juliaca para luego ser llevado al laboratorio para su respectiva preparación e incubación.

En el laboratorio de Saneamiento Ambiental de la Universidad Peruana Unión se realizó un pretratamiento que consiste en la preparación de las muestras que se recolectaron con agua destilada a una relación de 3/1, lo que significa que por un kilogramo de estiércol de vaca se agrega 3 litros de agua destilada, luego se mezcla hasta obtener una muestra homogénea.

### **3.3.2. Pretratamiento del sustrato**

El sustrato con el que se trabajó en este proyecto fueron las sangres residuales de camal municipal. Las muestras fueron recolectadas en frascos de vidrio de 100 mL a 4 °C y fueron preservados con refrigerantes por un tiempo máximo de 4 horas. En el laboratorio se hizo un pretratamiento a las muestras que consiste en licuar las sangres residuales para poder homogenizarlas. El licuado producido se llamará “sustrato base”.

### **3.4. Activación de los Microorganismos Eficientes**

Para la activación de los microorganismos, se incubó el inóculo en un reactor a una temperatura mesofílica (30 °C), previamente mezclados con agua destilada como se menciona anteriormente, con un TRH de 30 días.

### **3.5. Características físico-químicas del inóculo y el sustrato**

Los parámetros que influyen en estos ensayos de PBM son: sólidos fijos (SF), sólidos volátiles (SV) y sólidos totales (ST), las cuales se analizaron mediante el método gravimétrico (R. Zhang et al., 2007). Además, se hizo el respectivo análisis de pH mediante el método potenciómetro (Laboratorio de Biotecnología & Universidad Industrial Santander, 2015).

Asimismo, se determinó los ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (AT) con el método titrimétrico (Laboratorio de Biotecnología & Universidad Industrial Santander,

2015), para poder determinar estos dos últimos parámetros se utilizaron soluciones ácidas como el ácido clorhídrico (HCl) y soluciones alcalinas como el hidróxido de sodio (NaOH), ambas soluciones tienen que estar al 0.1 N. Tener en cuenta que estos parámetros se medirán al inicio y al final de las pruebas PBM.

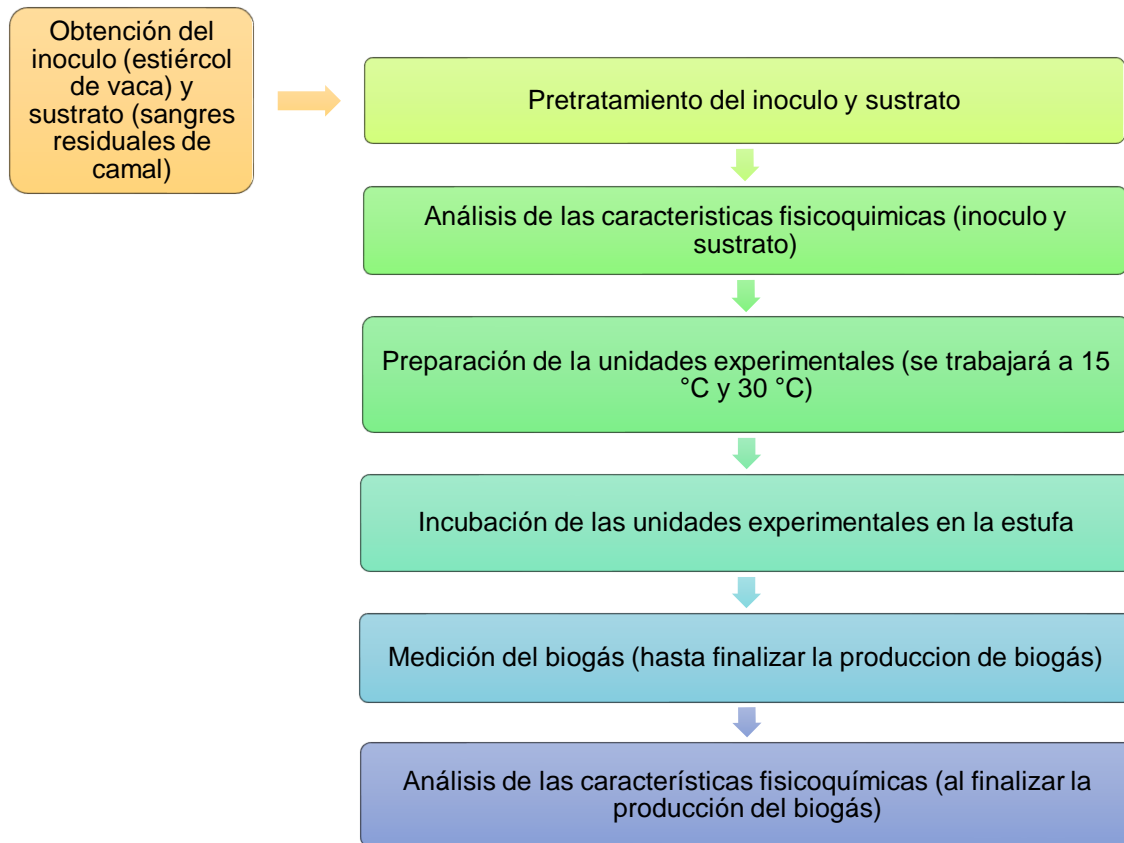
### **3.6. Diseño de experimentos**

Para realizar los experimentos primero se definió tres tratamientos, al cual llamamos RIS (Relación Inóculo/Sustrato). Estas relaciones se elegirán en términos de sólidos volátiles (SV) (Nevez, Oliveira, & Alvez, 2004). Se tomó tres tipos de RIS; el primero fue a una relación de dos, el segundo a relación de tres y el tercero será a relación de cuatro, esto se elige porque en anteriores experiencias, mencionan que en estas relaciones hay más producción biogás y además en estas relaciones se pueden reaprovechar de manera considerable las sangres residuales del camal.

Para hacer las unidades experimentales se mezcló el inóculo con el sustrato en distintas proporciones para los tres tipos de relación inóculo/sustrato (RIS), y luego se envasó en las botellas de vidrio (reactores batch), y fueron llevados a la estufa para iniciar con la producción de biogás. Asimismo, estas tres relaciones Inóculo/Sustrato (RIS) se trabajaron en distintas temperaturas que vendrían hacer a 15 °C y 30 °C, y siempre se trabajó por triplicado, para reducir el margen de error. Cada una de las unidades experimentales representa un reactor en batch a escala laboratorio.

A continuación, en la Figura 2 se presenta un flujograma de la metodología:

Figura 2. Flujoograma de la Metodología



Fuente: Elaboración propia.

### 3.7. Métodos analíticos

En los ensayos de PBM que se realizaron, el biogás que se produce no solo consta de metano ( $\text{CH}_4$ ), sino tiene otros componentes como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), por eso se utilizó el hidróxido de sodio ( $\text{NaOH} - 0.1\text{N}$ ) para poder purificar el biogás, esta solución alcalina atraparé solo al  $\text{CO}_2$ , dejando pasar solo al  $\text{CH}_4$ . En cuanto a la cuantificación del biogás producido en los reactores, se hizo mediante el método volumétrico a partir del desplazamiento de agua. Luego de ello se calculó el PBM de los residuos, tomando en consideración la producción acumulada de metano y los SV adicionados a los sistemas.

Además, para comparar la producción de biogás y por tanto el redimiendo, es necesario llevar el volumen de biogás a condiciones normalizadas VNTP (Volumen de gas en condiciones normales de temperatura y presión mL), con la siguiente ecuación:

$$V_0 = \frac{V (P - P_w) T_0}{P_0 T} \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

- $V_0$  : Volumen de gas en condiciones normales de temperatura y presión (mL)
- $V$  : Volumen de gas generado (mL)
- $P$  : Presión Atmosférica de la zona donde se realiza los ensayos (Pa)
- $P_w$  : Presión de  $CH_4$  en condiciones normales (Ley de gases nobles)
- $T_0$  : Temperatura en condiciones normales ( $^{\circ}K$ )
- $P_0$  : Presión atmosférica en condiciones normales (Pa)
- $T$  : Temperatura promedio de la zona donde se realiza los ensayos ( $^{\circ}C$ )

### 3.8. Metodología

#### 3.8.1. Tipo de estudio y diseño de investigación

La presente investigación corresponde al tipo de estudio cuantitativo porque se manipulo la variable independiente (diferentes dosis – RIS), mediante ensayos de laboratorio denominados “Pruebas de Potencial Bioquímico de Metano (PBM)” para recolectar datos de la producción de metano. En cuanto al diseño de investigación también es experimental.

#### 3.9. Variables en estudio.

Las variables de estudio son:

Variable independiente: Sangre residual

Variable dependiente: Potencial Bioquímico de Metano

### 3.10. Diseño de investigación

El diseño de investigación es experimental. En este caso se tiene que encontrar cual es la relación optima y cuál es la que me da mayor producción de biogás, todos estos datos se obtienen a partir de las pruebas PBM. El análisis estadístico que se empleó en este proyecto es el “Diseño Factorial A\*B”. El procesamiento y análisis de datos se realizó por medio del software “Statgraphics”. Los resultados se presentan en tablas y gráficos.

#### 3.10.1. Factores y niveles

Se trabajó con el Diseño Factorial A\*B, donde el factor (A) es la temperatura de 15 °C, y el factor (B) es la temperatura 30 °C, estos factores tienen tres niveles que vendrían a ser las 3 dosis y sus respectivas repeticiones.

A continuación, se muestra el diseño factorial:

Tabla 5.

*Diseño Factorial A\*B*

		TEMPERATURA					
		15 °C			30 °C		
	DOSIS	RIS 2	RIS 3	RIS 4	RIS 2	RIS 3	RIS 4
	DOSIS 1	X	X	X	X	X	X
	DOSIS 2	X	X	X	X	X	X
<b>REPETICIONE</b>	DOSIS 3	X	X	X	X	X	X
<b>S</b>	BLANCO 1						
	BLANCO 2	PROM	PROM	PROM	PROM	PROM	PROM
	BLANCO 3						

*Fuente:* Elaboración propia.

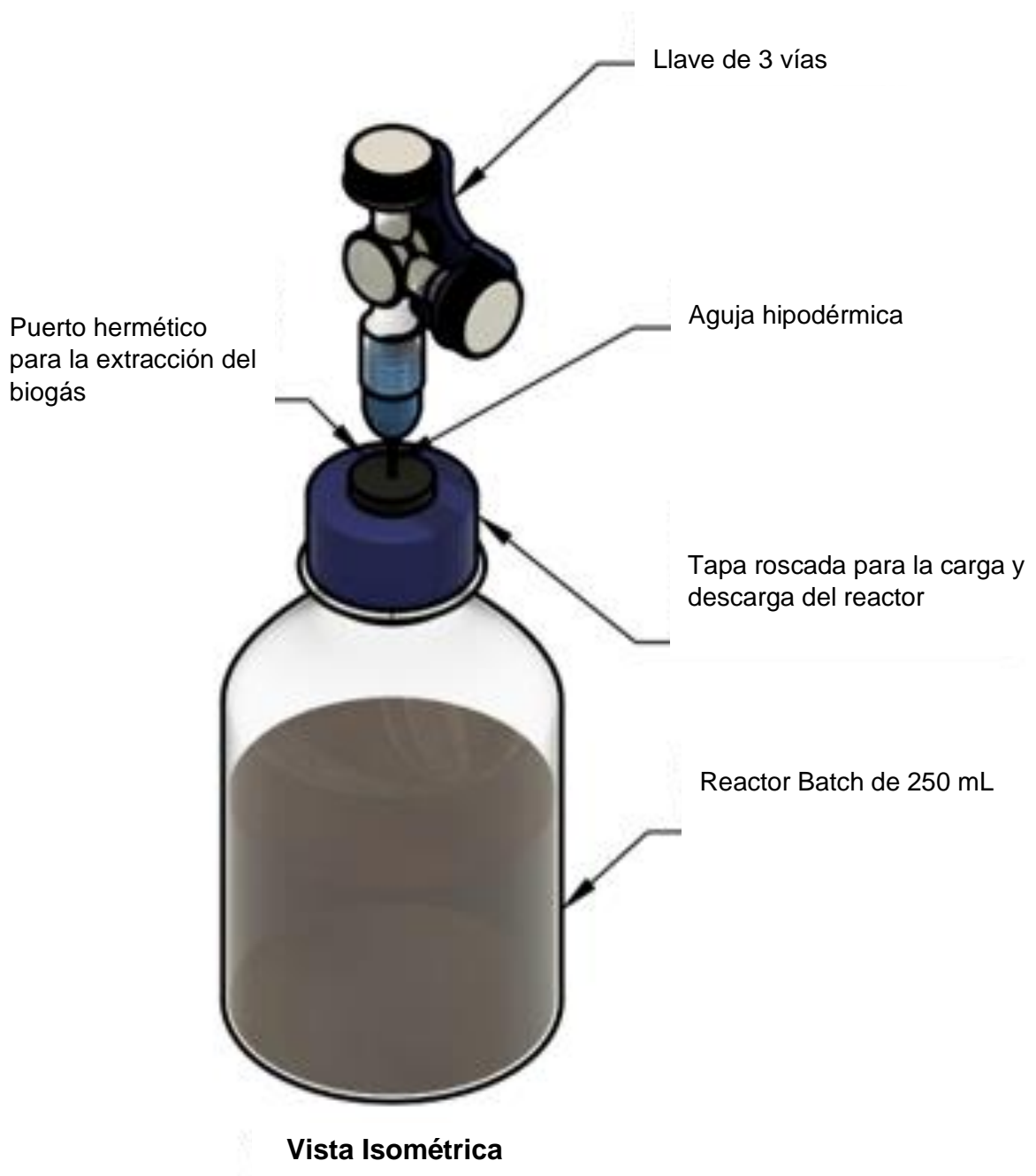
#### 3.10.2. Diseño del aparato experimental

Las unidades experimentales fueron 30 y por ende cada unidad experimental representó a un reactor en batch. Estas unidades experimentales se elaboraron a partir

de botellas con tapa roscada pyrex de 250 mL, se tuvieron que hacer modificaciones en las tapas para poder incorporarles un puerto hermético para la extracción diaria del biogás que se generó.

En la Figura 3 podemos visualizar una imagen referencial de los reactores modificados.

Figura 3. *Unidad Experimental.*



Fuente: Elaboración propia.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.1. Caracterización de las propiedades físico-químicas**

El inóculo utilizado fueron excretas de ganado vacuno, el cual fue cultivado en un reactor anaerobio de 40 L de capacidad durante un TRH de 30 días, y la temperatura a condiciones mesofílicas 30 °C (Zhang, Banks, & Heaven, 2012). El lodo fue producido a partir de 4 kg de excretas de ganado vacuno y 12 L de agua destilada. Las excretas se obtuvieron de la Finca, un área perteneciente a la Universidad Peruana Unión, dedicada a la crianza de ganados vacunos, ovinos, entre otros.

El sustrato que se utilizó fueron las sangres residuales de los mataderos, a estas muestras se realizó un pretratamiento, el cual consistió en un proceso de licuado durante 5 minutos, buscando obtener una mezcla homogénea de la muestra, se siguió la metodología de (Laboratorio de Biotecnología & Universidad Industrial Santander, 2015).

El inóculo cultivado y el sustrato luego de ser pre tratados, fueron caracterizados de acuerdo al manual del Laboratorio de Biotecnología de la Universidad Industrial Santander (2015).

Es muy importante saber las características físico-químicas del inóculo y sustrato y por eso se midieron los parámetros que influyen en esta digestión anaerobia (Madrigal Pérez, 2019).

Por medio de una Estufa BINDER FD23, una Mufla NABERTHER LE2/11/R6, una balanza analítica de alta sensibilidad SARTORIUS ENTRIS224-1S y una campana de desecación se determinó el contenido de humedad, sólidos totales, sólidos fijos y sólidos volátiles de las muestras. La determinación de los ácidos grasos volátiles y alcalinidad total se realizó con el método titrimétrico, por medio del Potenciómetro de mesa MILWAUKEE Mi150 se caracterizó el pH, además se utilizó una solución ácida como el ácido clorhídrico (HCl) y una solución alcalina como el hidróxido de sodio (NaOH), ambas soluciones se prepararon al 0.1 N (R. Zhang et al., 2007).

Tener en cuenta que estos parámetros se medirán al inicio y al final de las pruebas PBM. En la Tabla 6 se muestran los valores de la caracterización físico - química del inóculo y el sustrato, esto se realizó en el Laboratorio de Saneamiento Ambiental de la Universidad Peruana Unión.

Tabla 6.

*Caracterización fisicoquímica del inóculo y sustrato*

Parámetro	Valores		Unidades	Referencia
	Inoculo	Sustrato		
Humedad	95.73	81.60	% H	
Sólidos Totales	42.68	183.99	g ST/kg	
Sólidos Volátiles	83.70	93.84	% ST	
	35.72	172.65	g SV/kg	< 100
Sólidos Fijos	6.96	11.34	g SF/kg	
pH	7.97	7.73	pH	7 - 8.5
Ácidos Grasos Volátiles	720	960	mg CH <sub>3</sub> COOH/L	< 1000
Alcalinidad Total	1700	2100	mg CaCO <sub>3</sub>	
AGV/AT	0.42	0.46	mg CH <sub>3</sub> COOH/mg CaCO <sub>3</sub>	< 0.6
Actividad Metanogénica Específica	0.9945		g DQO/g SV*día	

*Fuente:* Elaboración propia.

Los parámetros fisicoquímicos del inóculo y del sustrato analizados nos permitieron diseñar las dosis y/o tratamientos del diseño experimental, cada tratamiento es una RIS (relación inóculo/sustrato), estos se diseñaron a partir del contenido de sólidos volátiles (SV) de las muestras analizadas. Los parámetros que se muestran la Tabla 6, están dentro de los rangos tal como lo recomienda (Holliger et al., 2016). Sin embargo, se puede divisar que el parámetro de AGV/AT, está dentro del rango, pero su valor es muy bajo a comparación de otros estudios. Esto se da porque la composición de la sangre de alpaca no contiene grasa tal como lo menciona Hejnfelt & Angelidaki (2009).

## 4.2. Determinación de la relación óptima de inóculo/sustrato

### 4.2.1. Diseño Experimental

Para el diseño se tuvieron 30 unidades experimentales por cada temperatura para los 15 °C (psicrofílica) y 30 °C (mesofílica) y cada unidad experimental representó a un reactor en batch. Estas unidades se elaboraron a partir de botellas pyrex con tapa roscada de 250 mL. Para realizar los ensayos de PBM se caracterizó de la siguiente manera.

Tabla 7.

*Volúmenes para la operación*

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen del reactor	250	mL
Volumen de operación	150	mL
Temperatura	15 y 30	°C
RIS	2,3,4	gSVinoculo/gSVsustrato

*Fuente:* Elaboración propia.

Se realizaron 3 tipos de tratamiento, al que se denominó RIS (relación inóculo/sustrato), estos tratamientos son diferenciados por la mezcla de los residuos en términos de SV, esto se realizó para ambas temperaturas de 15 °C y 30 °C (Ver Tabla 9 y 10).

Según Nevez et al., (2004) en investigaciones previas afirman que una relación de I/S que oscile entre 0.5 y 2.3 puede prevenir fenómenos de acidificación; sin embargo Lesteur et al. (2010) menciona que cada sustrato tiene una relación S/I óptima, de acuerdo a su producción potencial de AGV y su capacidad de amortiguamiento. Es por ello que en esta investigación se hicieron a tres tipos de relaciones I/S; la RIS 2 estuvo conformado por 9.37 % S - 90.63 % I, la RIS 3 por 6.45 % S - 93.55 % I, y la RIS 4 por 4.92 % S - 95.08 % I. Los blancos fueron distribuidos de la misma manera, solo que en vez de poner sustrato se puso agua destilada.

Tabla 8.

*Diseño de tratamiento a Temperatura psicrófila y mesófila.*

<b>DOSIS (relación inóculo/sustrato)</b>	<b>SV sustrato (g/kg)</b>	<b>SV inóculo (g/kg)</b>	<b>V. sustrato (mL)</b>	<b>V. inóculo (mL)</b>
RIS 2	172.65	35.72	14.06	135.94
RIS 3	172.65	35.72	9.68	140.32
RIS 4	172.65	35.72	7.38	142.62

*Fuente:* Elaboración propia.

Los reactores en batch utilizados en laboratorio tuvieron una capacidad total de 250 mL y una capacidad operativa de 150 mL. En los reactores de la RIS 2 se agregó 14.06 mL de sustrato y 135.94 mL de inóculo, para la RIS 3 fue 9.68 mL de sustrato y 140.32 mL de inóculo y para la RIS 4 se añadió 7.38 mL de sustrato y 142.62 mL de inóculo. Los 100 mL restantes fueron requeridos para el almacenamiento del biogás generado. El TRH fue hasta que finalice los ensayos PBM y la agitación de los sistemas se realizó manualmente de forma periódica una vez al día.

Las unidades experimentales fueron 18 a condiciones psicrófila (3 dosis con sus respectivas repeticiones) y 12 unidades a condiciones mesófilas (2 dosis con sus

respectivas repeticiones). Cada grupo experimental se puso en una estufa diferente y se controló la temperatura sistemáticamente. Según los autores Cárdenas Cleves, Parra Orobio, Torres Lozada, & Vásquez Franco (2016), nos mencionan que las temperaturas en las que se trabajan los ensayos PBM, generalmente se realizan en los rangos mesofílico y termofílico con temperaturas óptimas de 35 °C y 55 °C, respectivamente.

Cabe mencionar que en el rango mesofílico tiene muchas ventajas ya que en este rango hay una alta reducción del requerimiento energético y una menor sensibilidad a las cargas choque o sustancias tóxicas como el amonio y ácidos grasos de cadena larga. Sin embargo, la temperatura del sustrato tiene mucha influencia en la selección de las condiciones de temperatura en que se debe realizar la DA. Además, el TRH fue hasta que la producción diaria del biogás consuma la totalidad de la materia orgánica presente en el sustrato.

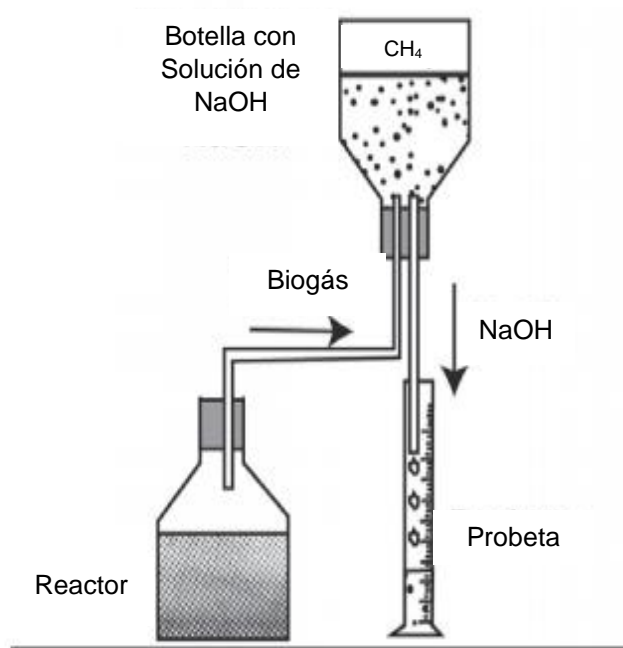
Por otro lado, las unidades experimentales fueron como reactores en batch, para lo cual estos reactores fueron purgados con nitrógeno UAP (5.0) para asegurar que el medio sea anaeróbico. Es por eso que se dio una producción continua de metano por lo cual no se abrieron hasta terminar el TRH. El otro factor fue mantener el pH neutro (Cárdenas Cleves et al., 2016), pero en esta investigación no fue necesario agregar químicos para regularlo, la capacidad buffer del sustrato tuvo un pH entre 7.92 y 8.4, esto se vio en las dos temperaturas (mesofílico y psicofílico).

Las unidades experimentales se agitaron manualmente durante 10 segundos todos los días a las 10:00 am. Y la extracción del biogás producido se realizó todos los días a las 11:00 am, todo esto se hizo para ambos grupos experimentales (mesofílico y psicofílico).

#### 4.2.2. Métodos analíticos

El monitoreo de parámetros como pH, ST, SV, SF, AGV<sub>s</sub> y AT, se llevó a cabo al inicio y al finalizar los ensayos de PBM, esto se hizo con la finalidad de evaluar la eficiencia del proceso, ver si se consumió la totalidad de la materia orgánica presente en el sustrato y la transformación de estos residuos en CH<sub>4</sub>. El biogás producido se retiró diariamente de las unidades experimentales por el método volumétrico, el cual consta de una purificación a partir de una solución 0.1 normal de NaOH y Fenolftaleína y una cuantificación, donde se midió el volumen generado del biogás producido en mL, tal como se puede observar en la Figura 4.

Figura 4. Purificación y cuantificación del biogás por el método volumétrico.



Leyenda: Sistema de medición por desplazamiento alcalino (Cárdenas Cleves et al., 2016).

#### 4.3. Determinación del Potencial Bioquímico de Metano

La duración del ensayo de PBM depende principalmente de la biodegradabilidad del sustrato y por lo tanto no es posible establecer un periodo fijo; sin embargo, se reporta que aproximadamente a los 30 días inicia la fase de estabilización de la producción de CH<sub>4</sub> y aproximadamente el 90 % de la producción teórica se genera entre 30 y 60 días (Cárdenas Cleves et al., 2016).

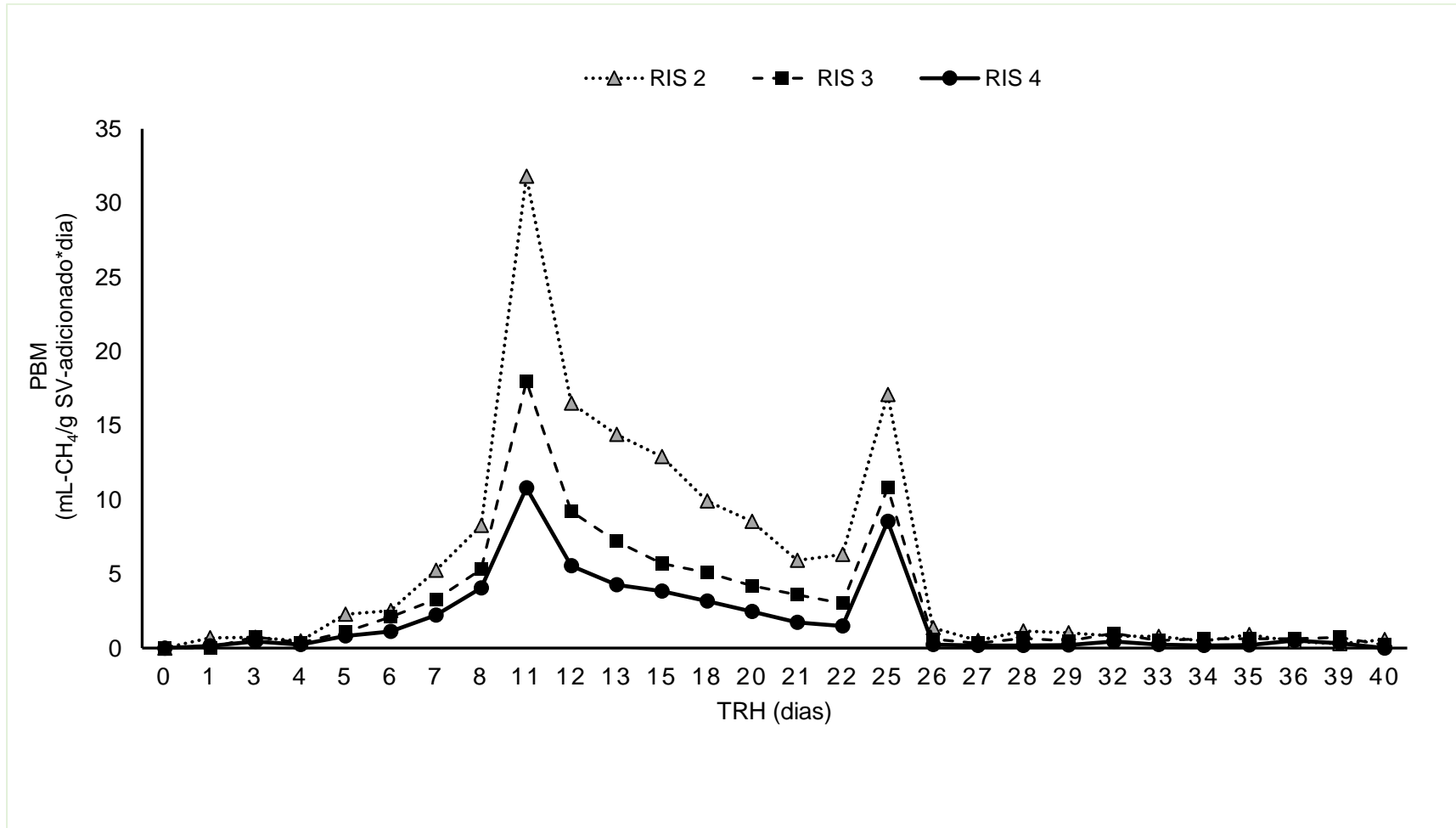
### **4.3.1. Resultados y Discusión**

#### ***4.3.1.1. Producción de biogás a condición psicrófila.***

En la Figura 5, se puede observar la producción diaria de biogás purificado de las unidades experimentales sin los blancos durante el ensayo PBM, al tratarse de un experimento en batch vario desde 0 mL de biogás producido al inicio de los ensayos hasta un valor de 31.08 mL, el cual se puede observar en el día 11 y le corresponde a la RIS de 2. La producción de biogás se elevó recién en el sexto día, esto se da porque los microorganismos recién se van comenzando a aclimatarse en el medio (Cárdenas Cleves et al., 2016); en el día 26 tuvo una caída, el cual se estabilizo hasta el término del ensayo.

Por otro lado, los autores Alkayay Demirer (2011); Eskicioglu y Ghorbani (2011); Cho y col (1995), es sus investigaciones nos menciona que en la primera fase de la digestión anaerobia el pH cae debido a la alta producción de AGV, es por ello que la producción de metano es baja. Pero cuando los AGV son consumidos, la disminución del pH se recupera durante la digestión; por ende, aumentara considerablemente la producción de biogás.

Figura 5. Producción diaria de biogás por tipo de RIS.

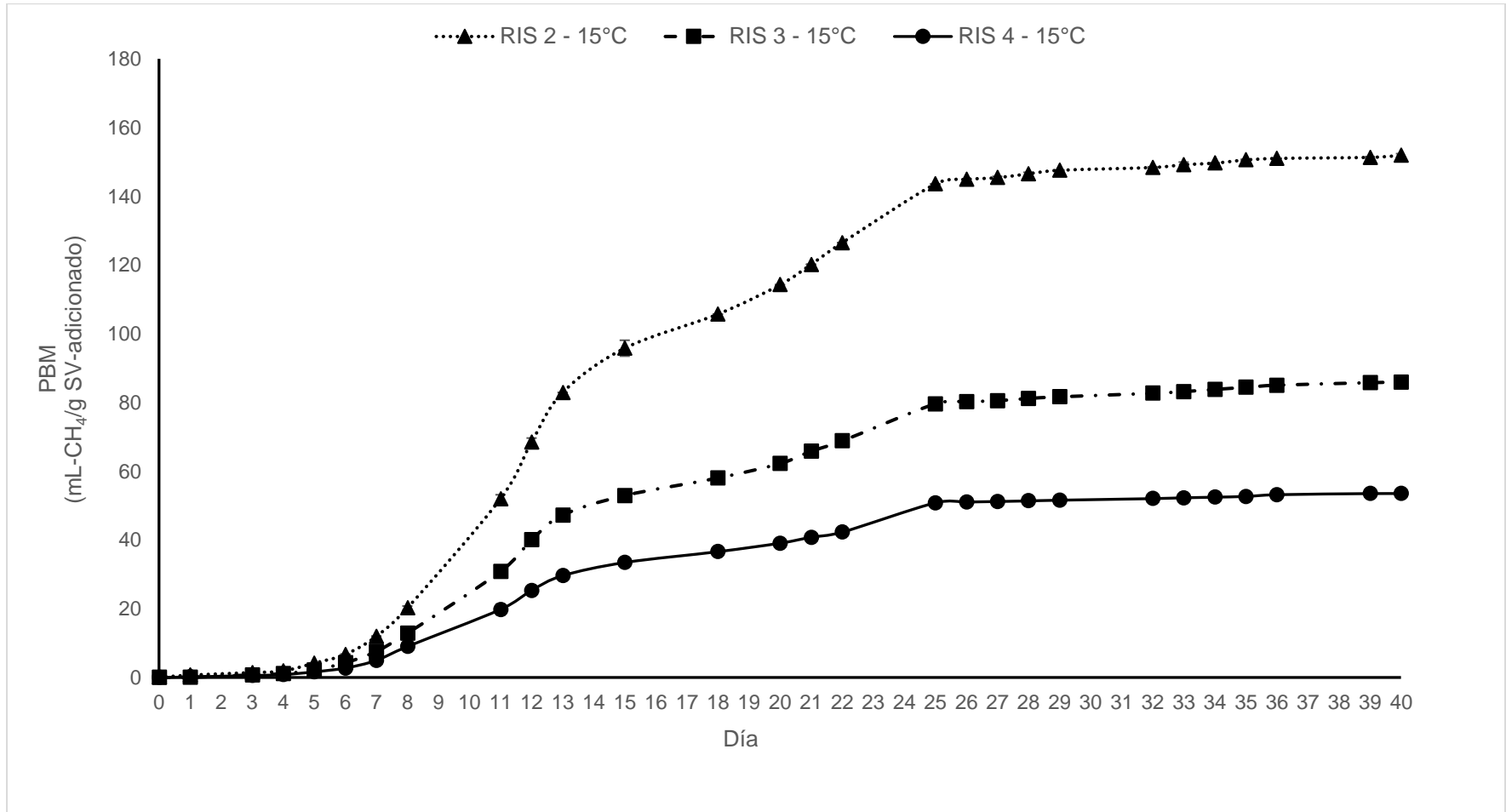


*Legenda:* Los valores graficados corresponden a la media obtenida de la producción de biogás diaria de las unidades experimentales por tipo de RIS.

*Fuente:* Elaboración propia.

Además, en la Figura 6 se puede apreciar la producción de biogás acumulada con los respectivos blancos por cada RIS, según lo observado la RIS 3 y RIS 4 fueron los que produjeron menor volumen acumulado de biogás, la RIS 3 produjo 56.60 % y la RIS 4 produjo un 35.23 %, menos la RIS 3, lo cual lo convierte en la dosis con más baja producción. La dosis que consiguió producir mayor volumen fue la RIS 2, esta última fue el que se diferenció notablemente en la producción de biogás de las otras dosis.

Figura 6. Producción acumulada de biogás con los respectivos blancos por cada RIS.



*Leyenda:* Los valores que se muestran en el gráfico corresponden a la media obtenida de la producción acumulada de biogás de las unidades experimentales por cada RIS.

*Fuente:* Elaboración propia.

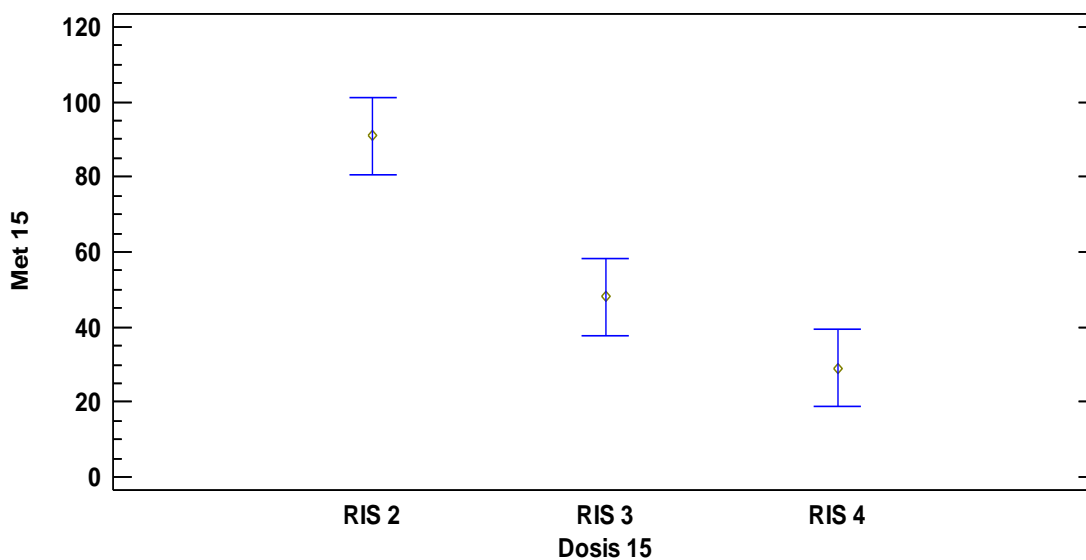
Asimismo, se le aplicó análisis de varianza (ANOVA) y Tukey para comparar la producción acumulada de biogás por tipo de tratamiento y número de repetición al finalizar los ensayos PBM.

- Hipótesis nula: Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alterna: Por lo menos una media es diferente.
- Nivel de significancia:  $\alpha = 0.05$ .
- Nivel de confianza: 95 %.

La RIS 2 obtuvo una media de 90.94 y una desviación estándar de 50.14. La RIS 3 obtuvo una media de 47.99 y una desviación estándar de 29.1; y por último la RIS 4 adquirió una media de 29.15 y una desviación estándar de 17.50. Los resultados se muestran en la Figura 7.

Figura 7. Gráfico de medias

Medias y 95.0% de Fisher LSD



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 7, se puede observar que la RIS 2 y la RIS 4 poseen una diferencia estadísticamente significativa de 61.78, seguido por la RIS 2 y RIS 3 que poseen una diferencia significativa de 42.95. En cambio si comparamos a la RIS 3 con la RIS 4, se puede ver que son grupos homogéneos, lo que conlleva a decir que no existen diferencias estadísticamente significativa entre ambos grupos.

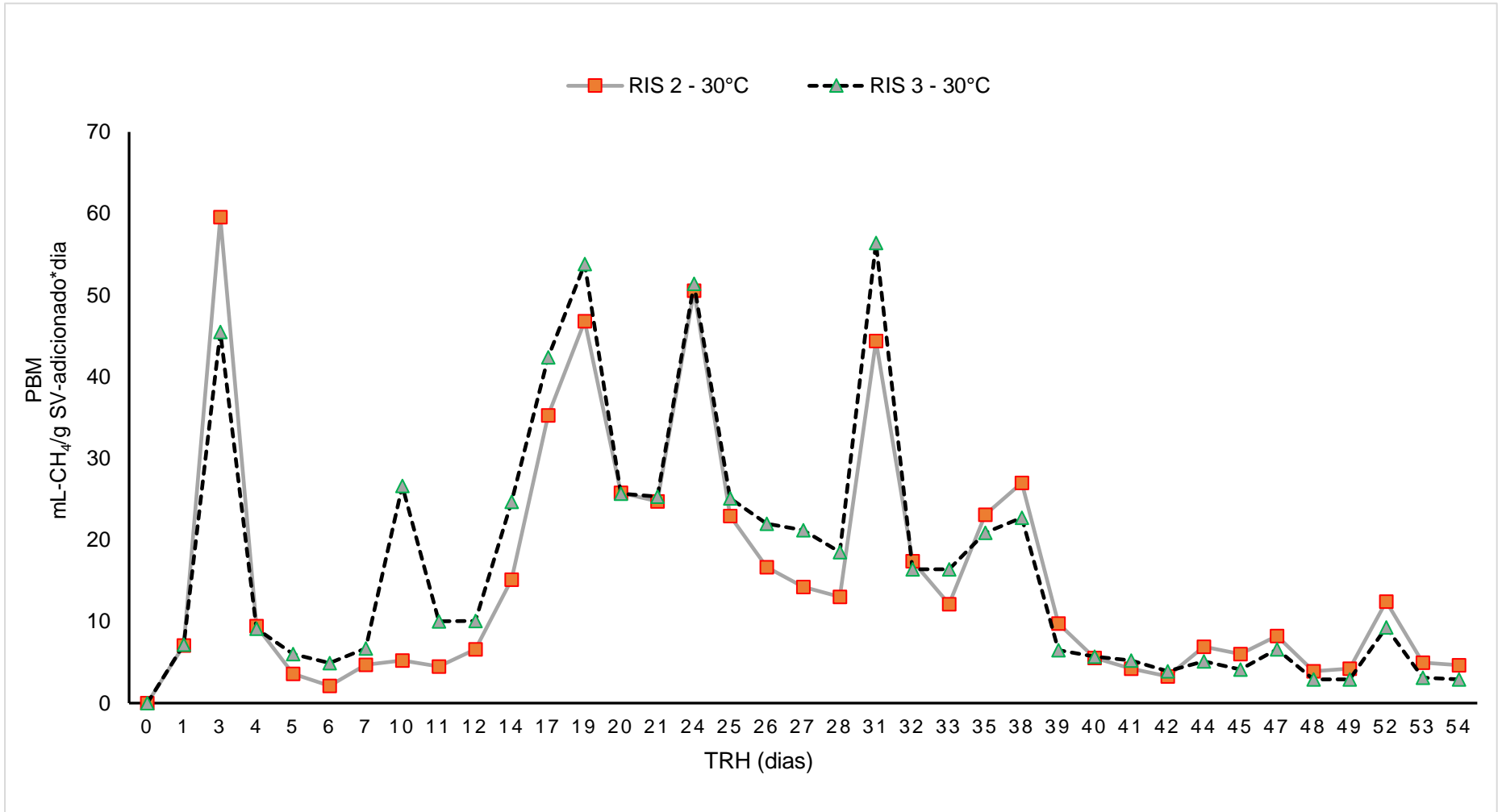
#### **4.3.1.2. Producción de biogás a condición mesofílica.**

En la Figura 8, se puede observar la producción diaria de biogás purificado de las unidades experimentales sin los blancos durante el ensayo PBM, al tratarse de un experimento en batch vario desde 0 mL de biogás producido al inicio de los ensayos hasta un valor de 59.55 mL, el cual se puede observar en el día 3 y le corresponde a la RIS de 2.

La producción de biogás se elevó en el tercer día, a comparación el ensayo a temperatura psicrófila, este ensayo fue en donde los microorganismos se adaptaron más rápido y tuvieron una buena producción de biogás, esto también se da porque la DA anaerobia se da a partir de los 30 °C (Cárdenas Cleves et al., 2016). Desde el día 38 tuvo una decaída hasta el término del ensayo.

Además, en la Figura 9 se puede apreciar la producción de biogás acumulada con los respectivos blancos por cada RIS, según lo observado ambos tratamientos no tienen una diferencia significativa, porque ambos tienen valores que están estrechamente ligados. La producción de la RIS 2 fue de 90.27 % un tanto menor que la RIS 3. Cabe mencionar que, al principio de las pruebas, exactamente en el día 3 el tratamiento que tuvo un gran realce fue la RIS 2, pero a partir del día 10 en adelante la RIS 3 empezó a producir biogás un tanto más que la RIS 2, estas producciones se estabilizaron en ese orden hasta terminar el TRH.

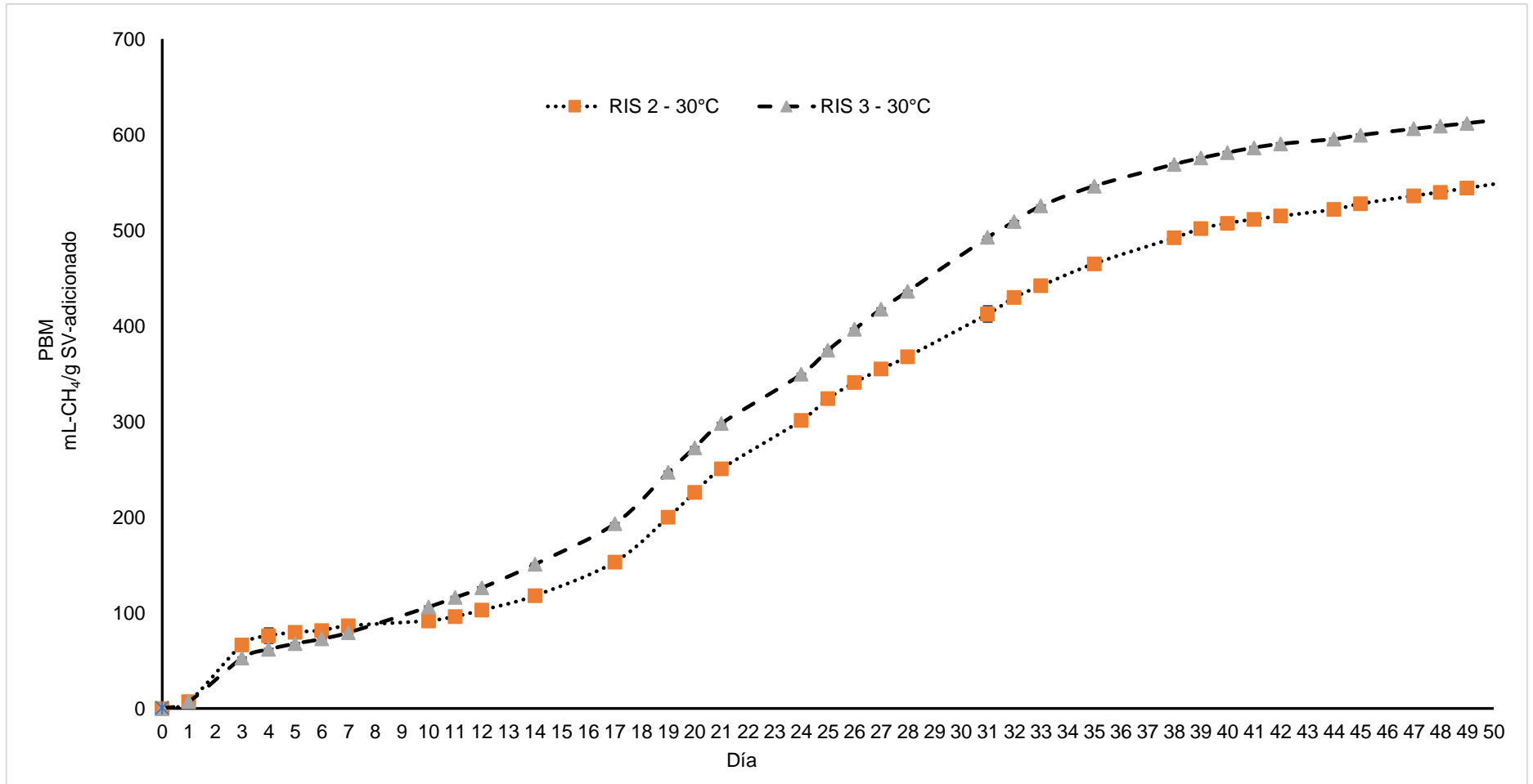
Figura 8. Producción diaria de biogás por tipo de RIS.



Leyenda: Los valores graficados corresponden a la media obtenida de la producción de biogás diaria de las unidades experimentales por tipo de RIS.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Producción acumulada de biogás con los respectivos blancos por cada RIS



*Legenda:* Los valores que se muestran en el gráfico corresponden a la media obtenida de la producción acumulada de biogás de las unidades experimentales por cada RIS.

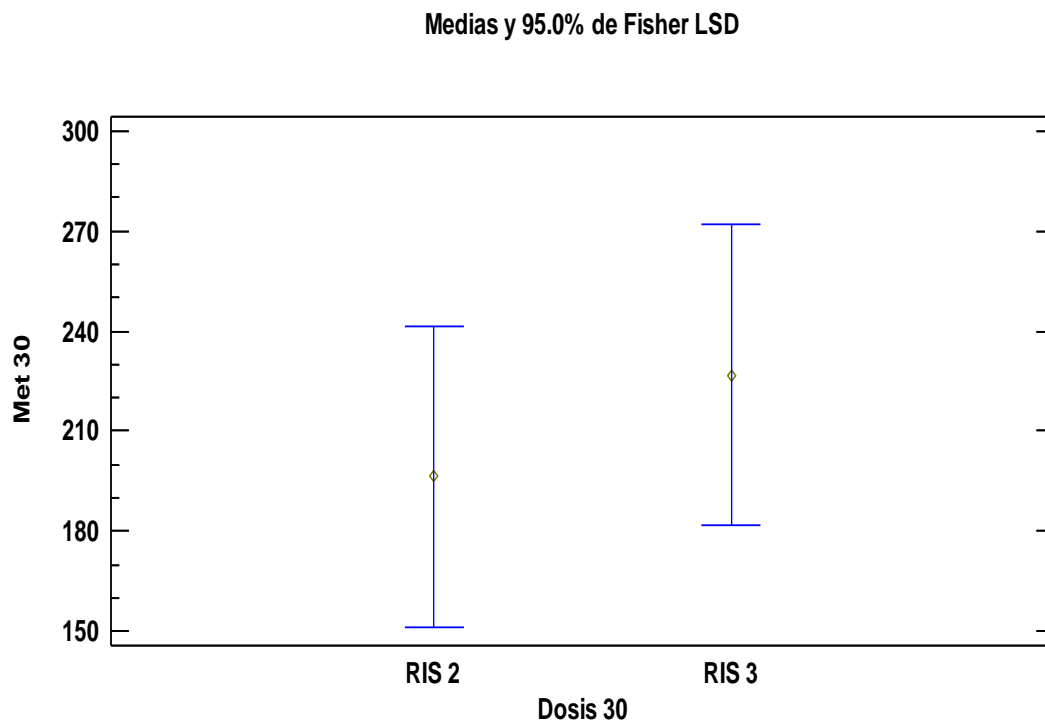
*Fuente:* Elaboración propia.

Además, se le aplicó análisis de varianza (ANOVA) y Tukey para comparar la producción acumulada de biogás por tipo de tratamiento y número de repetición al finalizar los ensayos PBM.

- Hipótesis nula: Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alterna: Por lo menos una media es diferente.
- Nivel de significancia:  $\alpha = 0.05$ .
- Nivel de confianza: 95 %.

La RIS 2 obtuvo una media de 196.325 y una desviación estándar de 130.06. La RIS 3 obtuvo una media de 226.79 y una desviación estándar de 158.3. La Figura 10 nos muestra que estas dos dosis no hay diferencias estadísticamente significativas.

Figura 10. Gráfico de medias



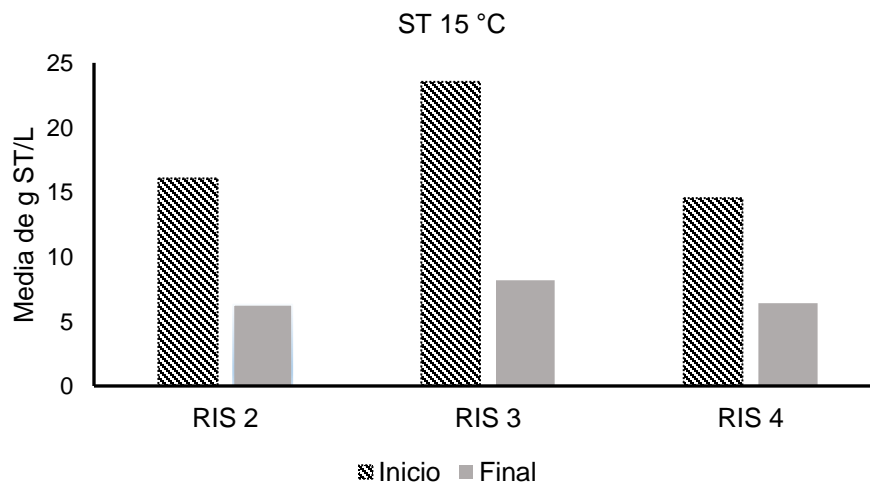
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.1.3. Transformación de los Sólidos Totales y Sólidos Volátiles

Estos parámetros nos muestran la eficiencia del proceso, disminución de la materia orgánica, además de tener una relación muy estrecha con la producción de biogás. Los ST y SV son proporcionales a la cantidad de materia orgánica degradable en una muestra (R. Zhang et al., 2007). En todos los experimentos se mantuvieron constantes los gSV que ingresaron a los reactores, por lo cual el parámetro gST varió entre las dosis y/o RIS en función de los gSV requeridos. Estos parámetros se volvieron a medir al finalizar el TRH, con lo cual se obtuvo una medida referencial de la eficiencia de los tratamientos en función de la reducción de materia orgánica.

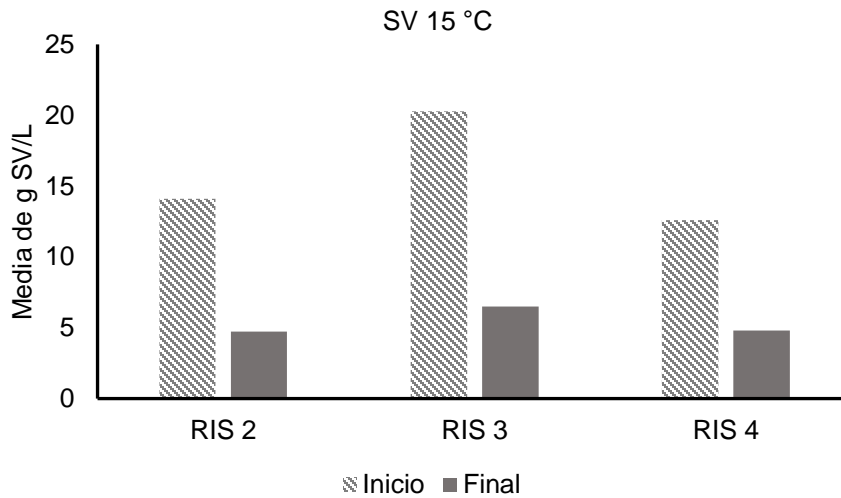
En la Figura 11 se muestra los gST/L para cada RIS a condiciones psicofílicas al inicio de los ensayos y al finalizar la experiencia; y en la Figura 12 se presentan los gSV/L también con datos iniciales y finales. En ambas graficas se puede apreciar una clara disminución de estos parámetros luego de que los sustratos fueran digeridos. La medición de gST/L y gSV/L se realizó a todos los reactores al finalizar los ensayos.

Figura 11. Gráfica de gST/L para cada RIS – 15°C



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Gráfica de gSV/L para cada RIS – 15°C



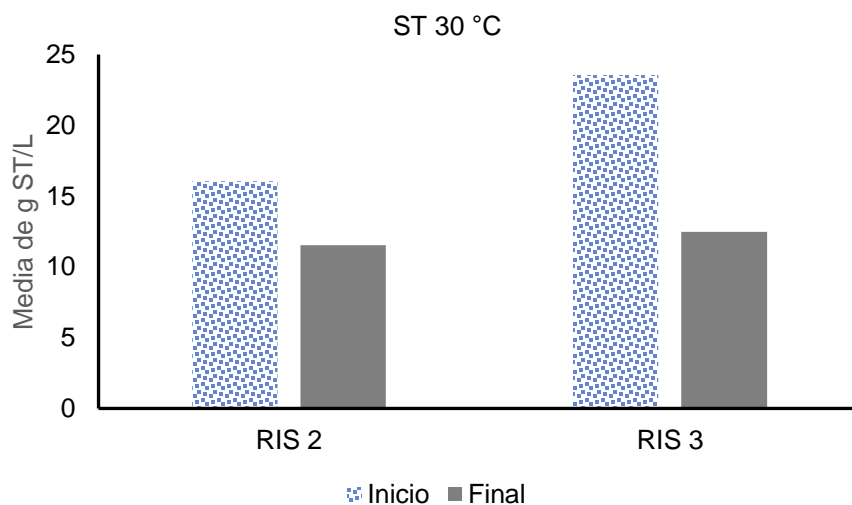
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados realizados a los datos de la concentración de gST/L por cada RIS. Con la media obtenida por cada RIS se halló el porcentaje de reducción de ST y se aprecia que el tratamiento con mayor efectividad fue la RIS 3, porque se ve una gran disminución en el consumo de la materia orgánica presente en el sustrato, pero en cuanto a la producción de biogás no fue el mejor. Sin embargo, debido a la varianza de las reducciones porcentuales el resultado de la prueba Tukey no presento diferencias significativas entre los tratamientos.

Además, podemos apreciar en la Figura 13 se muestra los gST/L para cada RIS a condiciones mesofílicas al inicio de los ensayos y al finalizar la experiencia; y en la Figura 14 se presentan los gSV/L también con datos iniciales y finales. En ambas gráficas se puede apreciar una clara disminución de estos parámetros luego de que los sustratos fueran digeridos. Pero cuando se hizo la prueba Tukey no presentó diferencias significativas entre los tratamientos.

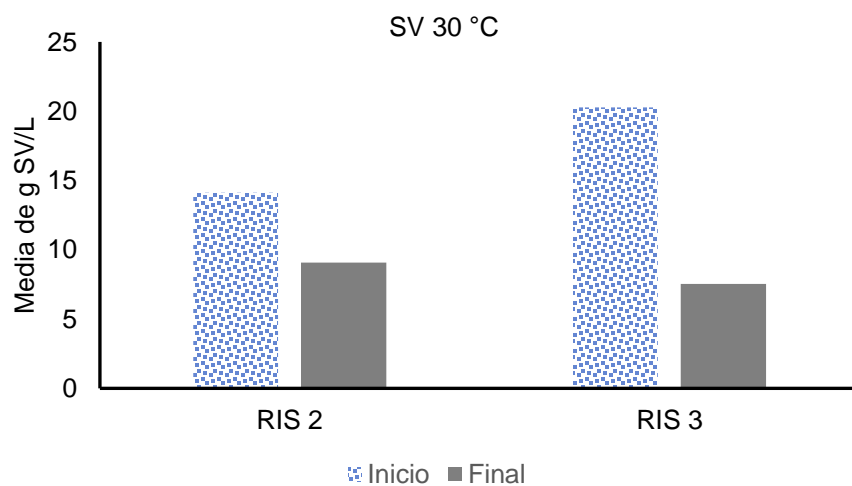
A continuación, se muestran los resultados:

Figura 13. Gráfica de gST/L para cada RIS - 30°C



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Gráfica de gSV/L para cada RIS - 30°C

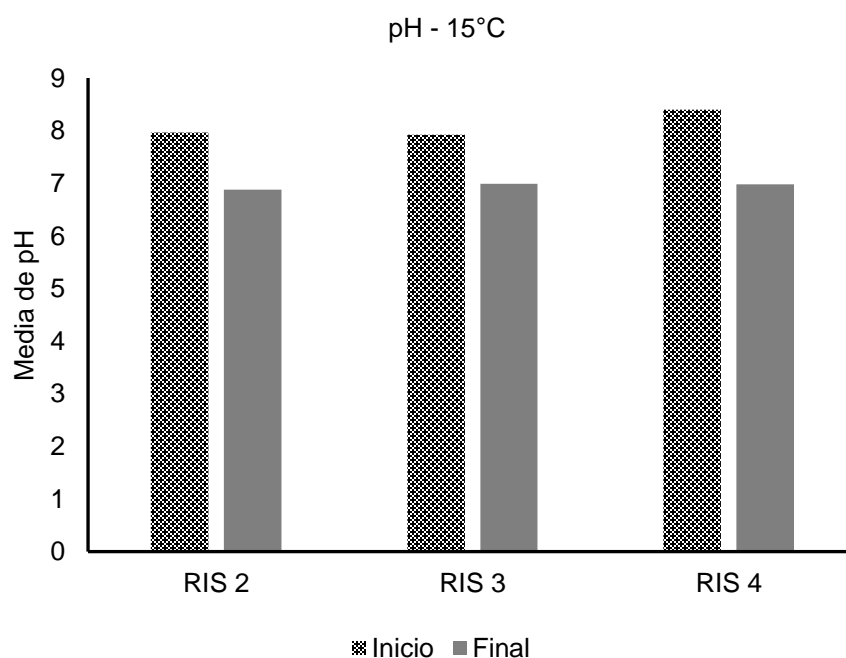


Fuente: Elaboración propia.

Los resultados realizados a los datos de la concentración de gST/L por cada RIS. Con la media obtenida por cada RIS se halló el porcentaje de reducción de ST y se aprecia que el tratamiento con mayor efectividad fue la RIS 3, porque se ve una gran disminución en el consumo de la materia orgánica presente en el sustrato además de producir mayor volumen de biogás. Sin embargo, debido a la varianza de las reducciones porcentuales el resultado de la prueba Tukey no presento diferencias significativas entre los tratamientos.

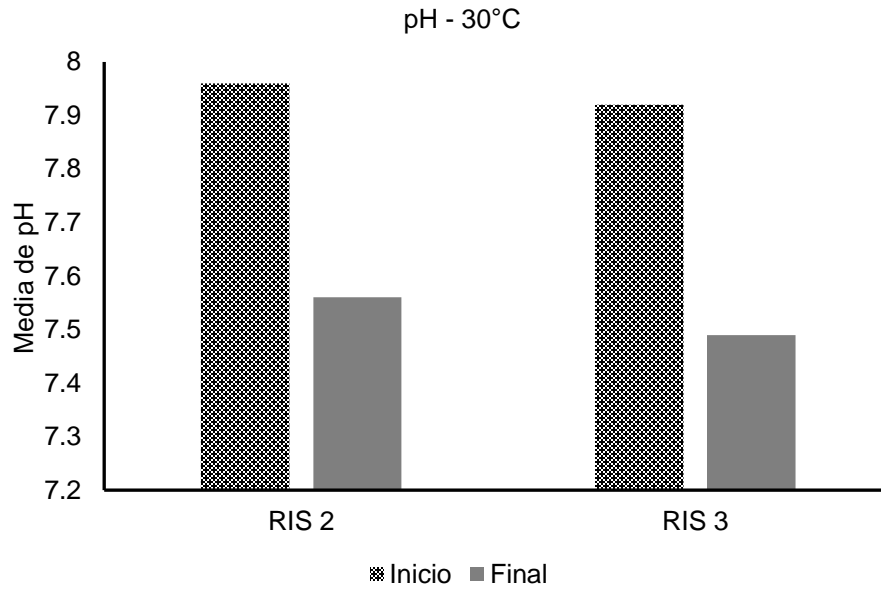
Por otro lado, en los ensayos de PBM el pH debe estar cercano a la neutralidad, con valores entre 7,0 y 7,8 unidades, con el fin de garantizar la actividad metabólica de los microorganismos más sensibles que son las arqueas metanogénicas (Cárdenas Cleves et al., 2016). En las Figuras 15 y 16 podemos observar el pH inicial y final por cada RIS.

Figura 15. Gráfica de pH para cada RIS – 15°C



Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Gráfica de pH para cada RIS – 30°C



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del análisis realizado a los datos de pH para cada RIS, se aprecia que este parámetro al inicio de los ensayos está en el rango que nos dice (Cárdenas Cleves et al., 2016). Al finalizar las pruebas PBM, vemos que los rangos de pH no están tan lejanos a lo que nos dice los autores anteriormente mencionados. Para la condición psicrófila el pH inicial con mayor valor lo tiene la RIS 4 que es 8.4 y también al final obtiene un pH con el más bajo valor que llega a 6.88, el cual está fuera del rango; esto nos indica además que el medio tuvo una acidificación considerable.

Tenemos también resultados para la condición mesófila, donde el pH inicial con mayor valor es para la RIS 2, pero al finalizar las pruebas PBM, el pH final con menor valor es la RIS 3 que llega a 7.49. Cabe mencionar que en este grupo mesófilico se puede notar que están dentro del rango en cuanto a pH.

Finalmente, en laboratorio se determinó que la RIS 2 (en ambas condiciones de temperatura) es la mejor alternativa de tratamiento evaluada, porque en este tratamiento no solo tiene una buena producción de biogás, sino que también se reaprovecha mayor volumen de las sangres residuales de matadero.

Por otro lado Raposo et al (2011), nos mencionan en su trabajo de investigación que realizaron a escala laboratorio, que el biogás producido en los ensayos es un gas real, lo que significa que es muy parecido al gas que se emplea en el uso doméstico.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

- La determinación del potencial de producción de biogás de las sangres residuales de matadero fue posible por medio de estudios previos ya sean experimentales y teóricos, demostrando que el tratamiento de los residuos por medio de la digestión anaerobia es una alternativa factible y económica para el reaprovechamiento de diferentes residuos
- Se logró determinar el Potencial Bioquímico de Metano, obteniendo un PBM de 90.94 mLCH<sub>4</sub>/gSV a condiciones psicrófilicas, y un PBM de 226.79 mLCH<sub>4</sub>/gSV a condiciones mesófilicas, se indica también que a condiciones psicrófilicas la relación Inoculo/Sustrato 2 es la que logra producir mayor volumen de metano por gramo de sólido volátil añadido; en cambio a condiciones mesófilicas las relaciones Inoculo/Sustrato 2 y 3 produjeron biogás con una diferencia casi nula. En consecuencia, se estableció que la relación Inoculo/Sustrato 2 es el más adecuado a ambas condiciones de temperatura, debido a que permite tratar un mayor volumen de sangres residuales de matadero.

- También se realizó la caracterización físico-química del sustrato (sangres residuales de camal) e inóculo (estiércol de ganado vacuno) de manera satisfactoria, ya que todos los parámetros analizados estuvieron dentro de los rangos permitidos, tal como lo mencionan diferentes autores.
- Por último, se diseñó e implementó un aparato experimental para la producción y caracterización de biogás a escala laboratorio. El aparato experimental se diseñó tomando en consideración limitaciones tecnológicas de la región.

## 5.2. Recomendaciones

- Los resultados que se obtuvieron en esta investigación mostraron una buena producción de biogás a condiciones psicrófilicas, pero para poder lograr que esta producción sea mucho mayor, se recomienda realizar un CO – digestión, con esto se podrá mezclar varios tipos de sustratos ya sean de concentración alcalina o acida, esto con el fin de neutralizar el pH y así evitar que las bacterias metanogénicas no cumplan con su fase durante la digestión anaerobia.
- Por otro lado, para ajustar el pH se recomienda adicionar alcalinizantes de sodio (carbonato, bicarbonato, hidróxido y sulfuro) las cuales proporcionan suficiente capacidad buffer al sistema para garantizar la neutralización de los AGV's y así evitar problemas de acidificación.
- Además, se recomienda usar una solución de nutrientes que está compuesta de macro y micronutrientes, vitaminas, requeridos por los microorganismos anaerobios como adicionalmente, se agregan otras sustancias como un agente reductor, para garantizar condiciones anaerobias y algún indicador del potencial redox.

## REFERENCIAS

- Acosta, F., Martí, J., Gonzales, L., & Veen, M. (2013). *Plan del Programa Nacional de Biodigestores*. Retrieved from <http://www.snvworld.org/en/sectors/renewable-energy/publications/plan-de-programa-nacional-de-biodigestores-en-peru>
- Agrowaste. (2013). *Digestión Anaerobia*. Retrieved from <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/DIGESTION-ANAEROBIA.pdf>
- Aidan Ware, N. P. (2016). Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland. *Renewable Energy*, 97, 541–549. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.05.068>
- Caceres, R., & Chilibingua, B. (1986). Experiences with Rural Biodigesters in Latin America. En M. El-Halwagi. *Biogas Technology, Transfer and Diffusion*, 150–165. [https://doi.org/doi:10.1007/978-94-009-4313-1\\_21](https://doi.org/doi:10.1007/978-94-009-4313-1_21)
- Cárdenas Cleves, L. M., Parra Orobio, B. A., Torres Lozada, P., & Vásquez Franco, C. H. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Revista ION*, 29(1), 95–108. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>
- Castells, X., Ripoll, X., & Pozuelo, E. (2012). Procesos biológicos. La digestión anaerobia y el compostaje: Tratamiento y valorización energética de residuos. *Tratamiento y Valorización Energética de Residuos*, (0), 645–646.
- Cheng, S., Li, Z., Mang, H. P., Huba, E. M., Gao, R., & Wang, X. (2014). Development and application of prefabricated biogas digesters in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 387–400. <https://doi.org/doi:10.1016/j.rser.2014.03.035>
- Da Costa, C. (2013). Biogas as an energy option: an overview. In *The Biogas Handbook* (pp. 1–16). doi:10.1533/9780857097415.1.
- Da Silva, C., Astals, S., Peces, M., Campos, J. L., & Guerrero, L. (2017).

Biochemical methane potential (BMP) tests: Reducing test time by early parameter estimation. *Waste Management*, 71, 19–24.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.009>

DECRETO LEGISLATIVO N°1002. *Decreto Legislativo de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables.* , (2008).

Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM. *POLÍTICA NACIONAL DEL AMBIENTE.* , (2009).

DECRETO SUPREMO N° 021-2007-EM. *Reglamento para la comercialización de Biocombustibles.* , (2007).

DECRETO SUPREMO N° 064-2010-EM. *POLITICA ENERGETICA NACIONAL DEL PERU 2010-2040.* , (2010).

DS N°012-2009-MINAM. *POLITICA NACIONAL DEL AMBIENTE.* , (2009).

Edström, M., Nordberg, A., & Thyselius, L. (2003). Anaerobic treatment of animal byproducts from slaughterhouses at laboratory and pilot scale. *Biochem Biotechnol*, 109, 127–138.

Esposito, G., Frunzo, L., Giordano, A., Liotta, F., Panico, A., & Pirozzi, F. (2012). Anaerobic co-digestion of organic wastes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 4. <https://doi.org/doi:10.1007/s11157-012-9277-8>

FAO. (2012). El biogás, atractiva fuente de energía renovable para el desarrollo de los pequeños productores agropecuarios en América Latina y el Caribe. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura*. Retrieved from <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/229860/>

FEDNA. (2013). Composición de alimentos. *Fundación Española Para El Desarrollo de La Nutrición Animal. Zaragoza España.*

Gomez Alvarez, M. A. (2017). “ *Determinación del Potencial Bioquímico de Metano y del Potencial de Suministro Eléctrico Neto de la Fracción Orgánica de los*

*Residuos Sólidos Urbanos de Mercados de Abasto del Distrito de Arequipa .”*  
Universidad Católica San Pablo.

- GTITT. (2010). *Primer Informe Técnico sobre Investigación y Transferencia Tecnológica en Bioenergía*.  
[https://doi.org/http://minagri.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/comisionbioenergia/investigacion\\_transferencia\\_tecnologica.pdf](https://doi.org/http://minagri.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/comisionbioenergia/investigacion_transferencia_tecnologica.pdf)
- Guevara, A. (1996). *Fundamentos Básicos para el Diseño de Biodigestores Anaeróbicos Rurales, Producción de Biogás y Saneamiento de Efluentes*.  
Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/031042/031042.pdf>
- Hejnfelt, A., & Angelidaki, I. (2009). Anaerobic digestion of slaughterhouse by-products. *Biomass and Bioenergy*, 33(8), 1046–1054.  
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.03.004>
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., ... Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515–2522.  
<https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- International Gas Union. (2015). *Biogas - from refuse to energy. Noruega*.  
Retrieved from [http://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field\\_file/IGU\\_Biogas\\_Report\\_2015.pdf](http://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/IGU_Biogas_Report_2015.pdf)
- Laboratorio de Biotecnología, & Universidad Industrial Santander. (2015). *Manual de procedimientos de laboratorio digestión anaerobia*.
- Lesteur, M., Bellon-Maurel, V., Gonzalez, C., Latrille, E., Roger, J., & Junqua, G. (2010). Alternative methods for determining anaerobic biodegradability. *Process Biochemistry*, 45, 431.
- Lopes do Carmo, D., & Silva, C. (2012). Quantification methods of carbon and organic matter in organic residues. *Scielo Brasil*, 4, 1211–1220.  
<https://doi.org/doi:10.1590/S0100-06832012000400015>

- Lorenzo Acosta, Y., & Obaya Abreu, M. C. (2005). La Digestion Anaerobia. Aspectos teoricos. *Icidca. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, XXXIX, 35–48.
- Madrigal Pérez, G. B. (2019). *Universidad peruana union*.
- Minag, & Prácticas, S. *Biodigestores en el Perú - Guía de principales experiencias desarrolladas en el país.* , (2011).
- Molina Tirado, K. G., Restrepo Velez, N. A., Moreno Toro, V., & Sanchez Restrepo, V. (2016). *DETERMINACIÓN A ESCALA LABORATORIO DE LA RELACIÓN SUSTRATO/INÓCULO EN LA BIODIGESTIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE LA UNIVERSIDAD EAFIT*. Medellin, Colombia.
- Nevez, L., Oliveira, R., & Alvez, M. (2004). Influence of inoculum activity on the bio-methanization of a kitchen waste under different waste/inoculum ratios. *Process Biochemistry*, 39(12), 2019–2024.  
<https://doi.org/doi:10.1016/j.procbio.2003.10.002>
- Owen, W., Stuckey, D., Healy Jr, J., Young, L., & McCarty, P. (1979). Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Research*, 6, 485–492. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(79\)90043-5](https://doi.org/10.1016/0043-1354(79)90043-5)
- Pavlostathis, S., & Giraldo Gómez, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Control*, 411–490.
- Petramás. (2016). *Divisiones Petramás*. Retrieved from <http://www.petramas.com/proyecto-de-generacion-de-energia-electrica-a-partir-del-biogas/>
- Raposo, F., Fernández-Cegrí, V., de la Rubia, M. A., Borja, R., Béline, F., Cavinato, C., ... de Wilde, V. (2011). Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: Evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 86(8), 1088–1098. <https://doi.org/10.1002/jctb.2622>

- Raposo, F., Fernández-Cegrí, V., De la Rubia, M. A., Borja, R., Béline, F., Cavinato, C., ... de Wilde, V. (2011). Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 86(8), 1088–1098. <https://doi.org/10.1002/jctb.2622>
- Sánchez Reyes, C., Patiño Iglesias, M. E., Alcántara Flores, J. L., Reyes Ortega, Y., Pérez Cruz, M. A., & Ortíz Muñoz, E. (2016). Determinación del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuos de frutas y verduras en hogares. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(2), 191–198. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.05>
- SENASA. *Reglamento del Faenado de los Animales de Abasto (Decreto Supremo N° 015-2012- AG)*. , (2018).
- Slimane, K., Fathya, S., Assia, K., & Hamza, M. (2014). Influence of inoculum/substrate ratios (ISRs) on the mesophilic anaerobic digestion of slaughterhouse waste in batch mode: Process stability and biogas production. *Energy Procedia*, 50, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.007>
- Swedish Gas Association. (2011). Biogas in Sweden. Estocolmo. Retrieved from [http://www.biogasportalen.se/~media/Files/www\\_biogasportalen\\_se/Sidhuvud/BiogasInSweden.ashx](http://www.biogasportalen.se/~media/Files/www_biogasportalen_se/Sidhuvud/BiogasInSweden.ashx). website: [http://www.biogasportalen.se/~media/Files/www\\_biogasportalen\\_se/Sidhuvud/BiogasInSweden.ashx](http://www.biogasportalen.se/~media/Files/www_biogasportalen_se/Sidhuvud/BiogasInSweden.ashx).
- Tritt, W. ., & Schuchard, F. (1992). Materials flow and possibilities of treating liquid and solid wastes from slaughterhouses in Germany. *Bioresource Technology*, 41(3), 235–245.
- Uusitalo, V., Soukka, R., Horttanainen, M., Niskanen, A., & Havukainen, J. (2013). Economics and greenhouse gas balance of biogas use systems in the Finnish transportation sector. *Renewable Energy*, 51, 132–140. <https://doi.org/doi:10.1016/j.renene.2012.09.002>

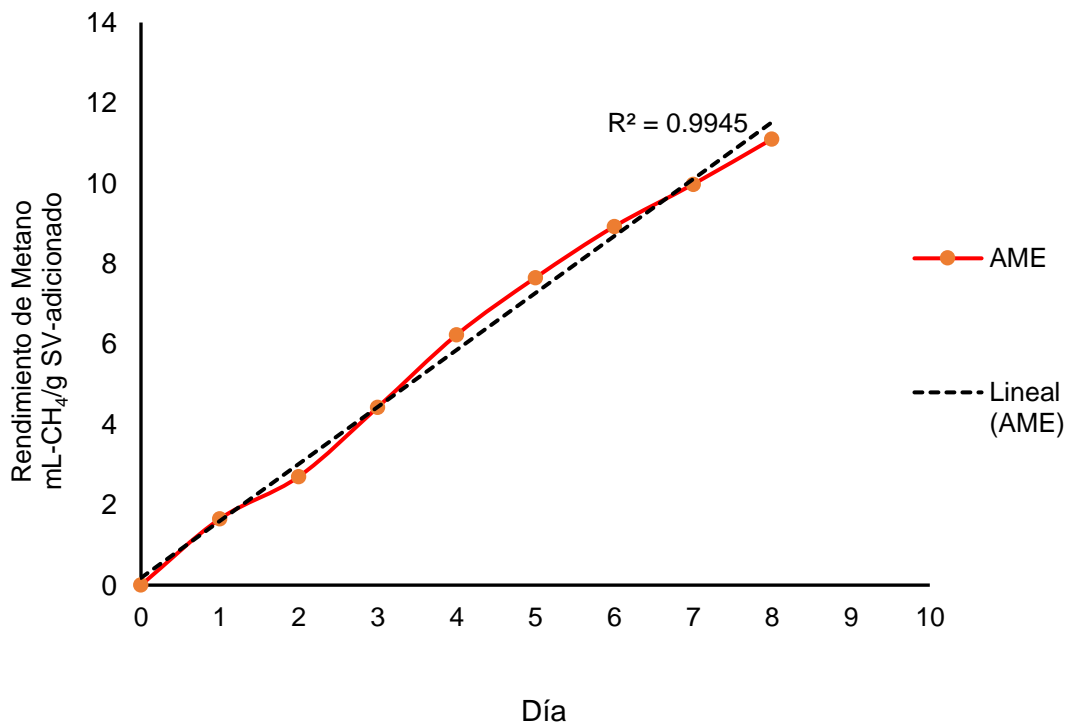
- Varnero, M. (2011). *Manual de Biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Santiago de Chile: Proyecto CHI/00/G32, —Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables*. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- Venegas, F. (1995). *Procesamiento de subproductos animales comestibles. Estudio Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación FAO. Producción y Sanidad Animal*. Roma.
- Whitman, WB, Bowen, U., & Boone, D. R. (1992). The Methanogenic Bacteria. In: Prokaryotes 2nd edn. (Balows A, Truper, Dworkin M, Harder W, Schleiler K-H, Eds.). *Springer Verlag, New York*, 2, 719–767.
- World Bioenergy Association. (2015). WBA Global Bioenergy Statistics 2015. *World Bioenergy Association*. Retrieved from [http://www.worldbioenergy.org/sites/default/files/WBA Global Bioenergy Statistics 2015 %28press quality%29.pdf](http://www.worldbioenergy.org/sites/default/files/WBA%20Global%20Bioenergy%20Statistics%202015%20press%20quality.pdf)
- Zamora Huaman, S. J. (2016). *RENDIMIENTO Y COMPOSICIÓN CORPORAL DE CUYES (Cavia porcellus) SUPLEMENTADOS CON TRES NIVELES DE HARINA DE SANGRE BOVINO (Bos taurus) PROCESADA ARTESANALMENTE*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO ESCUELA DE POSTGRADO.
- Zhang, R., El-Mashad, H., Hartman, K., Wang, F., Liu, G., Choate, C., & Gamble, P. (2007). Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 98(4), 920–935. <https://doi.org/doi:10.1016/j.biortech.2006.02.039>
- Zhang, Y., Banks, C., & Heaven, S. (2012). Anaerobic digestion of two biodegradable municipal waste streams. *Journal of Environmental Management*, 104, 166–174. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jenvman.2012.03.043>
- Zinder, S. H. (1998). Chapter 5. Methanogens. En: Burlage, R.S. et al., *Techniques in Microbial Ecology*. *Oxford University Press*, 113–135.

## **ANEXOS**

## Anexo A: Actividad Metanogénica Específica (AME)

El inóculo normalmente se caracteriza en términos de parámetros fisicoquímicos que permitan identificar el contenido de biomasa activa (SV/ST) y su capacidad de producción de CH<sub>4</sub>, para lo cual se realiza el ensayo de Actividad Metanogénica Específica (AME) empleando como sustrato una mezcla de ácidos grasos volátiles (AGV's), comúnmente constituida por acetato, propionato y butirato en una proporción similar a la del residuo a evaluar (Cárdenas Cleves et al., 2016). En esta sección para realizar este ensayo se utilizó acetato de sodio (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>NaO<sub>2</sub>) como sustrato, el TRH fue de 4 días, la agitación fue manualmente cada día, el biogás producido se midió cada 12 horas, los resultados se muestran en la Figura 17.

Figura 17. Actividad Metanogénica Especifica del inóculo (estiércol de vaca)



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 17 podemos apreciar que la actividad metanogénica del inóculo es 0.9945 muy cercano al 1. Esto nos indica que los microorganismos que posee el estiércol de ganado vacuno son eficientes en los ensayos de PBM.

## Anexo B: Panel Fotográfico

*Figura 18.* Estiércol de vaca (inóculo)



*Leyenda:* Recolección de estiércol de vaca (inóculo), este tiene la función de degradar toda la materia orgánica presente en las sangres residuales de matadero (sustrato) por medio de la DA. En este proceso de degradación se produce el biogás.

*Figura 19.* Sangres residuales de matadero (sustrato)



*Leyenda:* Recolección de sangres residuales (sustrato), a partir de estos residuos se produjo el biogás; siendo el principal nutriente de las bacterias metanogénicas presentes en el estiércol de vaca (inóculo).

Figura 20. Incubación del Inoculo



Leyenda: Se realizó la incubación del estiércol de vaca en un reactor convencional. Este proceso se realizó durante un mes.

Figura 21. Preparación de las muestras.



Leyenda: Agitación y preparación de las muestras para colocarlos en los reactores "batch".

Figura 22. Purga con Nitrógeno



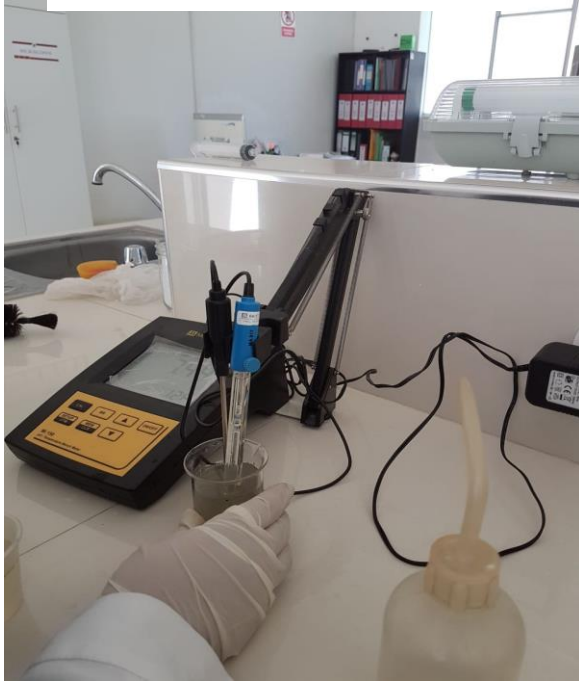
Leyenda: Se realiza la purga con Nitrógeno (5.0) UAP, para asegurar que el medio dentro de los reactores "batch" sea anaerobio.

Figura 23. Incubación en la Estufa



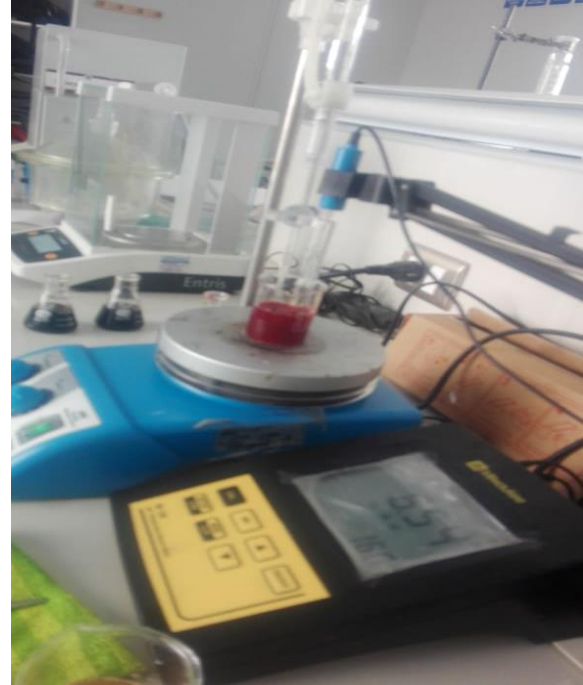
Leyenda: Se llevaron los reactores a diferentes estufas donde se sistemáticamente se puso a T° de 15 y 35°C, para la producción de biogás.

Figura 24. Medición de pH



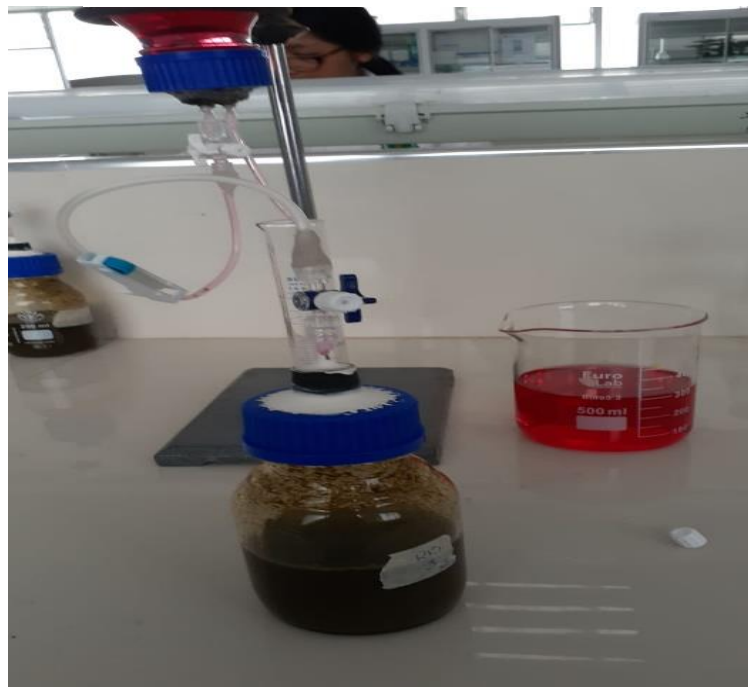
Leyenda: Se realizó la medición de este parámetro al inicio y al finalizar el ensayo de DA.

Figura 25. Medición de los AGV y alcalinidad total



Leyenda: Se realizaron las mediciones de estos parámetros al inicio y al finalizar los ensayos de DA.

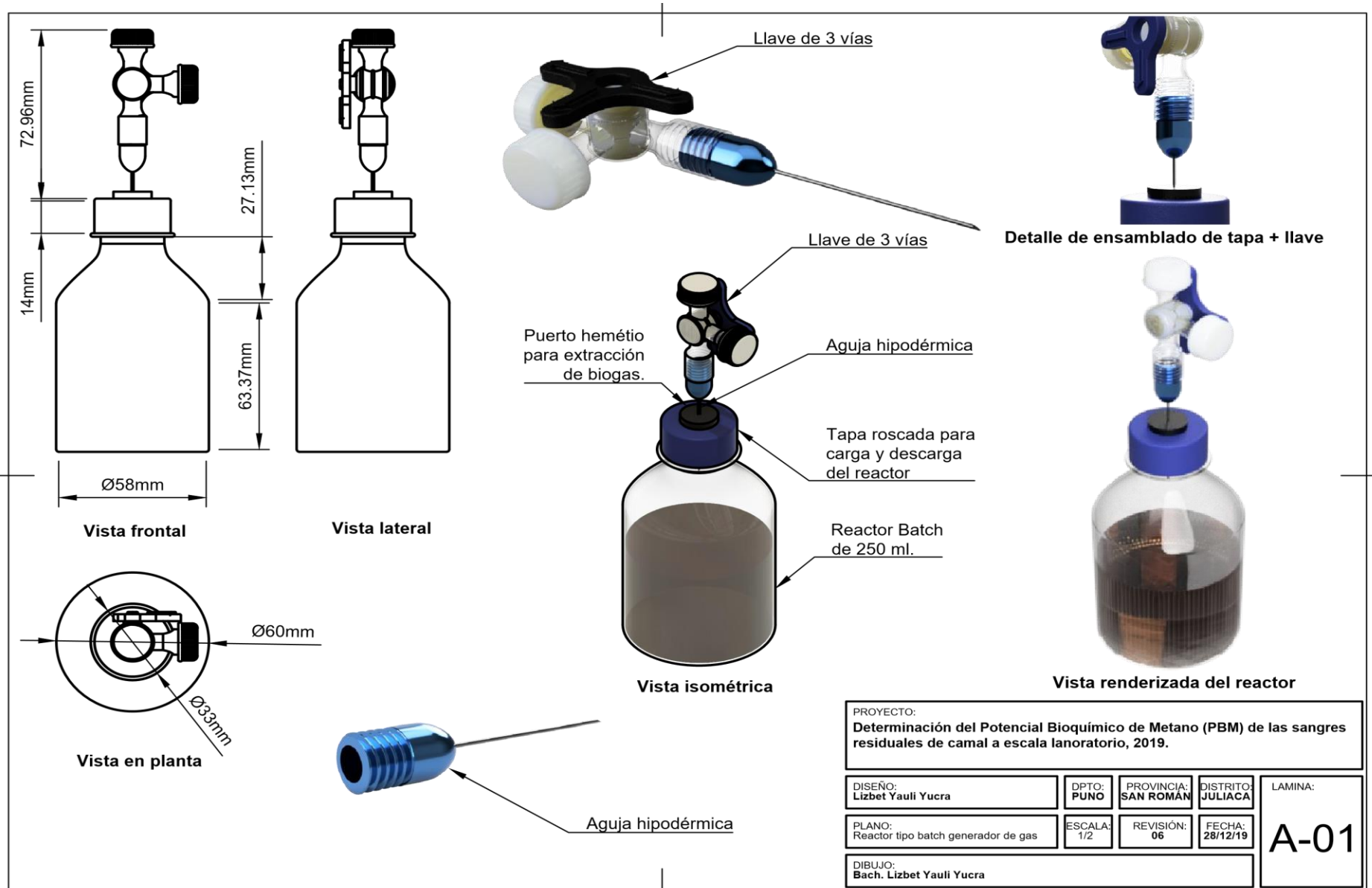
Figura 26. Purificación y cuantificación del biogás producido



Leyenda: Para la purificación y cuantificación del biogás producido se empleó el método volumétrico. Teniendo el biogás en mL.

## **Anexo C: Diseño del reactor batch – Escala laboratorio**

Figura 24. Medición de pH



Fuente: Elaboración propia.