

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



**Sostenibilidad energética en zonas rurales altoandinas mediante la
producción de biogás a partir de lactosuero y estiércol bovino en
biorreactores semicontinuos**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autores:

Paolo Andre Ccari Pacha
Gilma Marilia Mara Mamani

Asesor:

Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

Juliaca, julio de 2026

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Mtro Juan E. 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: **"Sostenibilidad energética en zonas rurales altoandinas mediante la producción de biogás a partir de lactosuero y estiércol bovino en biorreactores semicontínuos"** de los autores Paolo Andre Ccari Pacha y Gilma Marilia Mara Mamani 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 24 días del mes de julio del año 2026



Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 24 día(s) del mes de Julio del año 2020, siendo las 12:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Msc. Enrique Mamani Guela el (la) secretario(a): Mtro. Pedro Víctor Quipe Apaza y los demás miembros: Msc. Rose Addine Gallata Chura Mtro. Miriam Esquivel Ordoñez y el (la) asesor(a) Mtro. Juan Eduardo Vigo Rivera

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: "Sostenibilidad energética en zonas rurales altoandinas mediante la producción de biogas a partir de lactosuero y estiércol bovino en biorreactores semicontinuos"

del(los) bachiller(es): a) Paolo Andre Cari Pacha

b) Gilma Marilia Mara Mamani

c)

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): Paolo Andre Cari Pacha

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

Bachiller (b): Gilma Marilia Mara Mamani

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

Bachiller (c):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(*) 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
Bachiller (c)

Sostenibilidad energética en zonas rurales altoandinas mediante la producción de biogás a partir de lactosuero y estiércol bovino en biorreactores semicontinuos

Resumen

Las comunidades rurales altoandinas enfrentan limitaciones persistentes en el acceso a la energía y desafíos en la gestión de residuos derivados de la actividad lechera, particularmente el lactosuero dulce de queso (LSD) y el estiércol bovino (EB). Este estudio evaluó el desempeño de la codigestión anaerobia psicrófila de LSD y EB en biorreactores tubulares semicontinuos bajo condiciones altoandinas, centrándose en la producción y composición de biogás, la estabilidad del proceso y la calidad agronómica del digestato. Se operaron cinco biorreactores tubulares de flujo pistón con un volumen líquido útil de 5.5 L durante 132 días. Se aplicó un diseño experimental progresivo: inicialmente, todos los biorreactores fueron alimentados durante 30 días con la misma composición de sustrato, conformada por 0% de LSD, 25% de EB y 75% de Agua (H₂O). Posteriormente, en intervalos sucesivos de 30 días, la proporción de LSD se incrementó gradualmente en biorreactores seleccionados hasta alcanzar 25% y 50%, manteniendo constante la proporción de EB. Durante todo el período experimental se monitorearon la producción de biogás y los parámetros de estabilidad del proceso. La condición LS25 alcanzó la mayor producción acumulada de biogás y mantuvo una operación estable durante todo el estudio. En contraste, LS50 provocó una acumulación de ácidos grasos volátiles superior a 5000 mg L⁻¹, una disminución del pH hasta valores cercanos a 5.0, un incremento de la demanda química de oxígeno (DQO) por encima de 15000 mg L⁻¹ y una inhibición progresiva de la actividad metanogénica. El tratamiento LS0 presentó la mayor concentración de metano (52.34 ± 3.99%), mientras que los tratamientos con 50% de LSD registraron valores cercanos al 27%. Asimismo, el digestato mostró un incremento en las concentraciones de fósforo y potasio, aunque también aumentaron el contenido de sodio y la conductividad eléctrica. En conjunto, la condición LS25

representa la alternativa más favorable para la valorización energética y agronómica de estos residuos bajo condiciones psicrófilas altoandinas.

Palabras clave: biorreactores tubulares, bioenergía rural, digestión a gran altitud.