

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental



**Potencial Bioquímico de Metano (PBM) a partir del estiércol de  
camélidos altoandinos de la Región Puno - Perú**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

**Autor:**

Reyna Meliza Colque Conza

Deny Ambra Gonzalo Luque

Prisca Noemi Larico Casas

**Asesor:**

Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

**Juliaca, diciembre de 2023**

## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

### DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM) A PARTIR DEL ESTIÉRCOL DE CAMÉLIDOS ALTOANDINOS DE LA REGIÓN PUNO - PERÚ”** de los autores **Reyna Meliza Colque Conza, Deny Ambra Gonzalo Luque y Prisca Noemi Larico Casas** para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental, tiene un índice de similitud de 5 % verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Juliaca, a los 21 días del mes de enero del año 2024



---

Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera



**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 11 día(s) del mes de diciembre del año 2023, siendo las 14:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Ing. Nancy Lurasí Rafael el (la) secretario(a): M<sup>te</sup> Loyda Abigail

Londori Kuyso y los demás miembros: M<sup>te</sup> Franklyn Ewald Lapana

Guera Dr. Jorge Juvenal Bravo Xualla y el (la) asesor(a) M<sup>tro</sup> Juan Eduardo Vigo

Rivera con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: Potencial Bioquímica de Melano (PBM) a partir del estiércol de camélidos alpacinos de la Región Puno-Perú

- del(los) bachiller(es): a) Reyna Melija Golque Lonza  
 b) Deny Ambra Gonzalo Luque  
 c) Brisca Noemi Larico Laras

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Ambiental  
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado. Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): Reyna Melija Golque Lonza

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>17</u>	<u>B+</u>	<u>Muy Bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

Bachiller (b): Deny Ambra Gonzalo Luque

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>17</u>	<u>B+</u>	<u>Muy Bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

Bachiller (c): Brisca Noemi Larico Laras

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>17</u>	<u>B+</u>	<u>Muy Bueno</u>	<u>Sobresaliente</u>

(\*) Ver parte posterior  
 Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]  
 Presidente/a  
[Firma]  
 Asesor/a  
[Firma]  
 Bachiller (a)

[Firma]  
 Miembro  
[Firma]  
 Bachiller (b)

[Firma]  
 Secretario/a  
[Firma]  
 Miembro  
[Firma]  
 Bachiller (c)

## **DEDICATORIA**

Primeramente, a Dios por darme la oportunidad de nacer en un hogar cristiano y por la sabiduría brindada. A mis padres por brindarme todo el apoyo incondicional en todo momento, y por su sacrificio a lo largo de estos años académicos y por todos sus consejos para poder alcanzar mis metas, a mis hermanos que de una u otra manera me inspiraron a seguir adelante y no rendirme; y a toda mi familia por motivarme a salir adelante.

Con mucho amor **R. Meliza C. C.**

Esta investigación se la dedico primeramente a Dios por la sabiduría e inteligencia brindada a lo largo de mi formación profesional, a mi familia, mi hermano Miguel y en especial a mi madre María Luisa por ser mi fuerza y motivación, quien siempre me impulsa a seguir luchando por mis metas y objetivos, por recordarme que nunca es tarde para alcanzar los sueños trazados.

**Deny Ambra**

A Dios por su infinito amor, A Victoria, mi madre, por que a diario me da su gran apoyo moral, por inculcarme valores y deseos de superación. A mis hermanos y hermanas por sus palabras de aliento, quienes me inspiraron a ser mejor cada día.

**Prisca Noemi**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos primeramente a Dios por brindarnos salud, bienestar e inteligencia para seguir adelante con nuestro desarrollo profesional.

A nuestra Universidad Peruana Unión – Filial Juliaca que nos enseñó los valores, y a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental por brindarnos un espacio dentro de sus laboratorios especializados para la ejecución de esta investigación.

A nuestro Asesor Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera por sus enseñanzas, por su exigencia, su paciencia y apoyo en cada parte de la ejecución de la tesis, alentándonos a seguir adelante.

Al Ing. Glen Madrigal, por impartirnos sus conocimientos y guiarnos a lo largo del proceso de investigación.

A nuestros padres por todo el sacrificio que hicieron al educarnos desde pequeños y aconsejarnos en todo momento.

Y a todas las personas que formaron parte de este proyecto de investigación, agradecerles por todos sus conocimientos impartidos, por su amistad, su apoyo y motivación.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
INDICE DE FIGURAS .....	viii
INDICE DE ANEXOS .....	ix
RESUMEN .....	10
ABSTRACT .....	11
1. INTRODUCCION .....	12
2. MATERIALES Y MÉTODOS .....	13
2.1 Sustrato e inóculo.....	13
2.2. Pruebas de potencial bioquímico de metano (PBM).....	13
2.3. Análisis fisicoquímico .....	14
2.4. Análisis estadístico.....	14
3. RESULTADOS .....	14
3.1. Características del sustrato.....	14
3.2. Producción acumulada de biogás.....	15
3.3. Composición del biogás.....	17
4. DISCUSIÓN.....	18
5. CONCLUSIÓN .....	20
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	21

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Caracterización fisicoquímica de estiércol de alpaca, llama y vicuña</i> .....	15
<b>Tabla 2</b> <i>Caracterización fisicoquímica de estiércol de alpaca, llama y vicuña final a 20 °C y 35 °C</i> .....	15

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Producción acumulada de biogás de EA, ELL y EV a temperaturas de 35 °C y 20 °C</i> .....	16
<b>Figura 2</b> <i>Concentración de pH y AGV de los estiércoles al inicio y final de las pruebas PBM</i> .....	17
<b>Figura 3</b> <i>Composición de metano en el biogás a temperaturas de 35 °C y 20 °C</i> .....	18

## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo A.</b> Evidencia de sumisión .....	24
<b>Anexo B.</b> Resolución de inscripción del perfil del proyecto de tesis en formato artículo. .	25

## **Potencial Bioquímico de Metano (PBM) a partir del estiércol de camélidos altoandinos de la Región Puno – Perú**

### **RESUMEN**

La digestión anaerobia (DA) es un proceso efectivo para la degradación de residuos y disminución de la contaminación, al mismo tiempo que produce una fuente alternativa de energía en forma de metano. El objetivo principal de este estudio fue evaluar el potencial metanogénico (PBM) de tres tipos de estiércol provenientes del altiplano peruano: estiércol de Alpaca (EA), estiércol de llama (ELL) y estiércol de vicuña (EV), en condiciones mesófilas (35 °C) y psicrófilas (20 °C). Los experimentos se llevaron a cabo en frascos reactores de 120 mL con un volumen de trabajo de 60 mL, usando una relación inoculo-sustrato (RIS) de dos. Se determinó el pH, AGV, sólidos totales y volátiles antes y después de los ensayos. La mayor producción de biogás fue observada al usar el estiércol de vicuña a 35 °C, donde se alcanzó un valor de 177.44 mL biogás/g SV<sub>adicionado</sub>, el cual fue superior a los resultados obtenidos usando el estiércol de llama y alpaca en 26% y 19%, respectivamente. La producción de biogás fue menor a 20 °C; en el caso de la vicuña, la producción máxima fue sólo de 75.67 mL biogás/g SV<sub>adicionado</sub>, lo que resultó en una reducción del 57% en la eficiencia, sin embargo, este sustrato produjo 17% y 46% más que el estiércol de llama y de alpaca, respectivamente. Los sustratos utilizados muestran potencial de degradación y producción de metano, pero el rendimiento del proceso está directamente influenciado por la temperatura.

*Palabras clave:* Digestión anaerobia, biogás, estiércol, zona altoandina.

# **Biochemical Potential of Methane (BMP) from the manure of high Andean camelids from the Puno Region – Peru**

## **ABSTRACT**

Anaerobic digestion (AD) is an effective process for waste degradation and pollution reduction, while also producing an alternative source of energy in the form of methane. The main objective of this study was to evaluate the methanogenic potential (MEW) of three types of manure from the Peruvian highlands: alpaca manure (EA), llama manure (ELL) and vicuña manure (EV), under mesophilic (35 °C) and psychrophilic (20 °C) conditions. Experiments were carried out in 120 mL reactor flasks with a 60 mL working volume, using an inoculo-substrate ratio (RIS) of 2. pH, VFA, total and volatile solids were determined before and after the tests. The highest biogas production was observed when using vicuña manure at 35 °C, where a value of 177.44 mL biogas/g added was reached, which was higher than the results obtained using llama and alpaca manure by 26% and 19%, respectively. Biogas production was less than 20 °C; In the case of vicuña, the maximum production was only 75.67 mL biogas/g SVadded, which resulted in a 57% reduction in efficiency, however, this substrate produced 17% and 46% more than llama and alpaca manure, respectively. The substrates used show potential for degradation and methane production, but process performance is directly influenced by temperature.

*Keywords:* Anaerobic digestion, biogas, manure, high Andean zone.

## 1. INTRODUCCION

Las principales actividades que se desarrollan en los andes peruanos son la agricultura y ganadería. En esta zona, cuya altitud esta entre los 3000 a 4500 m.s.n.m., la producción de ganado es realizado con animales autóctonos como Vicuña, Llama y Alpaca. Además, las comunidades rurales dependen en gran medida de los combustibles convencionales, que incluyen madera, estiércol de animales y residuos agrícolas. El uso excesivo de madera es un problema importante de deforestación debido a la creciente demanda de energía. De esta manera, existe un gran interés en el avance de tecnologías que utilizan recursos renovables.

La digestión anaerobia (DA) es un proceso bioquímico para el tratamiento de residuos orgánicos y la producción de biogás, que puede ser usado para cocinar, calefacción, cogeneración de electricidad, entre otros usos (El-Mashad and Zhang 2010). El proceso de degradación comprende cuatro pasos: hidrolisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis; en estos pasos están involucrados relaciones sintróficas entre diferentes grupos de microorganismos que sirven a varios propósitos, como mantener el equilibrio termodinámico y evitar la acumulación de metabolitos intermedios (Lettinga 1995). El estiércol de ganado puede ser usado como sustrato para generación de metano (Meneses-Quelal et al. 2021) por su disponibilidad, sin embargo, son muchos los factores que afectan al proceso de degradación, siendo la temperatura uno de ellos.

En general, la tasa de degradación y la producción de biogás es directamente proporcional al incremento de temperatura (Wei et al. 2014). Alvarez et al. (2006) reportó la producción de biogás de estiércol de bovino y llama midiendo el efecto de temperaturas mesofílicas y psicofílicas, menciona, que el principal parámetro que afecta la producción de biogás es la temperatura. La producción de metano de estiércol bovino a 11 °C fue de 6.4 – 33.6 L CH<sub>4</sub>/kg SV y a 35 °C fue de 49.6 – 131.3 L CH<sub>4</sub>/kg SV, mientras que para estiércol de llama las producciones a 11 °C fueron de 3.3 – 19.31 L CH<sub>4</sub>/kg SV y a 35 °C de 35.6 – 84.1 L CH<sub>4</sub>/kg SV. Llegando a la conclusión de que el estiércol de llama tiene un gran potencial para la producción de biogás por su elevado contenido de solidos volátiles (SV). Por otro lado, en la investigación realizada por Alvarez & Lidén (2009), las producciones de metano obtenidos de mezclas de estiércol de bovino, llama y oveja estuvieron en el rango de 0.07 – 0.14 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg SV, con una concentración de metano en el biogás de 47 a 55%.

La mayoría de las investigaciones en DA se centran en la aplicación de condiciones mesofílicas (35 – 37 °C) o termofílicas (55 – 60 °C), siendo pocos los trabajos desenvueltos en condiciones de bajas temperaturas (< 20 °C) (Tiwari et al. 2021).

Con base en lo descrito anteriormente, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el potencial metanogénico en condiciones mesofílicas y psicofílicas de estiércol de Alpaca (EA), Llama (ELL) y vicuña (EV) provenientes de la región altoandina del Perú. Ya que existe una brecha de conocimiento, sobre todo con la utilización de estiércoles producidos en la región de los andes peruanos como sustrato.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Sustrato e inóculo**

El estiércol de Alpaca (EA) y Llama (ELL) se obtuvieron de una granja del altiplano peruano, en la provincia de Macusani, a una altitud de 4315 m.s.n.m., mientras que el estiércol de vicuña (EV) fue recolectado de la hacienda Cala Cala, provincia de Putina a una altitud 4000 m.s.n.m., ambos ubicados en la región Puno. Las muestras se recolectaron en bolsas de cierre hermético y se transportaron en un cooler hasta el laboratorio, donde se almacenaron a -10 °C hasta su posterior uso, tomando cuidado para no superar los siete días. El inóculo utilizado fue extraído de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cusco, Perú (PTAR San Jerónimo) y presentó las siguientes características: un valor de Ph de 8.2, Sólidos Totales (ST) en torno de 34.31 g/kg, Sólidos Volátiles (SV) de 19.71 g/kg, Ácidos Grasos Volátiles (AGV) de 2460 mg CH<sub>3</sub>COOH/L y Alcalinidad Total (AT) de 3700 mg CaCO<sub>3</sub>/L.

El lodo fue incubado a 32 °C por cinco días para desgasificarlo y reducir su producción endógena para minimizar los errores de cálculo.

### **2.2. Pruebas de potencial bioquímico de metano (PBM)**

Los experimentos fueron realizados en digestores tipo batch, siguiendo la metodología propuesta por (Holliger et al. 2016). A través de estas pruebas se determinaron las producciones máximas de biogás y metano de los sustratos estudiados. Todas las pruebas fueron desarrolladas por triplicado en frascos reactores de 120 MI de capacidad, con volumen de trabajo de 60 ml, usando una relación inóculo-sustrato (RIS) de dos, llevando

en consideración los SV. Un blanco libre de sustrato fue incluido para medir la producción de metano endógena del inóculo. Inmediatamente después, el espacio de cabeza fue llenado con nitrógeno (N<sub>2</sub>) por 30 s, luego los frascos reactores fueron cerrados con tapones de goma de butilo (rubber bv) y sellados con agrafes de aluminio para mantener condiciones anaerobias. Se utilizaron dos temperaturas de incubación: 20 y 35 °C.

El biogás producido fue cuantificado mediante el método de densidad de gases (Gas Density Biochemical Potential Test, GD-BMP) y método fue calculado según Justesen et al. (2019), usando condiciones estándar de presión y temperatura, esto es, 100 kPa de presión y 273.15 K.

### **2.3. Análisis fisicoquímico**

El contenido de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV) se determinaron por diferencia de peso usando una estufa (Binder, Alemania) para el secado a 105 °C por 24 h y en una mufla (Protherm, Turkia) para posterior calcinación a 550 °C por 1 h (APHA, 2017). Para el Ph, Ácidos Grasos Volátiles (AGV) y Alcalinidad Total (AT), las muestras fueron centrifugadas a 5000 rpm por 30 min, y el sobrenadante se utilizó para los análisis. El valor de pH se midió usando un pH metro (Horiba, Japon). El AGV y AT fueron cuantificados mediante el método titrimétrico, para la titulación se empleó las soluciones NaOH 0.1N y HCl 0.1N. Todos los análisis se hicieron tanto al inicio y final de las pruebas PBM.

### **2.4. Análisis estadístico**

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis estadístico con el software Microsoft Excel, se realizó análisis de varianza ANOVA al 95 % de confianza con p-valor  $\leq 0.05$ .

## **3. RESULTADOS**

### **3.1. Características del sustrato**

Los sustratos se analizaron con respecto al contenido de ST y SV (Tabla 1). Existen diferencias apreciables entre los tres estiércoles (Tukey,  $p \leq 0.05$ ). Particularmente, el EA presenta un contenido de SV más elevado que el ELL y EV, lo cual es justificado debido a que estos dos últimos sustratos presentan un menor contenido de ceniza.

**Tabla 1***Caracterización fisicoquímica de estiércol de alpaca, llama y vicuña.*

Parámetro	Unidad	Inóculo	Alpaca	Llama	vicuña
Sólidos totales (ST)	g/kg	34.31± 0. 52 <sup>a</sup>	789.71±1.84b	414.06 ±1.11c	403.01±6.17d
Sólidos Volátiles (SV)	g/kg	19.71± 0. 12 <sup>a</sup>	673.37±3.43b	360.29±0.41c	323.24± 4.67d
Relación ST/SV		1.74	1.17	1.15	1.25
Ceniza	g/kg	14.6 ± 0. 40 <sup>a</sup>	116.34±2.19b	53.77±0.84c	79.77± 1.69d
Humedad	%	96.57 ± 0.05 <sup>a</sup>	21.03± 0.18b	58.59 ± 0.11c	59.7 ± 0.62d

**Nota:** Resultados expresados como promedio ± desviación estándar. Letras diferentes por columna presentan diferencia significativa (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

### 3.2. Producción acumulada de biogás

Durante la DA en batch, las curvas de producción de biogás revelan información útil respecto las diferencias marcadas en condiciones psicrófilas (20 °C) y mesófilas (35 °C), tal como se muestra en la Figura 1. Estos resultados indican que la DA a 35 °C produce significativamente más biogás que la DA a 20 °C. Examinando los perfiles de producción del biogás, se puede observar dos segmentos a 35 °C, con crecimiento exponencial en los primeros 15 días y luego un crecimiento lento hasta la estabilización. A 20 °C, sólo se puede observar un incremento lento en la producción de biogás y para lograr una producción estable se requiere un consorcio microbiano adaptado a bajas temperaturas (Dhaked et al., 2010). Todos los sustratos seguían el mismo perfil en las respectivas temperaturas de prueba. Los perfiles de producción de biogás indican que la degradación de todos los sustratos empieza inmediatamente con una tasa elevada, especialmente, a temperatura de 35 °C. Los valores de producción de biogás acumulado a 35 °C fueron de 177.44, 142.02 y 130.59 mL-biogás/g SV<sub>adicionado</sub> para EV, EA y ELL, respectivamente. Del mismo modo, a 20 °C, los valores de biogás acumulado fueron de 75.67, 62.73 y 40.61 mL-biogás /g SV<sub>adicionado</sub> para EV, ELL y EA, respectivamente.

**Tabla 2***Caracterización fisicoquímica de estiércol de alpaca, llama y vicuña final a 20 °C y 35 °C.*

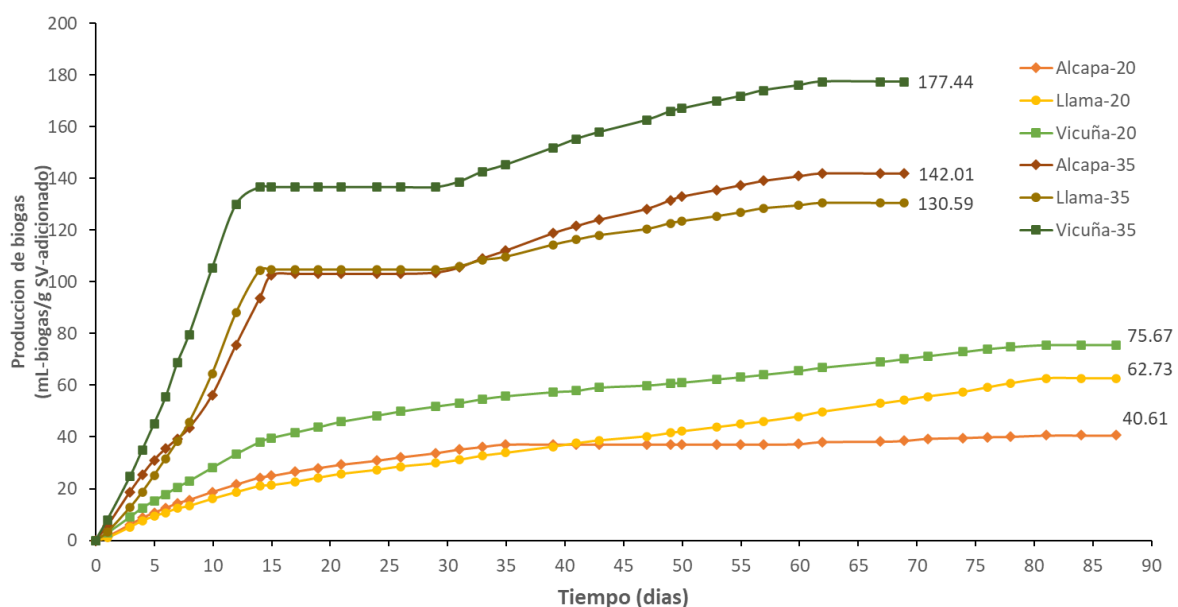
Parámetro	T °C	Unidad	Inóculo	Alpaca	Llama	vicuña
Sólidos totales (ST)	20	g/kg	33.33± 0. 93	36.39± 0.56	38.20± 1.22	40.92±0.71
	35		26.60± 5.82	40.50±2.61	36.97 ±1.08	37.02± 1.64

Sólidos Volátiles (SV)	20	g/kg	17.99± 0.37	22.20±0.44	23.11±0.79	24.18± 0.49
	35		13.95± 2.77	24.21±1.83	22.03±0.68	21.61± 0.93
Ceniza	20	g/kg	15.34± 0.84	14.19±0.12	15.09±0.43	16.74± 0.22
	35		12.65± 3.05	16.29±0.78	14.94±0.40	15.41± 0.72
Humedad	20	%	96.67 ± 0.09	96.36± 0.06	96.18± 0.12	95.91 ± 0.07
	35		97.34 ± 0.58	95.95± 0.26	96.30 ± 0.11	96.30 ± 0.16

La DA de los tres diferentes estiércoles (vicuña, llama y alpaca) muestran diferencias claras. La mayor producción de biogás a 20 °C (75.67 mL-biogás/g SV<sub>adicionado</sub>) y 35 °C (177,44 mL-biogás/g SV<sub>adicionado</sub>) eran obtenidos con EV; sin embargo, los datos observados en el presente estudio, para estiércoles del altiplano peruano, aún son bajos (Alvarez & Lidén, 2009b).

**Figura 1**

*Producción acumulada de biogás de EA, ELL y EV a temperaturas de 35 °C y 20 °C.*

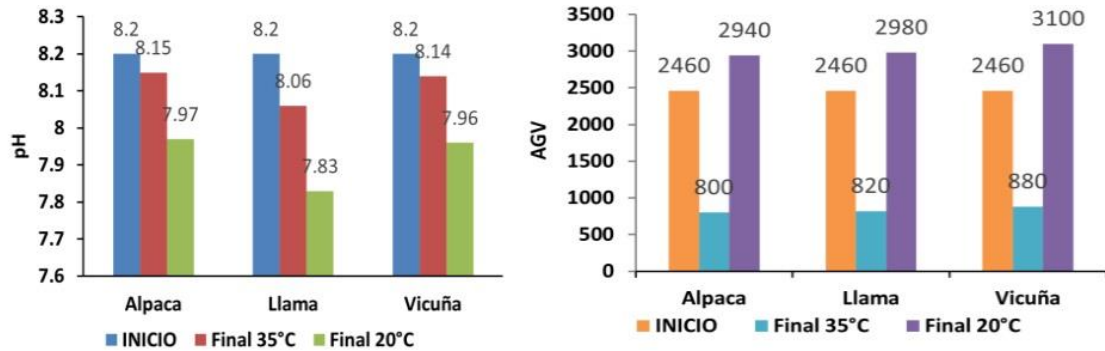


Las condiciones climáticas adversas del altiplano y los forrajes tolerantes a las heladas dan a los animales una dieta diferente en comparación a zonas de clima más cálido o de tierras bajas. La baja producción de CH<sub>4</sub> obtenido en la DA de estiércoles del altiplano sugieren que existe elevado contenido de compuestos recalcitrantes y poco solubles, también estos estiércoles podrían contener bajo porcentaje de proteína (10%) y elevado contenido de lignina (25%) (Alvarez et al. 2006). Las bajas producciones de CH<sub>4</sub> también podrían ser atribuidos a la calidad de los SV en los estiércoles, la falta de nitrógeno conduce al proceso anaerobio a un menor rendimiento de producción de metano a causa a la desactivación de

los metanógenos (Neshat et al., 2017). Además, en la Figura 2 se puede visualizar que la temperatura también tiene efecto en los niveles de pH y AGV.

**Figura 2**

*Concentración de pH y AGV de los estiércoles al inicio y final de las pruebas PBM.*



La disminución en la producción de CH<sub>4</sub> observada en este estudio, cuando la temperatura baja de 35 °C a 20 °C, fue similar a lo reportado por Massé et al. (2003). Del mismo modo, el pH disminuye cuando la temperatura baja. No obstante, el pH en todos los tratamientos a 20 °C, aún se mantienen dentro del rango de pH aceptable (6.5-7.5) para que el proceso de DA se desarrolle adecuadamente (Witarsa & Lansing, 2015); ilustrando que la falta de actividad metanogénica a 20 °C probablemente no se deba al pH. Por otro lado, se muestra una diferencia sustancial entre los tratamientos de 35 °C y 20 °C en el contenido de AGV al final de las pruebas. Al inicio, el AGV es de 2460 mg CH<sub>3</sub>COOH/L en todas las pruebas, al final el contenido de AGV a 35 °C en valores de 800, 820 y 880 mg CH<sub>3</sub>COOH/L para EA, ELL y EV, respectivamente; a 20 °C es de 2940, 2980 y 3100 mg CH<sub>3</sub>COOH/L para EA, ELL y EV, respectivamente. Cuando la temperatura de digestión se reduce, el contenido de AGV aumenta y en consecuencia la producción de CH<sub>4</sub> disminuye. A diferencia del pH, estos resultados muestran que la acumulación de AGV podría ser uno de los factores que afectan la actividad metanogénica del proceso de DA.

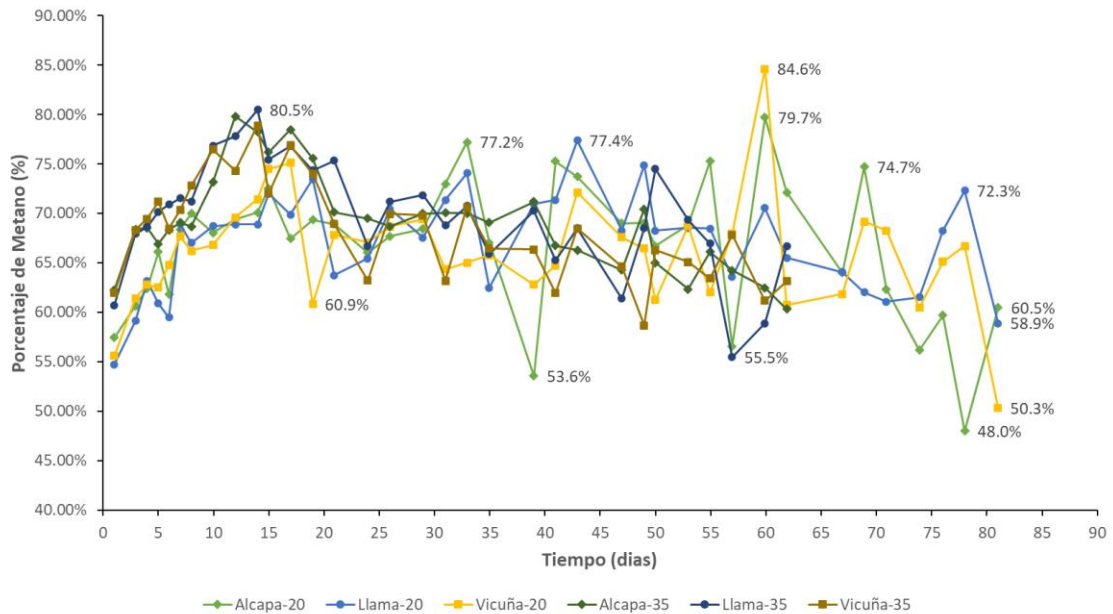
### 3.3. Composición del biogás

El biogás está constituido por otros gases, tales como el metano, CO<sub>2</sub>, hidrógeno, nitrógeno y vapor de agua (Kapdi et al. 2014). La calidad del biogás es indicada por su contenido de

CH<sub>4</sub> (porcentaje CH<sub>4</sub>) (Figura 3). Interesantemente, el contenido de CH<sub>4</sub> es similar en todas las pruebas, tanto a 35 °C y 20 °C. Se observó que, a 35 °C el porcentaje de CH<sub>4</sub> promedio fue de 69.05, 69.65 y 68.21% para EA, ELL y EV, respectivamente; a 20 °C fue de 66.77, 67.01 y 66.02% para EA, ELL y EV, respectivamente.

**Figura 3**

*Composición de metano en el biogás a temperaturas de 35 °C y 20 °C.*



Los volúmenes de biogás producidos en este trabajo fueron bajos a 35 °C y menores aún a 20 °C, pero gran parte del biogás obtenido está compuesto de un 48% a 84.62% de CH<sub>4</sub>, los porcentajes de metano se incrementan desde los primeros días de tratamiento y empieza a variar desde la quincena, ya sea en condiciones psicrófilicas (20 °C) y mesofílicas (35 °C).

#### 4. DISCUSIÓN

El contenido elevado de sólidos de los tres residuos es comparable con datos publicados previamente para estiércol bovino, llama, cerdo y caballo (Alvarez et al. 2006; Kalia and Singh 1998). Los resultados obtenidos del EV, EA y ELL son consistentes con el efecto positivo que tiene la temperatura durante la DA en la degradación (Witarsa & Lansing, 2015), pues el incremento de temperatura de 20 °C a 35 °C incrementa sustancialmente la producción de biogás.

Estudios previos que también utilizaron estiércoles obtenidos en condiciones del altiplano reportaron producciones de metano para estiércol de llama, vaca y oveja en el rango de 90 a 180 mL CH<sub>4</sub> /g SV<sub>adicionado</sub> (Alvarez and Lidén 2009; Hawkes et al. 1984; Kalia and Singh 1998). Dichos estudios mencionaron que las producciones son muy bajas en comparación a otro tipo de residuos. El IPCC (por sus siglas en inglés “International Plant Protection Convention”) estimó que el estiércol de ganado en países en desarrollo debería producir aproximadamente 240 mL CH<sub>4</sub> /g SV<sub>adicionado</sub> (IPCC, 1997). La baja producción de metano es causada probablemente por las diferencias en la composición del estiércol, la cual afecta el proceso de degradación anaerobio (Alvarez and Lidén 2009).

En el tiempo que duraron los ensayos, los porcentajes de CH<sub>4</sub>, tanto a 35 °C y 20 °C, se mantuvieron en el rango de 55 a 80%. Algunos resultados similares también fueron observados en la literatura. Por ejemplo, Wei et al. (2014) investigó la DA de dos estiércoles de animales a altitudes elevadas, sus resultados muestran un porcentaje de CH<sub>4</sub> alrededor de 65 a 72%. Por otro lado, Paucar (2015) indica que un biogás de calidad se mide en función de la cantidad de metano producido por el sustrato, sabiendo que el biogás posee entre un 40 % a 70 % de CH<sub>4</sub>; por ende, un buen biogás debe contener un alto porcentaje de CH<sub>4</sub>.

Por otro lado, los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que la DA de EA, ELL y EV es afectada por la temperatura y la composición del sustrato, factores que tienen efecto directo en el proceso de degradación, entonces, para mejorar la producción de CH<sub>4</sub>, la mezcla de los estiércoles (co-digestión) podría ser una opción interesante. En la investigación realizada por Alvarez and Lidén (2009) reportaron un incremento de 56% en la co-digestión de estiércol de llama y oveja en comparación con la digestión de estiércol de llama. Del mismo modo, se observó un incremento de 18 % cuando mezclaron estiércol de vaca, llama y oveja. Además, estudios previos mostraron que la mezcla de diferentes estiércoles podría resultar en un mejor desarrollo del proceso de DA a través de la mejora de la relación C/N (Molnar and Bartha 1988) que está asociado con el incremento de la capacidad buffer (Murto et al. 2004), disminución del contenido de AGV y minimización del efecto de compuestos tóxicos en el proceso de DA (Alvarez and Lidén 2009).

## 5. CONCLUSIÓN

Finalmente, los resultados de este estudio muestran que técnicamente es posible producir CH<sub>4</sub> utilizando como sustrato estiércoles de alpaca, llama y vicuña. No obstante, las producciones son bajas en comparación a otro tipo de sustrato. La producción de CH<sub>4</sub> es fuertemente dependiente de la temperatura, y también de la composición del estiércol, observándose reducciones de 57% en el caso de la vicuña, 51% en el caso de la llama y 71% en la alpaca en la producción metanogénica. Además, se apreció acumulación de AGV (en el rango de 2940 – 3100 mg CH<sub>3</sub>COOH/L) y una disminución de pH en comparación con los experimentos de 35 °C.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez, R., & Lidén, G. (2009). Low temperature anaerobic digestion of mixtures of llama, cow and sheep manure for improved methane production. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 527–533. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.012>
- Alvarez, R., Villca, S., & Lidén, G. (2006). Biogas production from llama and cow manure at high altitude. *Biomass and Bioenergy*, 30(1), 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.10.001>
- Dhaked, R. K., Singh, P., & Singh, L. (2010). Biomethanation under psychrophilic conditions. *Waste Management*, 30(12), 2490–2496. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.07.015>
- El-Mashad, H. M., & Zhang, R. (2010). Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. *Bioresource Technology*, 101(11), 4021–4028. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.027>
- Hawkes, F. R., Rosser, B. L., Hawkes, D. L., & Statham, M. (1984). Mesophilic anaerobic digestion of cattle slurry after passage through a mechanical separator: Factors affecting gas yield. *Agricultural Wastes*, 10(4), 241–256. [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(84\)90001-5](https://doi.org/10.1016/0141-4607(84)90001-5)
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., De Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J. C., De Laclos, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology : A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 74(11), 2515–2522. <https://doi.org/10.2166/WST.2016.336>
- Kalia, A. K., & Singh, S. P. (1998). Horse dung as a partial substitute for cattle dung for operating family-size biogas plants in a hilly region. *Bioresource Technology*, 64(1), 63–66. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)00159-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00159-4)
- Kapdi, S. S., Vijay, V. K., Rajesh, S. K., & Prasad, R. (2014). Biogas scrubbing, compression and storage: perspective and prospectus in Indian context. *Renewable Energy*, 1–8.

- Lettinga, G. (1995). Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. *Antonie van Leeuwenhoek*, 67(1), 3–28. <https://doi.org/10.1007/BF00872193>
- Massé, D. I., Masse, L., & Croteau, F. (2003). The effect of temperature fluctuations on psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors treating swine manure. *Bioresource Technology*, 89(1), 57–62. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00009-9)
- Meneses-Quelal, W. O., Velázquez-Martí, B., Gaibor-Chávez, J., & Niño-Ruiz, Z. (2021, May 1). Biochemical potential of methane (BMP) of camelid waste and the Andean region agricultural crops. *Renewable Energy*, 168, 406–415. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.12.071>
- Molnar, L., & Bartha, I. (1988). High solids anaerobic fermentation for biogas and compost production. *Biomass*, 16(3), 173–182. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(88\)90090-X](https://doi.org/10.1016/0144-4565(88)90090-X)
- Murto, M., Björnsson, L., & Mattiasson, B. (2004). Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. *Journal of Environmental Management*, 70(2), 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2003.11.001>
- Neshat, S. A., Mohammadi, M., Najafpour, G. D., & Lahijani, P. (2017). Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(May), 308–322. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.137>
- Paucar Malpica, L. (2015). “ Producción y evaluación de la calidad del biogas y biol en un biodigestor granja v . A . Velebit s . Ac . Ubicada en el distrito de lurigancho- chosica ” Trabajo de Titulación para Optar el Título de : Ingeniero Ambiental Biólogo. *Universidad Nacional Agraria La Molina*, 159.
- Tiwari, B. R., Rouissi, T., Brar, S. K., & Surampalli, R. Y. (2021). Critical insights into psychrophilic anaerobic digestion: Novel strategies for improving biogas production. *Waste Management*, 131(June), 513–526. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.07.002>
- Wei, S., Zhang, H., Cai, X., Xu, J., Fang, J., & Liu, H. (2014). Psychrophilic anaerobic co-digestion of highland barley straw with two animal manures at high altitude for

enhancing biogas production. *Energy Conversion and Management*, 88, 40–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.018>

Witarsa, F., & Lansing, S. (2015). Quantifying methane production from psychrophilic anaerobic digestion of separated and unseparated dairy manure. *Ecological Engineering*, 78, 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.05.031>

## ANEXOS

### Anexo A. Evidencia de sumisión

[EA] Acuse de recibo de envío

Esteban Jobbágy via Ecología Austral <noreply@ecologiaaustral.com.ar>

Mié 22/11/2023 19:31

Para: Juan Eduardo Vigo Rivera <eduardo.vigo@upeu.edu.pe>

Juan Eduardo Vigo Rivera:

Gracias por enviar el manuscrito, "El Potencial Bioquímico de Metano (PBM) a partir del estiércol de camélidos altoandinos de la Región Puno - Perú" a Ecología Austral. Con nuestro sistema de gestión de revistas en línea, podrá iniciar sesión en el sitio web de la revista y hacer un seguimiento de su progreso a través del proceso editorial:

URL del manuscrito:

[https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia\\_Austral/authorDashboard/submission/2353](https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/authorDashboard/submission/2353)

Nombre de usuario/a: jevr72

En caso de dudas, contáctenos a [manuscritos@ecologiaaustral.com.ar](mailto:manuscritos@ecologiaaustral.com.ar)

Eva L. Florio

Editora de compaginación y comunicación

Ecología Austral

Esteban Jobbágy

Este es un mail automatico, por favor no lo responda

---

Ecología Austral - <http://ojs.ecologiaaustral.com.ar>

## Anexo B. Resolución de inscripción del perfil del proyecto de tesis en formato artículo.



“AÑO DE LA UNIDAD, LA PAZ Y EL DESARROLLO”

### RESOLUCIÓN N° 0574-2023/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Ñaña 10 de octubre de 2023

#### VISTO:

El expediente de **Reyna Meliza Colque Conza**, identificado(a) con Código Universitario N° 201321334, **Deny Ambra Gonzalo Luque**, identificado(a) con Código Universitario N° 201321342 y **Prisca Noemi Larico Casas**, identificado(a) con Código Universitario N° 201322697, de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

#### CONSIDERANDO

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Reyna Meliza Colque Conza, Deny Ambra Gonzalo Luque y Prisca Noemi Larico Casas**, han solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Potencial Bioquímico de Metano (PBM) a partir del estiércol de camélidos altoandinos de la región Puno-Perú" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 10 de octubre de 2023, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

#### SE RESUELVE:

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "**Potencial Bioquímico de Metano (PBM) a partir del estiércol de camélidos altoandinos de la región Puno-Perú**" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar al (a la) **Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera** como **ASESOR** para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **MSc. Rose Adeline Callata Chura** y **Dr. Jorge Juvenal Bravo Hualla**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.



  
Dra. Erika Inés Acuña Salinas  
DECANA



  
Mg. Ketty Magaly Arellano Lino  
SECRETARIA ACADÉMICA

cc:  
-Interesado  
-Asesor  
-Dirección General de Investigación  
-Archivo