

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



**Evaluación del potencial de biometanización del lactosuero de
diferentes plantas productoras de queso de la región Puno - Perú**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autores:

Vanessa Mamani Quiroz

Andy Oscar Sullca Flores

Asesor:

Ing. Veronika Haydee Pari Mamani

Juliaca, octubre de 2023

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo Veronika Haydee Pari Mamani, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE BIOMETANIZACIÓN DEL LACTOSUERO DE DIFERENTES PLANTAS PRODUCTORAS DE QUESO DE LA REGIÓN PUNO-PERÚ”** de los autores Vanessa Mamani Quiroz y Andy Oscar Sulca Flores tiene un índice de similitud de 14% 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 23 días del mes de octubre del año 2023



Ing. Veronika Haydee Pari Mamani

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 23 día(s) del mes de octubre del año 2023 siendo las 11:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Msc. Franklyn Elard Zapana Yucra, el (la) secretario(a): Msc. Soayda Abigail

Londri Zurco y los demás miembros: Mtro. Juan Eduardo Vigo

Rivera - Ing. Nancy Kurasi Rafael y el (la) asesor(a) Ing. Verónica Haydee Pari

Mamani con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado:

Evaluación del potencial de biometanización del lactosuero de diferentes plantas productoras de queso de la región Puno-Perú

del(los) bachiller(es): a) Vanessa Mamani Quiroz

b) Andy Oscar Sulca Flores

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): Vanessa Mamani Quiroz

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Buena</u>

Bachiller (b): Andy Oscar Sulca Flores

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Buena</u>	<u>Muy Buena</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

[Firma]
Bachiller (c)

AGRADECIMIENTO

Primeramente, a Dios por haberme guiado hasta este logro, así mismo a mis padres Edwin Victor Mamani Luque y Delia Quiroz Apaza, mis hermanos Pamela Mamani Quiroz, Omar Edwin Mamani Quiroz y a mi esposo Brayan Cusi por su apoyo incondicional, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles que para mi fueron palabras de gran ayuda a no rendirme y culminar la tesis.

Al laboratorio de laboratorio de microbiología ambiental de la Universidad Peruana Unión-Filial Juliaca por facilitarnos el uso de los equipos y brindarnos sus instalaciones para el análisis de nuestras muestras, al ingeniero Glen Madrigal de la Universidad Peruana Unión por guiarnos y compartir sus conocimientos, también a nuestra asesora Veronika Haydee Pari Mamani por brindarnos su tiempo y apoyo en las correcciones de la investigación.

Vanessa Mamani Quiroz

Agradezco a Dios todo poderoso por ser el autor de mi vida y darme el valioso privilegio de entrar a esta carrera tan maravillosa de Ingeniería Ambiental, por permitirme llegar hasta este punto que es muy importante para mí, brindándome las herramientas necesarias para culminar con éxito mi trabajo de investigación y hacerme entender que los sueños si se hacen realidad cuando los deseas con todo el corazón. Asimismo, por haberme guiado desde siempre y ser mi fortaleza en los momentos más difíciles

Andy Oscar Sullca Flores

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	8
2. MATERIALES Y MÉTODOS	9
2.1. Estudio de caso	9
2.2. Sustrato e inóculo	9
2.3. Diseño y configuración experimental	10
3. RESULTADOS	11
3.1. Propiedades de lactosuero en las PPQ.....	11
3.2. Producción acumulada de biogás PPQ	12
3.3. Porcentaje de metano	13
4. DISCUSIÓN	16
5. CONCLUSIÓN	17
REFERENCIAS	18

Evaluación del potencial de biometanización del lactosuero de diferentes plantas productoras de queso de la región Puno-Perú

Vanessa Mamani-Quiroz¹, Andy Oscar Sulca-Flores¹, Veronika Haydee Pari-Mamani¹

1. Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, EP. Ingeniería Ambiental, Juliaca, Perú; veronika.pari@upeu.edu.pe, <https://orcid.org/0000-0002-3540-3913>.

RESUMEN

Introducción: El lactosuero es un residuo derivado del proceso de elaboración de queso. Debido a su composición química, tiene un alto contenido de materia orgánica. Si se deja ir al medio ambiente sin tratar, puede causar problemas medioambientales. Ante estas preocupaciones la digestión anaeróbica (DA), ha surgido como una de las tecnologías sostenibles más destacadas para tratar el lactosuero. **Objetivo:** El objetivo es evaluar el potencial de biometanización del lactosuero de cuatro plantas productoras de queso de la región Puno-Perú. **Metodología:** Se investigó 4 tipos de plantas productoras de queso (PPQ) de Ayaviri (PPQA), Lampa (PPQL), Huayrapata (PPQH) y Taraco (PPQT). Las pruebas experimentales se determinaron mediante el ensayo de potencial bioquímico de metano (PBM). Además, para la medición de las pruebas PBM se utilizó el método basado en la densidad del gas GD-BMP. **Resultados:** Los resultados revelaron que el mayor rendimiento acumulado de CH₄ fue PPQA, seguida por la PPQL, la PPQH y la PPQT, con valores de 371.3, 347.4, 319.5 y 4.00 mL CH₄/g SVadicionado, durante 46 días de digestión. Luego, la concentración de AGV de la PPQT se mantuvo en niveles elevados llegando hasta 6320 mg CH₃COOH/L, mientras que las otras muestras se mantuvieron en un rango recomendado de 620 a 1276 mg CH₃COOH/L. **Conclusión:** Se demostró que el PBM contribuye a la estabilidad del lactosuero en el proceso de DA, los resultados demuestran una buena producción metanogénica en las PPQA, PPQL y PPQH. Sin embargo, en la PPQT hubo inhibición en la DA.

Palabras clave: digestión anaerobia; sustrato lactosuero; producción de metano; ácidos grasos volátiles

Evaluation of the Biomethane Potential of Whey from Different Cheese-Making Plants in the Puno-Peru Region

ABSTRACT

Introduction: Whey is a waste product derived from the cheese-making process. Due to its chemical composition, it has a high content of organic matter. If released into the environment untreated, it can cause environmental problems. In response to these concerns, anaerobic digestion (AD) has emerged as one of the most prominent sustainable technologies for treating whey. **Objective:** The objective is to evaluate the potential for biogas production from whey from four cheese-producing plants in the Puno-Peru region. **Methodology:** Four types of cheese-producing plants (CPP) were investigated in Ayaviri (CPPA), Lampa (CPPL), Huayrapata (CPPH), and Taraco (CPPT). Experimental tests were determined by the biochemical methane potential (BMP). In addition, for the measurement of BMP tests, the gas density-based method GD-BMP was used. **Results:** The results revealed that the highest cumulative CH₄ yield was CPPA, followed by CPPL, CPPH, and CPPT, with values of 371.3, 347.4, 319.5, and 4.00 mL CH₄/g VS added, during 46 days of digestion. Then, the concentration of VFA of CPPT remained at elevated levels reaching up to 6320 mg CH₃COOH/L, while the other samples remained in a recommended range of 620 to 1276 mg CH₃COOH/L. **Conclusion:** It was demonstrated that BMP contributes to the stability of whey in the AD process, the results demonstrate good methanogenic production in CPPA, CPPL, and CPPH. However, there was inhibition in AD in CPPT.

Keywords: anaerobic digestion; whey substrate; methane production; volatile fatty acids

1. INTRODUCCIÓN

Los residuos de lactosuero tienen poco valor comercial para las plantas queseras. En el Perú se produjeron 1,9 millones de toneladas de leche fresca en el 2020, de las cuales el 46% se destinó a la producción de queso, generando 123,058 toneladas de queso (MIDAGRI, 2022). La Región Puno tuvo una producción de leche fresca de 131,756 toneladas, con un crecimiento anual de 3.6% en el 2020, en que el 80% de la producción de leche se concentra en las provincias de Puno, Azángaro, Huancané y Melgar. La producción de leche es 10 L/d por vaca, el 60% es destinado para la producción de queso (Olarte y Daza, 2013). La Región de Puno vertió cerca de 15192.54 toneladas de efluentes producto de la actividad quesera, generando olores, partículas de carbón (Flores Arizaca, 2020). Es importante tomar medidas para reducir los impactos ambientales de las empresas pequeñas y medianas (PYMES), donde no hay prácticas sostenibles en tratar el lactosuero en la Región Puno-Perú.

Según varios estudios realizados por Dareioti y Kornaros (2015); Escalante et al. (2018) y Riggio et al. (2015) la industria láctea produce efluentes que representan el 90% de la leche utilizada. Estos efluentes son altamente contaminantes, en virtud de su carga orgánica con niveles de 45-65 g/kg para sólidos volátiles (VS) y 68-94 g/L para demanda química de oxígeno (DQO). Para abordar este problema, se han desarrollado diferentes tratamientos alternativos, como la recuperación de compuestos valiosos como proteínas y lactosa; a través de tratamientos fisicoquímicos, aplicación de los efluentes como fertilizante, la valorización mediante tratamientos biológicos entre ellos tenemos la digestión anaerobia (DA) (Escalante et al. 2018).

La DA es un proceso orgánico que permite obtener energía a partir de residuos biodegradables (Cárdenas et al., 2016). Este proceso es llevado a cabo por microorganismos heterótrofos interdependientes y simbióticos que pueden utilizar diversos sustratos como fuente de alimentación (Gould, 2015; Li et al., 2015). Como resultado de la DA, se generan subproductos como el biogás y el digestato. El biogás está compuesto principalmente por CH_4 que puede ser utilizado para la combustión en hornos, calderas y otros sistemas de combustión de gas. Por otro lado, el digestato es la biomasa microbiana y materia orgánica resultante de la DA puede ser utilizado como abono y fertirriego, mejorando la calidad y productividad de los cultivos en la empresa (Alburquerque et al., 2012). Con el fin de utilizar un sustrato en el proceso de DA es necesario determinar su biodegradabilidad, para ello, se realizan pruebas a escala de laboratorio donde se destacó el ensayo de PBM, que se utiliza ampliamente en todo el mundo debido a su simplicidad, rapidez relativa y bajo costo (Cárdenas et al., 2016).

El PBM es una medida utilizada para evaluar el volumen de CH_4 generado por un sustrato después de su degradación (Hejnfelt y Angelidaki, 2009). El PBM se utiliza para determinar si un residuo es susceptible de degradarse de manera adecuada y proporciona resultados precisos en relación a la producción de CH_4 (Lesteur et al., 2010; Sánchez-Reyes et al., 2016). Además, el PBM ha demostrado ser un método fiable y relativamente simple para obtener resultados eficaces de conversión de un sustrato orgánico a CH_4 (Esposito et al., 2012), permitiendo un análisis rápido y eficiente.

En estudios previos, se evaluó el PBM del lactosuero. En el estudio de González et al. (2021) se evaluó la DA del lactosuero con lodo anaerobio de estiércol porcino como inóculo, pero se presentó inhibición, obteniendo solo 191 mL CH_4 /g Sv. En el estudio de Madrigal et al. (2022) se evaluó la optimización del aditivo biocarbón en el lactosuero, lo

que ayudó a la producción de metano y redujo la inhibición, obteniendo 358.4 mL CH₄/g SV. Estos resultados ayudarán a comprender la producción de CH₄ en diferentes situaciones y contrastar con los resultados obtenidos en la presente investigación.

Por consiguiente, el propósito de la investigación consiste en evaluar el potencial metanogénico de lactosuero de cuatro plantas productoras de queso (PPQ) ubicadas en Ayaviri, Taraco, Huayrapata y Lampa de la Región de Puno. Se utilizó el PBM como el indicador para estudiar la factibilidad de DA entre las PPQ como tratamiento alternativo de lactosuero.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Estudio de caso

Se estudiaron cuatro PPQ ubicadas en los distritos de Ayaviri, Huayrapata Taraco y Lampa (PPQA, PPQH, PPQT y PPQL, respectivamente) que pertenecen al departamento de Puno, Perú. Las cuatro PPQ utilizan al día 4500 L, 200L, 360L y 800 L de leche y la producción de queso es 450 kg, 30kg, 43kg y 104kg de quesos, respectivamente.

El proceso de producción de queso de las 4 PPQ sigue una serie de etapas similares: recepción de la materia prima, filtración, pasteurización, acondicionamiento, cuajado, corte, primer batido, primer desuerado, cocción, segundo desuerado, salado, pre prensado, moldeo y prensado. Sin embargo, se encontró algunas variaciones en ciertas etapas específicas. Por ejemplo, en la PPQA, se modifican la etapa de pre-prensado y se reemplaza por el prensado en su lugar. Así mismo, en la PPQT, han optado por realizar la pasteurización a vapor, mientras que las otras plantas utilizan el método de pasteurización a gas.

2.2. Sustrato e inóculo

sustrato (lactosuero) se obtuvo de cada una de las plantas mencionadas anteriormente: Las muestras de lactosuero se recogieron en botellas de vidrio de 2L, luego se transportaron al laboratorio de ingeniería ambiental de la Universidad Peruana Unión-Filial Juliaca, donde se almacenaron a -4°C, hasta la ejecución del análisis.

El inóculo utilizado fue lodo activado recolectado en un recipiente de 20 L, de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de San Jerónimos ubicado en Cusco, Perú. En seguida, se transportó al laboratorio de la UPeU donde se pre-incubó a 30°C durante 5 días para que desgasifique, luego se utilizó para las pruebas PBM.

La Tabla 1 muestra las características fisicoquímicas de los sustratos (4 PPQ) y el inóculo en términos de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), sólidos fijos SF, humedad (H), pH, ácidos grasos volátiles (AGV) y alcalinidad total (AT).

Tabla 1*Caracterizaciones fisicoquímicas del sustrato e inóculo*

Parámetros	Método	Unidad	Inóculo	Sustrato			
				Taraco	Lampa	Ayaviri	Huayrapata
ST	Gravimétrico	(g/kg)	42.55 ± 0.35	66.99 ± 0.46	67.79 ± 0.24	70.22 ± 0.09	57.2 ± 0.15
SV	Gravimétrico	(g/kg)	18.91 ± 0.14	61.16 ± 0.90	62.84 ± 0.24	64.92 ± 0.09	51.95 ± 0.65
SF	Gravimétrico	(g/kg)	23.64 ± 0.23	5.83 ± 0.56	4.95 ± 0.02	5.30 ± 0.05	5.25 ± 0.69
H	Gravimétrico	(%)	95.74 ± 0.04	93.30 ± 0.05	93.22 ± 0.02	92.98 ± 0.01	94.28 ± 0.02
pH	Potenciométrico	--	8.18 ± 0.02	6.6 ± 0.68	6.65 ± 0.06	6.41 ± 0.02	4.75 ± 0.04
AGV	Titulación	(mg / L)	956 ± 30.20	2516 ± 54.11	2040 ± 447.23	2960 ± 124.90	3324 ± 150.36
AT	Titulación	(mg CaCO ₃ /L)	2650 ± 194.68	1833.33 ± 143.64	1660 ± 277.85	2630 ± 104.40	2430 ± 1169.23
AGV/AT	Titulación	--	0.36 ± 0.04	1.38 ± 0.11	1.22 ± 0.08	1.13 ± 0.04	1.55 ± 0.59

Fuente: Elaboración propia

2.3. Diseño y configuración experimental

La metodología para la determinación de las pruebas PBM propuestas por Holliger et al. (2016) se desarrolló de la siguiente manera: Primero, los ensayos fueron desarrollados por triplicado en botellas de vidrio de 120ml (volumen de trabajo 60 mL). Segundo, se alimentaron los frascos reactores con el sustrato (lactosuero) e inóculo (lodos activados), a continuación, se sellaron con septos rubber bv y agafes de aluminio. Finalmente, para garantizar condiciones de anaerobiosis, el espacio de cabeza se llenó con gas nitrógeno durante 30 segundos y luego se incubó (estufa FD023UL-120V Binder, Tuttlingen, Alemania) a una temperatura de 35°C. La relación inóculo/sustrato en base a gSVinóculo /gSVsustrato fue 2 en todas las pruebas. Además, los biorreactores se agitaron manualmente 1 vez al día, antes de su medición para garantizar mayor contacto entre el sustrato y los microorganismos que actúan en la degradación.

La producción de biogás se monitoreo usando el método por densidad del gas GD-BMP, desarrollado por Justesen et al. (2019). Este método se basa en la medición del volumen de biogás liberado y la disminución de masa de la botella durante cada evento de muestreo. Estos cálculos se sustentan en la relación evidente entre la composición y la densidad del biogás, que se debe a la notable diferencia en la masa molar de CH₄ y CO₂.

2.4. Procedimiento de métodos analíticos

Los análisis de ST y SV se realizaron calentando las muestras en una estufa (FDO23UL-120 V BinderTuttlingen, Alemania) a una temperatura de 105 °C durante 24 horas, luego en mufla (Protherm, PLF 110/6) a 550 °C durante 1 h. Para las mediciones de pH, AGV y AT, las muestras se centrifugaron a 5000 rpm por 30 minutos. El sobrenadante obtenido se utilizó para los análisis correspondientes, las cuales fueron cuantificados mediante el método de titulación Justesen et al. (2019). La medición del pH se realizó con un potenciómetro (LAQUA 1200-S). Todos los análisis fueron desarrolladas al inicio y al final de las pruebas experimentales.

2.5. Análisis estadístico

Los resultados logrados en la ejecución del trabajo de investigación fueron analizados estadísticamente con el programa Microsoft Excel, también se realizó el análisis de varianza (ANOVA), el mismo que compara las medias de cada una de las muestras del experimento para verificar si existe diferencia estadística entre las mismas. Luego se realizó la diferencia existente entre la producción específica diaria de biogás en las diferentes muestras, empleando la prueba de tukey ($\alpha=0.05$).

3. RESULTADOS

3.1. Propiedades de lactosuero en las PPQ

En la Tabla 2 se muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica del lactosuero de las 4 PPQ ubicadas en la región de Puno, en términos de AGV/AT, AGV y pH.

Tabla 2

AGV/AT, AGV Y pH en la DA del lactosuero de cuatro PPQ

Parámetros		TARACO	LAMPA	AYAVIRI	HUAYRAPATA
AGV/AT	Inicio	0.41	0.31	0.44	0.49
	Final	1.12	0.20	0.21	0.20
AGV	Inicio	1144	834	1134	1276
	Final	6320	636	666	620
pH	Inicio	8.38	8.31	8.26	7.50
	Final	7.86	8.31	8.35	8.30

Fuente: Elaboración propia

En la DA, se destacan varios parámetros clave, entre ellos los resultados de AGV/AT, AGV y pH. Según Sicchieri et al (2022), para garantizar la estabilidad del proceso de DA, se requiere que el rango de AGV/AT sea inferior a 0.4 mg CH₃COOH/mg CaCO₃. De acuerdo con la investigación realizada por Zhou et al (2019), superar este rango puede tener efectos adversos en los microorganismos acidogénicos y metanogénicos. Además, otro parámetro importante es la concentración de AGV. De acuerdo con Charalambous et al. (2020) recomienda mantenerla por debajo de 2000 mg

CH₃COOH/L. Un aumento en la concentración de AGV podría afectar la comunidad metanogénica debido a una carga alta de materia orgánica.

Finalmente, el pH es importante en la DA al influir en el crecimiento y desarrollo de los microorganismos. Atasoy et al. (2020), menciona que, mantener un rango de pH entre 6.5 a 8.5 es fundamental para alcanzar un rendimiento óptimo de biogás en el proceso de DA. Es importante tener en cuenta que valores superiores a 9.5 o inferiores a 4, pueden afectar a la estabilidad del sistema.

Las concentraciones de AGV/AT en las PPQH, PPQL y PPQT al inicio fueron de 0.44, 0.49, 0.31 mg CH₃COOH/L CaCO₃, respectivamente. Al final del proceso fueron de 0.21, 0.20, 0.20 mg CH₃COOH/L CaCO₃, lo cual indica una condición estable en la DA (Sicchieri et al., 2022). No obstante, en la PPQT, se observó una condición estable al inicio del proceso, con un valor de 0.41 mg CH₃COOH/CaCO₃. Sin embargo, al final del proceso se registró un aumento significativo, alcanzando un rango de 1.12 mg CH₃COOH/L CaCO₃. Este incremento sugiere una posible inestabilidad en la muestra de PPQT (Zhou et al., 2019).

Las concentraciones de AGV en la PPQA, PPQH y PPQL al inicio fueron de 1134, 1276 y 834 mg CH₃COOH/L, respectivamente; y al final fueron de 666, 620 y 636 mg CH₃COOH/L. Esto se debe al crecimiento efectivo de las arqueas metanogénicas, posiblemente consumieron los ácidos para su posterior metabolismo en acetato y biogás (Charalambous et al., 2020).

Por otro lado, en la PPQT, se observa un incremento significativo en la concentración de AGV al final del proceso, alcanzando 6320 mg CH₃COOH/L. Este aumento indica un mal funcionamiento y una carga excesiva de materia orgánica que dificulta el crecimiento de las arqueas metanogénicas, resultando una disminución de metano y posteriormente la inhibición (Charalambous et al., 2020).

Los valores iniciales de pH en la PPQA, PPQH y PPQL fueron de 8.6, 7.50 y 8.31, respectivamente. Los valores finales se mantuvieron en 8.35, 8.30 y 8.31. Estos resultados sugieren, posiblemente, un pH óptimo que favorece el adecuado funcionamiento del proceso Yang et al. (2015). Sin embargo, en la PPQT, al final de la prueba, el valor de pH mostró una ligera disminución de 8.38 a 7.86. Esta reducción tal vez se deba a la alta concentración del AGV y al crecimiento de bacterias acetogénicas en las muestras de la PPQT (Atasoy et al., 2020). La degradación del ácido acético produce mayor cantidad de metano, lo cual podría ser una de las razones principales por las cuales la producción y concentración de CH₄ en la PPQA, PPQH y PPQL es más elevada que la PPQT. Además,

Cheah et al. (2019) y Slezak et al (2020) reportaron hallazgos similares, demostrando que la generación de ácido acético y propiónico es favorecida a un pH superior a 7. Por otro lado, la producción de ácido butírico es favorecida a un pH menor a 6.

3.2. Producción acumulada de biogás PPQ

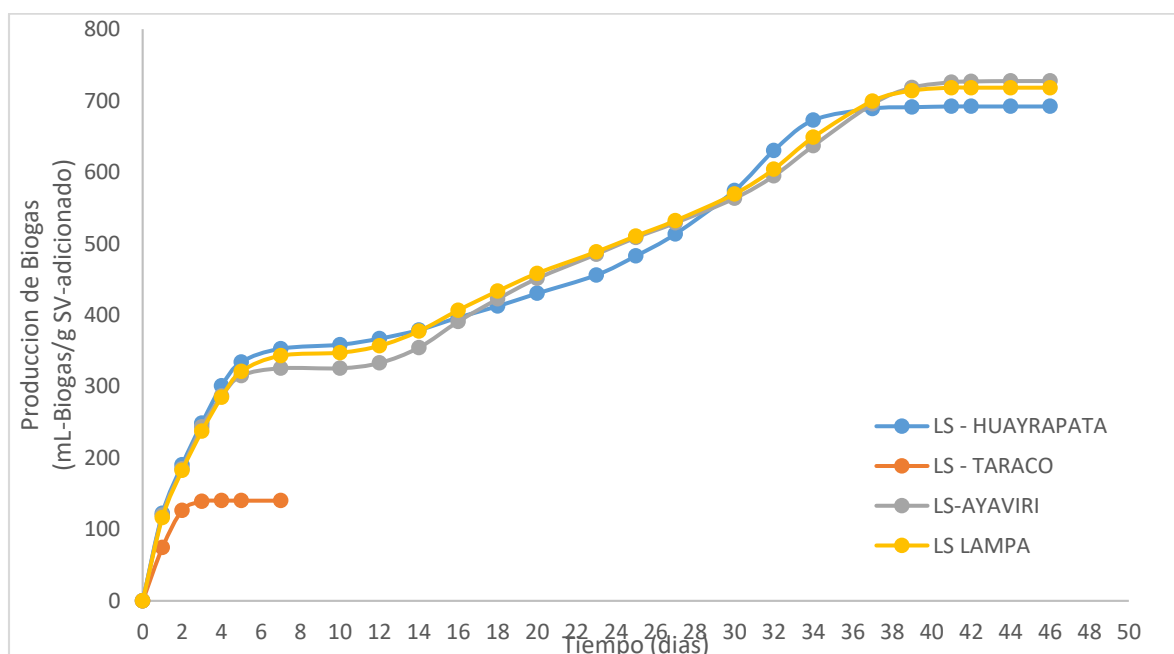
La Figura 1 muestra la producción acumulada de biogás, durante la DA, en los cuatro ensayos experimentales. Se aprecia que la producción de biogás en todas las muestras inició en el día 1, presentando un incremento progresivo a lo largo de los 4 días. A partir del día 4, el proceso aumentó de forma gradual durante todo el periodo. Este comportamiento se debe a los componentes biodegradables presentes en el lactosuero, como la lactosa, proteínas solubles y lípidos, los cuales desempeñaron una función esencial en la producción de biogás (Chatzipaschali y Stamatias, 2012). En total, las

PPQA, PPQL y PPQH lograron obtener producciones de biogás finales de 691.97, 727.54 y 718.02 mL-Biogás/g SV_{adicionado}, respectivamente, durante los 46 días de experimentación.

No obstante, se aprecia que la PPQT solo logró una producción de biogás durante 7 días, con un valor de 140 mL-Biogás/g SV_{adicionado}. Esto se debe por la alta y la rápida producción de AGV, que dificulta el crecimiento de las arqueas metanogénicas, lo que, consecuentemente, produce la inhibición del proceso y, por consiguiente, la reducción del rendimiento de biogás (Jiang et al. 2020) Además, Sánchez Reyes et al. (2015) menciona que cuando hay una concentración limitada de sustrato disponible durante la DA, la actividad metabólica de los microorganismos disminuye. En este caso, la acumulación de AGV impidió la actividad metanogénica y redujo la producción de biogás.

Figura 1

Producción acumulada de biogás durante 46 días



3.3. Porcentaje de metano

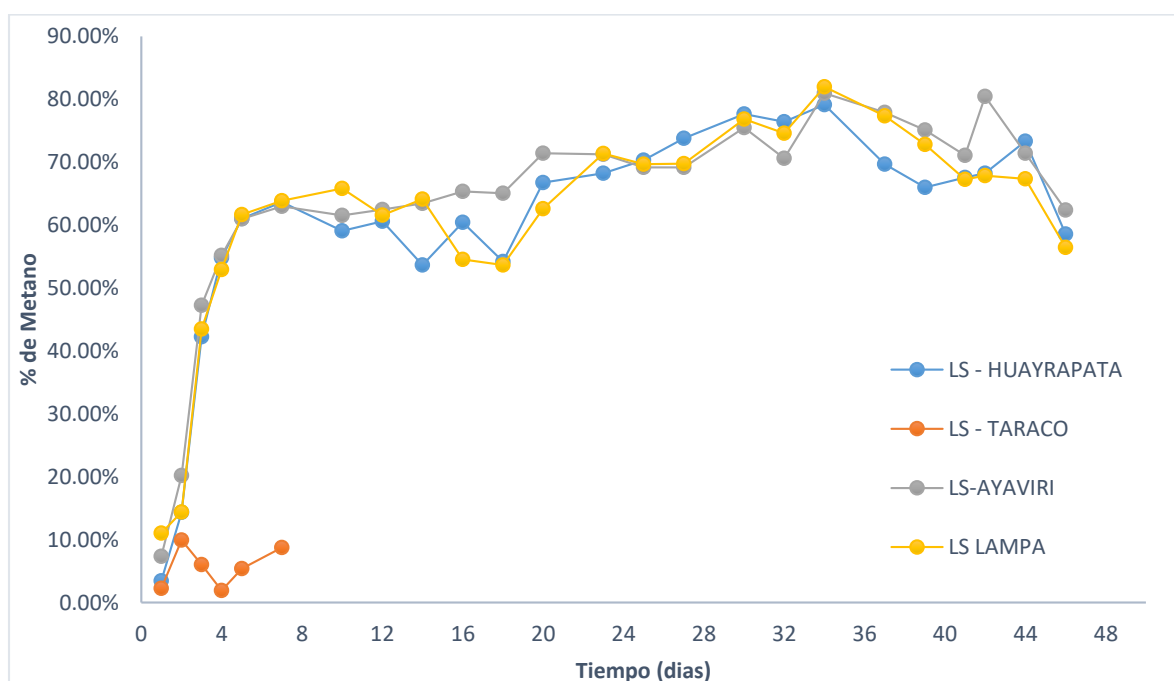
Los porcentajes de metano (CH₄) producidos en las diferentes PPQ se presentan en la Figura 2. Durante los primeros 6 días, el porcentaje de CH₄ de las plantas de PPQA, PPQL y PPQH, aumentó de 10 a 60 %. Este aumento en la producción metanogénica puede ser atribuida al trabajo efectivo de las arqueas metanogénicas que llegaron a consumir los microorganismos. Durante este periodo, específicamente la PPQT, se aprecia que la producción de metano solo se mantuvo constante durante 7 días. Esta limitación puede ser atribuida al exceso de acumulación del AGV, la cual excedió la capacidad reguladora del sistema y consecuente se inhibió la actividad.

Después del día 6 se observa un aumento ligero en los niveles CH₄ en la PPQL, PPQA y PPQH, logrando alcanzar valores de 81, 80 y 79% CH₄, respectivamente. A

partir de ese día, las muestras de la PPQA, PPQL y PPQH demostraron una tendencia a mantenerse en un rango que osciló entre 60 a 81 % CH₄, hasta la culminación del proceso. Esto se debe a que las bacterias acidogénicas, al metabolizar el sustrato altamente digestible, mostraron una rápida reproducción y liberaron grandes cantidades de microorganismos metanogénicos al medio, lo que generó que el porcentaje de metano se mantuviera. Acorde con Fernández et al. (2015), durante la DA de lactosuero se observó que a medida que los AGV se consumían, el porcentaje de metano experimentaba un aumento entre un 50 y 60% CH₄.

Figura 2

Gráfico contenido de metano durante las pruebas de DA de las cuatro PPQ



3.4. Producción acumulada y diaria de metano

Durante 46 días se evaluó la producción acumulada y diaria de metano en las cuatro PPQ. La PPQA tuvo mayor producción acumulada con un valor de 373.3 mL CH₄/gSV, seguida por la PPQL con 347.4 mL CH₄/gSV y, finalmente, la PPQH con 319.5 mL CH₄/gSV. Los resultados representan una diferencia en el potencial de metano entre los cuatro tipos de lactosuero, con una diferencia de 418.8%, 412.1% y 393.5%, respectivamente. Estos resultados indican una diferencia entre la PPQT y las tres PPQ.

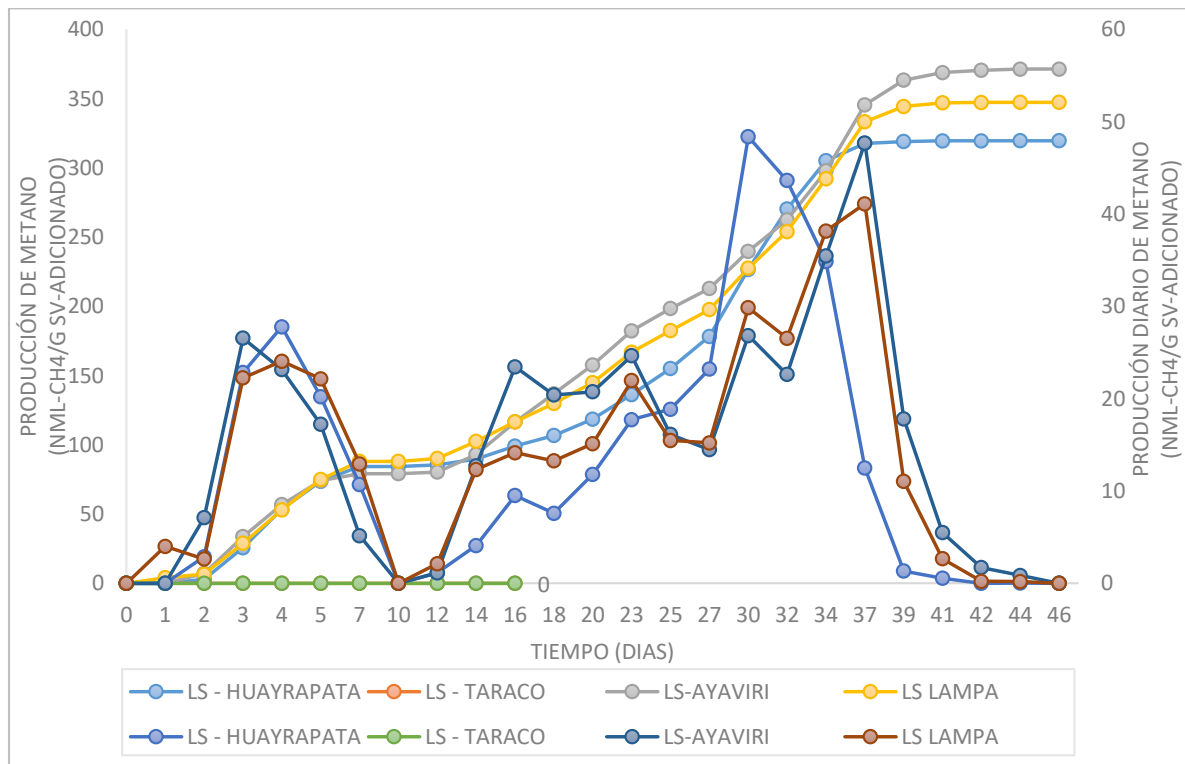
En la Figura 3 se muestra la producción diaria de metano y se pueden observar 2 picos de producción de biogás. Las muestras de PPQA, PPQL y PPQH, experimentaron niveles elevados durante los días 3 al 5. Este aumento inicial en la producción podría estar asociado con la capacidad de los microorganismos metanogénicos para digerir de manera eficiente las sustancias fácilmente biodegradables presentes en el lactosuero, como carbohidratos, lactosa y glucosa. Además, entre los días 7 al 14, se muestra una disminución en la producción de biogás. Esto pudo ser atribuido a que el AGV al superar la capacidad reguladora del lactosuero,

es posible que la actividad de los microorganismos responsables de la producción de metano disminuya gradualmente (Escalante Hernández et al. 2017).

El segundo pico ocurrió entre los días 30 al 41, en las muestras de PPQA, PPQL y PPQH, con valores de 48.37, 47.69 y 41.10 mL -CH₄/g SV_{adicionado}, respectivamente. Esto indica una recuperación y adaptación de los microorganismos, debido a la liberación de sustancias, como los lípidos de cadena larga, y que han comenzado a ser consumidos (Abdallah et al. 2022)

Figura 3

Producción acumulada de metano y producción de metano durante la DA



4. DISCUSIÓN

En relación al trabajo de investigación se identificaron diferencias significativas en la producción acumulada de metano entre los experimentos de la PPQA, PPQL PPQH y PPQT ($p < 0.05$). Lo cual indica que la capacidad del sustrato para descomponer biológicamente está relacionada con la disponibilidad de materia orgánica, lo cual determina la cantidad acumulada de metano. Además, los resultados son consistentes con otros estudios que informan valores similares de producción de metano a partir de lactosuero de 274 mL CH₄/g y 469,75 mL CH₄/g (Papirio et al. 2020; Escalante Hernández et al. 2017).

Los resultados obtenidos en este estudio revelaron que tanto la producción de biogás como el rendimiento de metano en las PPQA, PPQL y PPQH fueron favorables, debido a las características del lactosuero, el cual está compuesto principalmente por moléculas fácilmente biodegradables (Escalante et al. 2018). Estos resultados están en concordancia con lo expuesto por Kargi y Uzunçar. (2012), quienes afirman que el lactosuero es un sustrato con una gran cantidad de materia orgánica y es fácilmente biodegradable.

Sin embargo, es importante tener en cuenta las consideraciones planteadas por Brown et al. (2016), que menciona que el lactosuero tiene una mayor capacidad para producir metano, pero puede presentar una falla en la alcalinidad que puede causar problemas de acidificación durante el proceso de DA.

Esto se muestra en la PPQT, que tuvo una producción corta de 7 días, la acumulación de AGV excedió la capacidad reguladora, inhibiendo la DA. De acuerdo con, Madrigal et al. (2022), se observaron resultados coincidentes con nuestra investigación en relación a la DA del lactosuero. En el grupo de control (apenas lactosuero) se constató que la acumulación de AGV obstaculizó la actividad metanogénica y disminuyó la producción de metano. La prueba tuvo una corta duración de 11 días. Un reciente estudio realizado por Liakos et al. (2023) sobre la AGV encontró que hubo un exceso de AGV que inhibió la actividad microbiana en la relación entre suero y lodo activado. El estudio también encontró que la adición de hidrocarbón estabilizó el reactor. Por otro lado, Bella y Venkateswara Rao. (2022) indicaron que, durante la fase de hidrólisis del suero, la acumulación de AGV provocó una reducción del pH, lo que podría haber afectado negativamente el rendimiento de biogás.

El lactosuero es un subproducto de la PPQ que tiene un alto contenido de materia orgánica. Sin embargo, también puede limitar el proceso de DA debido a su alto contenido de proteína. En este sentido, la reducción del pH observada en el estudio no se atribuye exclusivamente a la acumulación de AGV, sino que probablemente esté relacionada con la alta concentración de NH₄⁺ (hidrólisis de proteína) (Costamagna et al., 2020). Bella y Venkateswara Rao (2022) mencionan que el lactosuero, a pesar de su alta biodegradabilidad, puede restringir el proceso de descomposición anaeróbica, debido a su elevado nivel de proteínas

En consecuencia, la baja alcalinidad del lactosuero provoca un aumento en los AGV, lo que acidifica el proceso anaeróbico y promueve la descomposición de la materia orgánica en el lactosuero, resultando una producción baja de biogás (Bułkowska et al., 2022).

Por lo tanto, los resultados de las pruebas de PBM realizadas en las PPQA, PPQL y PPQH demostraron una buena biodegradabilidad del lactosuero. Además, el biogás puede contribuir a reducir los costos de energía, cumplir con los requisitos ambientales y reducir la huella de carbono

5. CONCLUSIÓN

Se demostró que el potencial de biometanización del lactosuero de las cuatro plantas productoras de queso en la región de Puno, es significativo. Los valores obtenidos de la producción de biogás más resaltante fueron de la PPQL, con un valor de 727.54 mL-Biogás/g SV y con 66%. Los resultados obtenidos para las PPQH, PPQA y PPQL indican que el lactosuero tiene una alta capacidad de producción de biogás, lo que sugiere que su aprovechamiento puede ser una alternativa rentable y sostenible para la generación de energía renovable y la reducción de residuos en la región. Por otro lado, la PPQT manifiesta inhibición de la digestión anaeróbica, debido a fenómenos de sobrecarga del sistema. Se sugiere evaluar las principales fases de la DA (hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis) con más profundidad en futuros trabajos, para no solo intentar mejorar la digestibilidad de los sustratos, sino que también entender mejor el proceso de degradación. Además, se podrían explorar posibles soluciones o mejoras para optimizar el proceso y hacerlo más rentable.

REFERENCIAS

- Abdallah, M., Greige, S., Beyenal, H., Harb, M., & Wazne, M. (2022). Investigating microbial dynamics and potential advantages of anaerobic co-digestion of cheese whey and poultry slaughterhouse wastewaters. *Scientific Reports* 2022 12:1, 12(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14425-1>
- Alburquerque, J. A., de la Fuente, C., Ferrer-Costa, A., Carrasco, L., Cegarra, J., Abad, M., & Bernal, M. P. (2012). Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. *Biomass and Bioenergy*, 40, 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.02.018>
- Atasoy, M., Eyice, Ö., & Cetecioglu, Z. (2020). Volatile fatty acid production from semi-synthetic milk processing wastewater under alkali pH: The pearls and pitfalls of microbial culture. *Bioresource Technology*, 297, 122415. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.122415>
- Bella, K., & Venkateswara Rao, P. (2022). Anaerobic co-digestion of cheese whey and septage: Effect of substrate and inoculum on biogas production. *Journal of Environmental Management*, 308, 114581. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.114581>
- Brown, N., Güttler, J., & Shilton, A. (2016). Overcoming the challenges of full scale anaerobic co-digestion of casein whey. *Renewable Energy*, 96, 425–432. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.04.044>
- Bułkowska, K., Mikucka, W., & Pokój, T. (2022). Enhancement of biogas production from cattle manure using glycerine phase as a co-substrate in anaerobic digestion. *Fuel*, 317, 123456. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.123456>
- 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* *Perspectives of Biochemical Methane Potential - BMP test for control the anaerobic digestion process of wastes* *Perspectivas do t.* 29(1), 95–108. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18273/>
- Charalambous, P., Shin, J., Shin, S. G. y Vyrides, I. (2020). Anaerobic digestion of industrial dairy wastewater and cheese whey: Performance of internal circulation bioreactor and laboratory batch test at pH 5-6. *Renewable Energy*, 147, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.08.091>
- Chatzipaschali, A. A. y Stamatis, A. G. (2012). Biotechnological Utilization with a Focus on Anaerobic Treatment of Cheese Whey: Current Status and Prospects. *Energies* 2012, Vol. 5, Pages 3492-3525, 5(9), 3492–3525. <https://doi.org/10.3390/EN5093492>
- Cheah, Y. K., Vidal-Antich, C., Dosta, J. y Mata-Álvarez, J. (2019). Volatile fatty acid production from mesophilic acidogenic fermentation of organic fraction of municipal solid waste and food waste under acidic and alkaline pH. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(35), 35509–35522. <https://doi.org/10.1007/S11356-019-05394-6/FIGURES/7>
- Costamagna, P. Giordano, A., Lazzarini, Y., Delucchi, M. y Busca, G. (2020). Process of ammonia removal from anaerobic digestion and associated ammonium

- sulphate production: Pilot plant demonstration. *Journal of Environmental Management*, 259, 109841. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.109841>
- Dareioti, M. A., y Kornaros, M. (2015). Anaerobic mesophilic co-digestion of ensiled sorghum, cheese whey and liquid cow manure in a two-stage CSTR system: Effect of hydraulic retention time. *Bioresource Technology*, 175, 553–562. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.102>
- Escalante, H., Castro, L. Amaya, M. P. Jaimes, L. y Jaimes-Estévez, J. (2018a). Anaerobic digestion of cheese whey: Energetic and nutritional potential for the dairy sector in developing countries. *Waste Management*, 71, 711–718. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.026>
- Escalante, H., Castro, L. Amaya, M. P. Jaimes, L., y Jaimes-Estévez, J. (2018b). Anaerobic digestion of cheese whey: Energetic and nutritional potential for the dairy sector in developing countries. *Waste Management*, 71, 711–718. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2017.09.026>
- Escalante Hernández, H., Castro Molano, L. del P., Besson, V., y Jaimes Estévez, J. (2017). Feasibility of the anaerobic digestion of cheese whey in a Plug Flow Reactor (PFR). *Ingeniería, Investigación y Tecnología, ISSN 1405-7743, ISSN-e 2594-0732, Vol. 18, Nº. 3, 2017, 18(3), 4.* <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8353465&info=resumen&idioma=ENG>
- Esposito, G., Frunzo, L., Panico, A. y Pirozzi, F. (2012). Enhanced bio-methane production from co-digestion of different organic wastes. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 33(24), 2733–2740. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.676077>
- Fernández, C., Cuetos, M. J., Martínez, E. J. y Gómez, X. (2015). Thermophilic anaerobic digestion of cheese whey: Coupling H₂ and CH₄ production. *Biomass and Bioenergy*, 81, 55–62. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2015.05.024>
- Flores Arizaca, A. (2020). Estimación de efluentes líquidos producidos en el procesamiento de queso en la región Puno 2018. *Revista Científica I+D Aswan Science*. <https://doi.org/10.51392/rcidas.v1i1.3>
- González Herrera, J. E., Hernández Beltrán, Y., López González, L. M., & Jiménez Hernández, J. (2021). Digestión anaerobia de suero de queso utilizando inóculo de estiércol porcino a diferentes relaciones inóculo-sustrato. *Centro Azucar*, 48, No.3.
- Gould, M. C. (2015). Bioenergy and Anaerobic Digestion. *Bioenergy*, 297–317. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407909-0.00018-3>
- Hejnfelt, A., y 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., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., De Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J. C., De Lacroix, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... 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>

- Jiang, Q., Chen, Y., Yu, S., Zhu, R., Zhong, C., Zou, H., Gu, L., & He, Q. (2020). Effects of citrus peel biochar on anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge and its direct interspecies electron transfer pathway study. *Chemical Engineering Journal*, 398, 125643. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.125643>
- Justesen, C. G., Astals, S., Mortensen, J. R., Thorsen, R., Koch, K., Weinrich, S., Triolo, J. M., & Hafner, S. D. (2019). Development and Validation of a Low-Cost Gas Density Method for Measuring Biochemical Methane Potential (BMP). *Water* 2019, Vol. 11, Page 2431, 11(12), 2431. <https://doi.org/10.3390/W11122431>
- Kargi, F., & Uzunçar, S. (2012). Simultaneous hydrogen gas formation and COD removal from cheese whey wastewater by electrohydrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(16), 11656–11665. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2012.05.019>
- Lesteur, M., Bellon-Maurel, V., Gonzalez, C., Latrille, E., Roger, J. M., Junqua, G., & Steyer, J. P. (2010). Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review. *Process Biochemistry*, 45(4), 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2009.11.018>
- Li, Y. Y., Gadow, S., & Niu, Q. (2015). Biomass Energy Using Methane and Hydrogen from Waste Materials. *Topical Themes in Energy and Resources: A Cross-Disciplinary Education and Training Program for Environmental Leaders*, 1–270. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55309-0>
- Liakos, D., Altiparmaki, G., Kalampokidis, A., Lekkas, D. F., & Vakalis, S. (2023). The role of hydrochar on the production of biogas and volatile fatty acids during anaerobic digestion of cheese whey wastewater. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 35(May), 101153. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101153>
- Madrigal, G., Huaraya, M., Sancho, T., Mendieta, O., & Jaimes-Estévez, J. (2022). Biochar from bovine manure as a sustainable additive to improve the anaerobic digestion of cheese whey. *Bioresource Technology Reports*, 20, 101258. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2022.101258>
- MIDAGRI. (2022). *DS 0004-2022-MIDAGRI Modifica el reglamento de la leche y productos lacteos, D.S. 007-2017-MIDAGRI*. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO.
- Olarte, S., & Daza, C. U. (2013). Organic Milk Production on the Puno Region: An alternative of the Sustainable Development. *Mundo Agrario*, 13, 26.
- Papirio, S., Matassa, S., Pirozzi, F., & Esposito, G. (2020). Anaerobic Co-Digestion of Cheese Whey and Industrial Hemp Residues Opens New Perspectives for the Valorization of Agri-Food Waste. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 2820, 13(11), 2820. <https://doi.org/10.3390/EN13112820>
- Riggio, V. A., Comino, E., & Rosso, M. (2015). Above ground part of common reed to enhance anaerobic co-digestion of farm biomasses: Potential, monitoring and efficiency. *Ecological Engineering*, 79, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.015>
- 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>

- Sánchez Reyes, C., Patiño Iglesias, M. E., Alcántara Flores, J. L., Reyes Ortega, Y., Pérez Cruz, M. A., & Ortiz Muñoz, E. (2015). *DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM) DE RESIDUOS DE FRUTAS Y VERDURAS EN HOGARES*. 1–8.
- Sicchieri, I. M., de Quadros, T. C. F., Bortoloti, M. A., Fernandes, F., & Kuroda, E. K. (2022). Selection, composition, and validation of standard inoculum for anaerobic digestion assays. *Biomass and Bioenergy*, *164*, 106558. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2022.106558>
- Slezak, R., Grzelak, J. Krzystek, L. y Ledakowicz, S. (2020). Influence of initial pH on the production of volatile fatty acids and hydrogen during dark fermentation of kitchen waste. *Https://Doi.Org/10.1080/09593330.2020.1753818*, *42(27)*, 4269–4278. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1753818>
- Yang, L., Huang, Y., Zhao, M., Huang, H. Miao, H., Xu, Z., y Ruan, W. (2015). Enhancing biogas generation performance from food wastes by high-solids thermophilic anaerobic digestion. *Effect of PH Adjustment. International Biodeterioration y Biodegradation*, *105*, 153–159. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.09.005>
- Zhou, M., Yang, H., Zheng, D., Pu, X., Liu, Y., Wang, L., Zhang, Y., y Deng, L. (2019). Methanogenic activity and microbial communities characteristics in dry and wet anaerobic digestion sludges from swine manure. *Biochemical Engineering Journal*, *152*, 107390. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2019.107390>