

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



Una Institución Adventista

**Influencia de la relación inóculo-sustrato en el potencial bioquímico
de metano del residuo lactosuero**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Leonela Quispe Flores
Katia Doris Huanca Choquejahuá

Asesor:

Msc. Rose Adeline Callata Chura

Juliaca, julio de 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DE TESIS

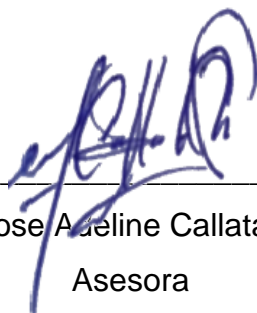
Rose Adeline Callata Chura, de la Facultad de Ingeniería Ambiental, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“INFLUENCIA DE LA RELACIÓN INÓCULO-SUSTRATO EN EL POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO DEL RESIDUO LACTOSUERO”** constituye la memoria que presenta los Bachilleres **Leonela Quispe Flores** y **Katia Doris Huanca Choquejahu** 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 la ciudad de Juliaca, a los 14 días del mes de noviembre del año 2022



Msc. Rose Adeline Callata Chura
Asesora



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiari, a 08 día(s) del mes de julio del año 2022, siendo las 14:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Ing. Enrique Mamani Suela, el secretario: Mtro. Juan Eduardo Aligo Rivera y los demás miembros: Dr. Efraim Lujano Laura y el asesor: Msc. Rose Adeline Gallata Chura

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: Influencia de la relación inóculo-sustrato en el potencial bioquímico de metano del residuo lactosuero

de el(los)/la(las) bachiller(es): a) Leonela Quispe Flores b) Katia Doris Huanca Ghoquejahua conducente a la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental (Nombre del Título Profesional)

con mención en

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(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 el(los)/la(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:

Candidato (a): Leonela Quispe Flores

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Líteral	Cualitativa	
Aprobado	16	B	Bueno	Muy Bueno

Candidato (b): Katia Doris Huanca Ghoquejahua

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Líteral	Cualitativa	
Aprobado	16	B	Bueno	Muy Bueno

(*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(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.

Presidente
Asesor

Secretario

Miembro

Miembro

Candidato/a (a)

Candidato/a (b)

Influencia de la relación inóculo-sustrato en el potencial bioquímico de metano del residuo lactosuero

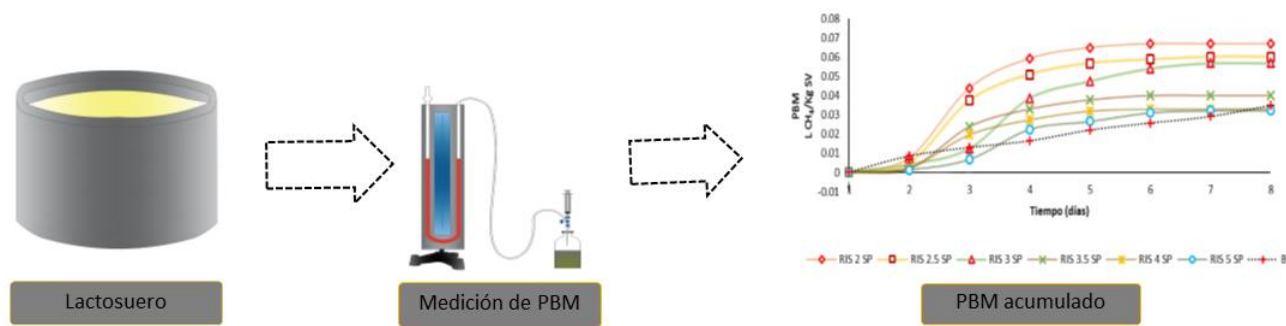
Influence of the inoculum-substrate ratio on the biochemical methane potential of the whey residue

Leonela Quispe Flores^{1*}, Katia Doris Huanca Choquejahuá², Rose Adeline Callata Chura³

^{1,2,3}Escuela profesional de Ingeniería Ambiental, Universidad Peruana Unión, Chullunquiani km 6, Juliaca, Perú

leonela.qf@upeu.edu.pe

GRAPHICAL ABSTRACT



RESUMEN

El lactosuero es uno de los residuos más característicos de la industria quesera por el alto contenido de materia orgánica, que puede ser utilizado como sustrato para la digestión anaerobia en la producción de metano. Así, el objetivo del artículo, es la evaluación de la influencia de la relación inóculo-sustrato (RIS) para el análisis del potencial bioquímico de metano (PBM) de residuo de lactosuero de una planta quesera de dos tipos de lactosuero salado y puro. La digestión anaerobia se realizó a condiciones mesofílicas de 35°C en reactores del tipo batch de 120 mL, por el método de densidad de gas a diferentes RIS (2, 2.5, 3, 3.5, 4 y 5) y su blanco, así mismo se extrajo el inóculo como consorcio bacteriano de una planta de tratamiento de aguas residuales. Los resultados mostraron que el máximo rendimiento de PBM se encontró en la RIS 2 con valores de 0.058 L CH₄/g SV y 0.066 L CH₄/g SV, además se utilizó el modelo de Gompertz modificado para el mejor ajuste experimental de la acumulación del biometano alcanzando el valor del coeficiente de determinación ajustado R^2_{aj} 99.999 y 99.918% para ambas muestras de lactosuero salado y puro, respectivamente. Esto se debe a la acción de los microorganismos, a mayor sustrato mejor es el comportamiento de la generación del biometano, siendo este una alternativa para el aprovechamiento energético.

Palabras clave: *Relación inóculo-sustrato, lactosuero, potencial bioquímico de metano.*

ABSTRACT

Whey is one of the most characteristic residues of the cheese industry due to its high organic matter content, that can be used as substrate for anaerobic digestion of methane production. The objective of the study is the evaluation of the influence of various inoculum to substrate (I/S) on the analysis of biochemical methane potential (BMP) produced by whey residue of a cheese processing plant with two types of whey: salted and pure whey. Anaerobic digestion was performed at mesophilic conditions of 35°C in batch reactors (120 mL), by the gas density method at different RIS (2, 2.5, 3, 3.5, 4 and 5) and its blank, also the inoculum of a bacterial consortium was also extracted from the wastewater treatment plant. The results then showed that the maximum PBM yield was found in I/S 2 with values of 0.058 L CH₄/g SV and 0.066 L CH₄/g SV, also the modified Gompertz model for the best experimental fit of biomethane accumulation was used, obtaining the adjusted coefficient determination value R²aj 99.999 and 99.918% for both samples of salted and pure whey, correspondingly. This is explained because of the action of microorganisms, the more substrate, better is the behavior of biomethane generation, being this an alternative for the energetic utilization.

Key words: *Inoculum to substrate, whey, biochemical methane potential.*

1. INTRODUCCIÓN

En Latinoamérica la producción de leche es de 81.3 millones de toneladas (FEPALE, 2019) y según la OCDE/FAO (2015) a nivel mundial la producción de leche incrementará a 175 millones de toneladas al 2024. En el Perú, la producción de leche es de 2 135 881 toneladas por año (MIDAGRI, 2020) y el departamento de Puno produce leche mayor a los 200,000 litros diarios, más del 80% de la producción se ubica en las provincias de Melgar, Azángaro, Puno y Huancané (MINAGRI, 2019). Por consiguiente, la producción de lactosuero es mayor en estas provincias. El vertimiento incontrolado del lactosuero puede ocasionar problemas de contaminación al ambiente, debido a la alta concentración de nutrientes que favorecen el crecimiento de bacterias (Macedo et al., 2018; Tribst et al., 2020), así mismo, altera la estructura del suelo (Araujo et al., 2013). El lactosuero puro se utiliza para la alimentación de los animales, mientras que el lactosuero salado se vierte al río o al suelo (Bansal & Bhandari, 2016).

La leche está constituida un 90% de agua (Kavacik & Topaloglu, 2010). Por lo cual, la elaboración del queso concentra la caseína y grasa por coagulación, que forma un gel que se corta y desprende el lactosuero (Trujillo & Zapana, 2020). Que contiene proteínas y minerales (Giroux et al., 2018), además, tiene un elevado contenido en materia orgánica (Fernández et al., 2016) y existe dos tipos de lactosuero; el suero puro tiene un pH 5.2 – 6.7 y el suero salado mantiene un pH <5.0, por ello, se diferencian debido a la acción de bacterias ácido lácticas, ya que, son similares en, proteínas, lactosa, cenizas y minerales (Lievore et al., 2015; Giroux et al., 2018). Por estas características, se requiere de tratamiento anaerobio para este tipo de efluente residual (Rico et al., 2015).

El proceso de digestión anaerobia (DA) es una tecnología ideal para el tratamiento del lactosuero, por la acción de diferentes poblaciones bacterianas que genera metano y dióxido de carbono (Capcha, 2014), desarrollando el proceso en 4 etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis (Fernández et al., 2016). El proceso de DA se desarrolla en dos partes; primero los productores de ácidos grasos volátiles (AGV) (hidrólisis y acidogénesis) involucran la mayor parte de la diversidad microbiana, y el segundo está compuesto por los consumidores de AGV (acetogénesis y metanogénesis) (Liu, 1997), que generan hidrógeno y la metanogénesis transforman compuestos simples como en metano (CH₄), dióxido

de carbono (CO₂) (Jonge et al., 2020; Ali shah et al., 2017). Una de las maneras de evaluar la digestión anaerobia es mediante pruebas de potencial bioquímico de metano (PBM), utilizando 4 métodos: volumétrico, cromatografía de gases, manométrico y densidad de gas (Cárdenas et al., 2016). Y según indica Lesteur et al., (2010) cada sustrato tiene una relación inóculo-sustrato óptimo, teniendo en cuenta que, la relación inóculo-sustrato es una forma de evaluar la capacidad del residuo lactosuero.

La relación inóculo-sustrato es un factor que influye en el ensayo de PBM, que se expresa en función del contenido de los sólidos volátiles (SV) del inóculo y sustrato, Raposo et al., (2009) realizó estudio de aceite de girasol a una RIS de 3, 2, 1.5, 1, 0.8 y 0.5, obtuvo resultados de 0.38 y 0.44 mL/g en la RIS de 1 y 2, así mismo (Thanarasu et al., 2019) evaluó la biomasa lignocelulosa a RIS de (2.5 y 5) el mayor rendimiento metano fue 587,3 mL/g en la RIS de 2.5, Mahat et al., (2020) desarrollo su estudio de aguas residuales de procesamiento de alimentos con alto contenido de aceite y grasa a una RIS de (1, 1.5 y 2) la producción máxima de biogás fue 228.6 mL/g a una RIS de 1 como el más óptimo, ya que también tuvo una alta remoción en parámetros (DQO y DBO). Estudios realizados de la digestión anaerobia del residuo lactosuero, obtuvieron valores de 400 y 200 mL de metano del lactosuero a RIS de (2 y 4) por sus condiciones de estabilidad AGV/AT (Barrena et al., 2017). Guerrero et al, (2016), menciona que el lactosuero salado y puro, obtuvo una producción de metano promedio de 300 y 430 L CH₄/Kg por día, respectivamente a una RIS de 2 que fue óptimo. Jaimes et al., (2020) desarrollo el estudio de lactosuero, en la RIS de 2 alcanzó una producción de 300 y 590 L CH₄/Kg SV a una temperatura de 35 °C, mostrando como la mejor relación a diferencia de las demás RIS que evaluó.

El objetivo del estudio fue evaluar la influencia de la relación inóculo-sustrato en el potencial bioquímico de metano (PBM) del residuo lactosuero en condiciones mesofílicas. Se desarrolló de dos tipos de lactosuero salado y puro, a diferentes RIS (2, 2.5, 3, 3.5, 4 y 5) y su blanco, así mismo el proceso de DA se modeló en la ecuación modificada de Gompertz. Los datos obtenidos ayudaran a los investigadores aplicar la proporción adecuada (relación inóculo-sustrato) en su investigación de potencial bioquímico de metano, también a la población en la producción de biogás.

2. METODOLOGÍA

2.1. Sustrato e inóculo

Se utilizó dos tipos de sustrato de lactosuero salado y puro que se recolectó de una planta quesera de la provincia de Melgar, Puno, Perú. Las muestras de lactosuero se trasladaron en envases de 1 litro a refrigeración de 4 °C. Asimismo, el inóculo se extrajo del reactor anaerobio de la planta de tratamiento de aguas residuales de Cusco, que se almacenó a 30 °C por 7 días antes de su aplicación (Holliger et al., 2016). La tabla 1 muestra la caracterización del inóculo y el sustrato en términos de SV, AGV, AT, DQO y pH para la determinación del PBM.

Tabla 1.

Caracterización fisicoquímica del sustrato lactosuero e inóculo

Parámetros	LS. P	LS. S	Inóculo	Unidades
SV	53.70 ±0.9	29.75 ±0.2	16.35 ±1.2	g/kg
AGV	2600 ±34.6	1900 ±34.6	2060 ±69.3	mg/L
AT	2083 ±28.9	1517 ±57.7	3717 ±115.5	mg/L
DQO	1044.75 ±14.16	607.25 ±23.2	1020.58 ±22.5	mg/L
pH	6.62 ±0.1	6.4 ±0.1	7.6 ±0.1	--

*LS.P: Lactosuero puro

**LS.S: Lactosuero salado

2.2. Relación inóculo-sustrato

Los ensayos experimentales se desarrollaron en reactores tipo batch a diferentes relaciones de inóculo sustrato (RIS) de 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5 y su respectivo blanco se incubo a condiciones mesófilas de 35°C y estable. Se expresa en función del contenido de los sólidos volátiles del inóculo 17 g/kg y de ambos sustratos (A. Parra et al., 2015), como es; lactosuero puro 53.70 g/kg SV y lactosuero salado 29.75 g/kg SV valores que se obtuvieron en la caracterización del sustrato e inóculo, así mismo, muestra el volumen que contiene el reactor, de acuerdo a cada RIS de (2, 2.5, 3, 3.5, 4 , 5), y su respectivo blanco, a condiciones mesofílicas 35 °C.

Tabla 2.

Montaje de los reactores batch

Reactores batch	Volumen		
	LS. P (g SV/kg)	LS. S (g SV/kg)	Ratios (%)
2	9.50	17.14	50:50
2.5	7.60	13.71	60:40
3	6.33	11.43	67:33
3.5	5.43	9.80	71:29
4	4.75	8.57	75:25
5	3.80	6.86	80:20

2.3. Determinación del potencial bioquímico de metano

Los ensayos de potencial bioquímico de metano (PBM) se desarrolló de acuerdo al protocolo establecido por Holliger et al., (2016), en reactores tipo batch (botellas de vidrio) de 120 mL con volumen de trabajo de 60 mL, asimismo, a cada tratamiento se gaseó con gas nitrógeno ultra puro por 30 segundos incluyendo al blanco, seguidamente se cerró con septos rubber bv y se selló con agafes de aluminio. Todas las muestras se trabajaron por triplicado.

El metano producido se cuantificó a diario mediante el método de densidad de gas (GD-PMB) desarrollado por Justesen et al, (2019), que expresa la generación de la producción de biogás, así para determinar ello se pesó la masa inicial del reactor, seguidamente se midió el volumen de biogás en un sistema compuesto de un manómetro con jeringa, finalmente se pesó la masa final del reactor. Por lo tanto, para el cálculo de volumen de biogás y concentración de metano en el biogás se aplicó la ecuación (1) donde M_{CO_2} es masa molar de CO_2 , M_b es masa molar de biogás, M_{CH_4} es masa molar de CH_4 .

$$X_{CH_4} = \frac{M_{CO_2} - M_b}{M_{CO_2} - M_{CH_4}} \quad (1)$$

2.4. Métodos analíticos

El sustrato y el inóculo se homogenizaron por 1 min en el equipo agitador magnético antes de desarrollar los ensayos experimentales, asimismo, se analizaron los siguientes parámetros antes y después de la producción metano para cada RIS: Sólidos Volátiles (SV), Sólidos Totales (ST), Demanda Química de Oxígeno (DQO) de acuerdo a los métodos estandarizados (American public health

association, 2017) potencial de hidrógeno (pH) mediante un potenciómetro de mesa, Ácidos Grasos Volátiles (AGV) y Alcalinidad Total (AT) se analizaron por el método titrimétrico.

2.5. Análisis estadístico

Se planteó el diseño factorial DCA 2*7, el primer factor es tipo de lactosuero, el segundo factor las RIS con 7 niveles con 3 tratamientos que vienen a ser repeticiones, siendo 39 unidades experimentales. Para el análisis estadístico se aplicó ANOVA, se utilizó Tukey para determinar la RIS óptima y la prueba T de student para el tipo de lactosuero con mejores condiciones, a un nivel de confianza de 95%, los datos se analizaron en el estadístico SPSS y el modelo de Gompertz se determinó en el software Statgraphics.

2.6. Modelo cinético

La cinética de generación de biogás se ajustó al modelo de Gompertz modificado, para el análisis de la producción de biogás en el proceso de digestión anaerobia según a cada RIS, asimismo, el modelo de Gompertz modificado es de un ajuste sigmoideal no lineal (Rodrigues et al., 2021) de mayor aplicación (Thanarasu et al., 2019) para una cinética de primer orden de proceso estacionario (ecuación 2), así, el coeficiente de determinación (r^2) se considera bueno cuando es cercano a 1.

$$B = B_o \cdot \exp \left\{ -\exp \left[\frac{R_{max} \cdot e}{B_o} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (2)$$

Donde B es producción de biogás (mL CH₄/g); B_o es la producción máxima del biogás (mL CH₄/g); R_{max} es la tasa de producción máxima de biogás (mL CH₄/g); λ es la fase de latencia (d); t es el tiempo de digestión (d); e es igual a 2.718 (B. A. Parra et al., 2019; Bedoi et al., 2020).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Potencial bioquímico de metano

En la figura 1 se observa los resultados de PBM acumulado por 8 días del lactosuero salado y puro, durante los primeros 4 días la producción de metano fue similar para toda las RIS, sin embargo, la RIS de 2 obtuvo la mayor producción con un valor de 0.058 y de 0.066 L CH₄/g SV, a medida que incrementa la cantidad del inóculo no muestra cambios significativos el lactosuero en el proceso de producción. Por ello indica que los primeros días hubo materia orgánica de fácil degradación. Jaimes et al., (2020) obtuvo entre 300 y 590 L CH₄/g SV, de acuerdo a Escalante et al., (2017) obtuvo 469.2 L CH₄/g diario, definitivamente muestra mejor rendimiento en su estudio con lactosuero, puede que su capacidad sea mejorada con tratamiento. El desequilibrio de la digestión anaerobia indujo a una hidrólisis vulnerable, por consiguiente, la reducción de la producción de metano en la etapa de metanogénesis. Existe diferencia significativa en las RIS siendo P<0.05 el ANOVA.

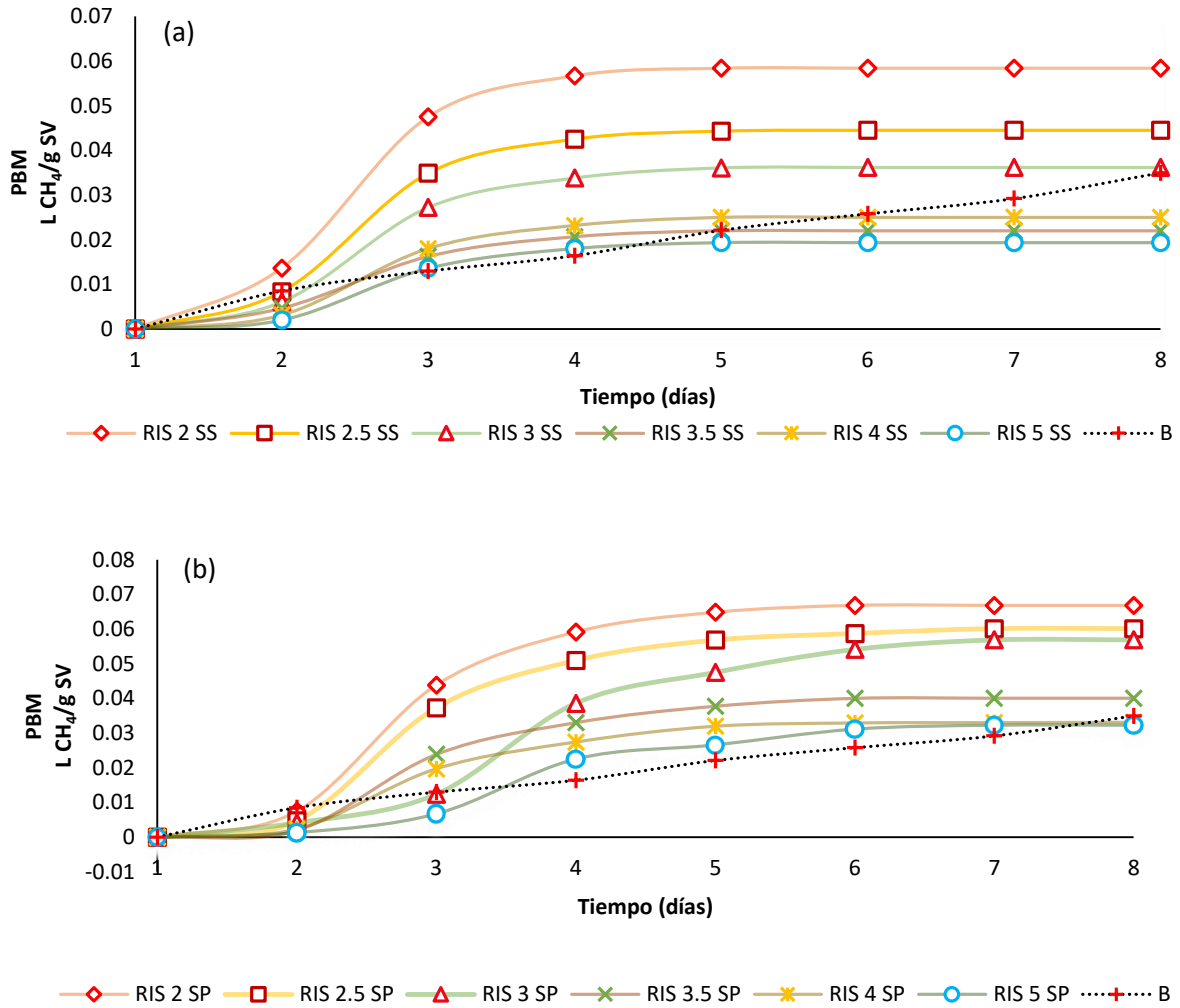


Figura 1: PBM acumulado del lactosuero salado y puro a diferentes RIS durante 8 días

3.2. Evaluación de parámetros

3.2.1. Sólidos Volátiles y sólidos totales.

En la tabla 3 muestran que el lactosuero es un sustrato con alto contenido de materia orgánica en forma de lactosa y proteínas, la degradación de las macromoléculas depende de la relación entre la tasa de crecimiento metabólico acidogénico y metanogénico (Yang et al., 2015). Así mismo, la concentración del SV disminuyó en ambos tipos de lactosuero, mostrando el mismo proceso de degradación en todas las RIS de ambos lactosueros. Así mismo son valores menores a 100 g/kg SV que evidencia el consumo de la materia orgánica por los microorganismos como indica Holliger et al., (2016).

Tabla 3.
Concentración de SV, ST de la producción de metano

Tratamiento	SV (g/kg)		ST (g/kg)	
	inicial	final	inicial	final
RIS 2 SS	15	9	36	29
RIS 2.5 SS	13	9	32	27
RIS 3 SS	14	9	31	25
RIS 3.5 SS	14	10	32	27
RIS 4 SS	13	11	29	28
RIS 5 SS	13	11	28	26
RIS 2 SP	16	11	27	21
RIS 2.5 SP	15	12	25	23
RIS 3 SP	16	12	27	22
RIS 3.5 SP	15	11	26	21
RIS 4 SP	13	11	23	22
RIS 5 SP	13	9	23	18

3.2.2. Potencial de Hidrógeno (pH).

De la figura 2 se observa el comportamiento del pH para ambos tipos de lactosuero, para los valores finales de pH, así se obtuvo el pH variado de 7.8-8.3 para el lactosuero salado, asimismo, se observó el rango de pH entre 7.6-7.8 para el lactosuero puro manteniéndose casi constante a los valores iniciales evidenciando así la acción de los microorganismos, así pues, el pH óptimo se encontró en un rango de 6.8-7.3 (Thanarasu et al., 2019) y 7-8 (Raposo et al., 2020).

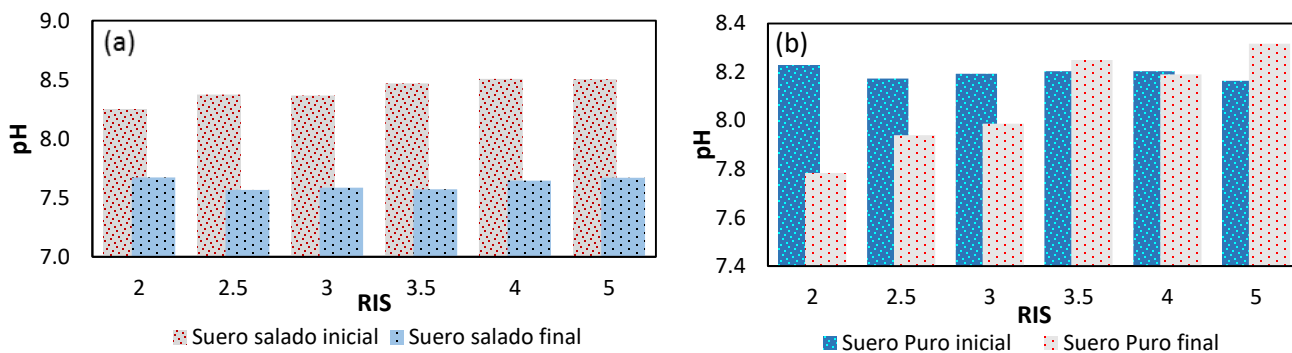


Figura 2: concentración de pH del lactosuero salado y puro en la producción de biogás

3.2.3. Ácidos grasos volátiles (AGV).

En la figura 3 se muestra el comportamiento del AGV en ambos lactosueros, la mayoría de las RIS del lactosuero salado, tienen un valor inicial de 1440 – 1820 mg/L, mientras que el lactosuero puro tiene un valor inicial de 1500 – 1960 mg/L, ya que el AGV al final se incrementó. En especial la RIS de 2 de ambos lactosueros que superaron los 5 000 mg/L lo cual indica como inhibitorio por Xu et al., (2014).

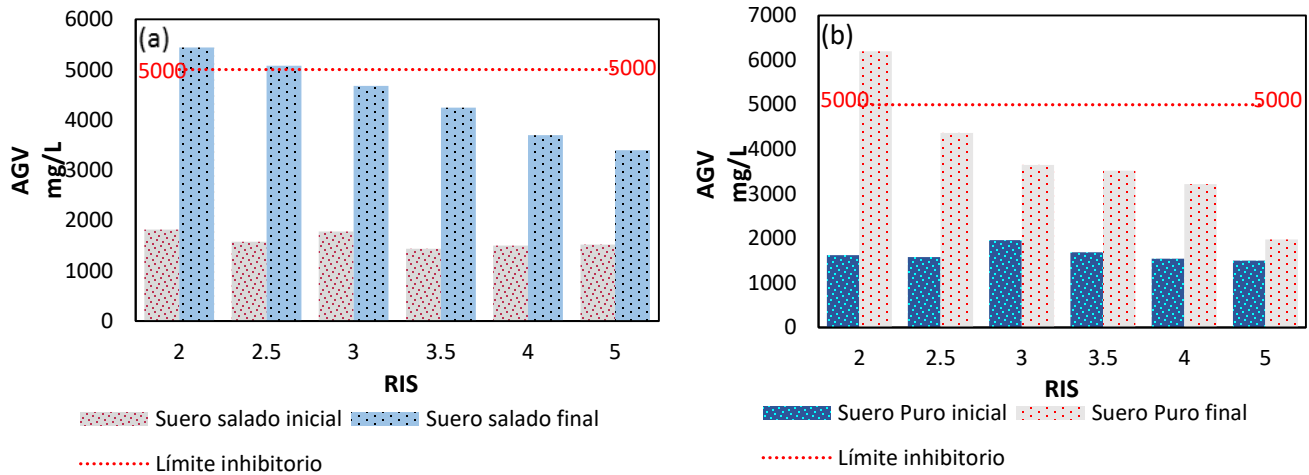


Figura 3: concentración de AGV del lactosuero salado y puro en la producción del

3.3. Estabilidad de la digestión anaerobia

De la Fig.4 se observa los resultados del AGV/AT del latosuero salado y puro, la estabilidad se da por medio de la capacidad amortiguadora (AGV/AT) y el pH. Todas las RIS de ambos lactosueros superaron los 0.4 mg/L que indica Kong et al.,(2016) tendio acidificarse debido a la alta concentración de AGV y la falta de AT, así mismo, Escalante et al., (2017) indica que el lactosuero es un sustrato ácido. Porque los microorganismos no se encuentran en condiciones óptimas, en particular el lactosuero ácido (Guerrero et al., 2016).

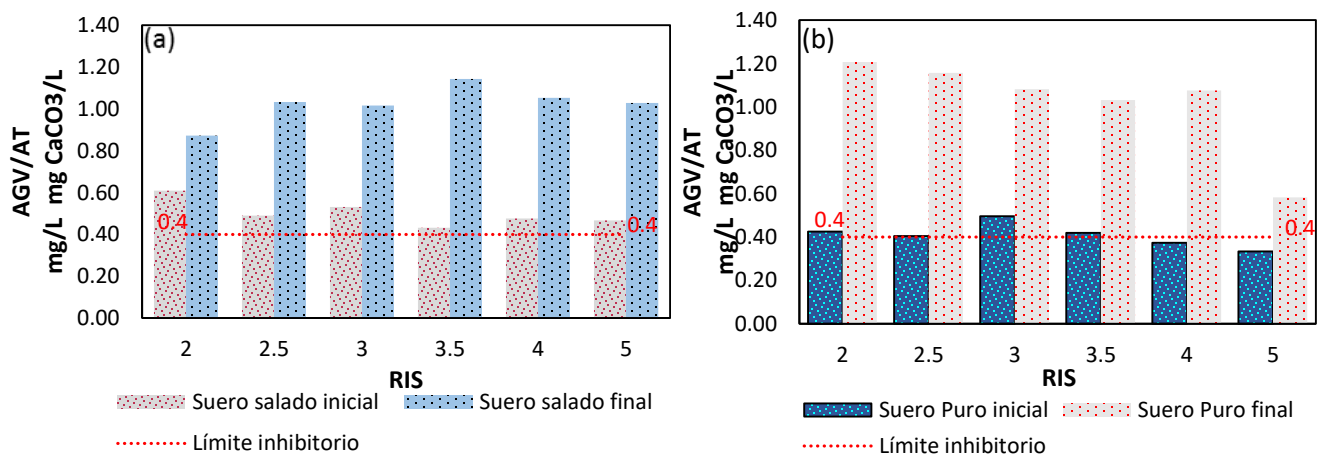


Figura 4: Concentración de la capacidad buffer del lactosuero salado y puro

3.4. Evaluación cinética

En la figura 5 muestra los resultados del modelamiento, empleando la ecuación de Gompertz modificado, para todas las RIS de ambos lactosueros, mostrando una gran similitud entre lo simulado con el modelo y los datos experimentales, lo cual indica que el valor alto de B_0 es 58.42 y 66.53 mL/g que se obtuvo de la RIS de 2 del lactosuero salado y puro con un coeficiente de determinación ajustado R^2_{aj} de 99.999 y 99.918 % respectivamente (véase tabla 4). El residuo lactosuero aumenta su fase de latencia λ cuando la RIS aumenta por corto periodo, lo que indica que existe alta biodisponibilidad de compuestos orgánicos dentro del sustrato (Meneses-Quelal et al., 2021). Este modelo predice con mucha exactitud el comportamiento en los reactores batch, además, representan la actividad de los microorganismos en la digestión anaerobia (Raposo et al., 2009), así mismo, predice que la producción de biogás es directamente proporcional a la tasa de crecimiento (Thanarasu et al., 2019).

Tabla 4.

Coefficientes del modelo cinético de Gompertz

RIS	Lactosuero salado				Lactosuero puro			
	B_0	Rmax	λ	R^2_{aj}	B_0	Rmax	λ	R^2_{aj}
2	58.41910	41.81996	1.678615	99.999	66.52635	38.49896	1.840550	99.918
2.5	44.44739	31.28576	1.745141	99.993	59.11678	33.29558	1.896699	99.750
3	36.10615	23.93167	1.762175	99.970	57.07552	23.66961	2.406141	99.440
3.5	22.04073	13.17552	1.657108	99.990	39.61968	21.79480	1.952733	99.590
4	24.96076	16.61967	1.845335	99.960	32.91381	17.47560	1.908302	99.750
5	19.33367	13.04837	1.897347	99.980	32.10810	14.68962	2.500779	99.450
Blanco	42.32840	5.362851	0.858060	97.860	42.32840	5.362851	0.858060	97.860

* R^2_{aj} : coeficiente de determinación ajustado %.

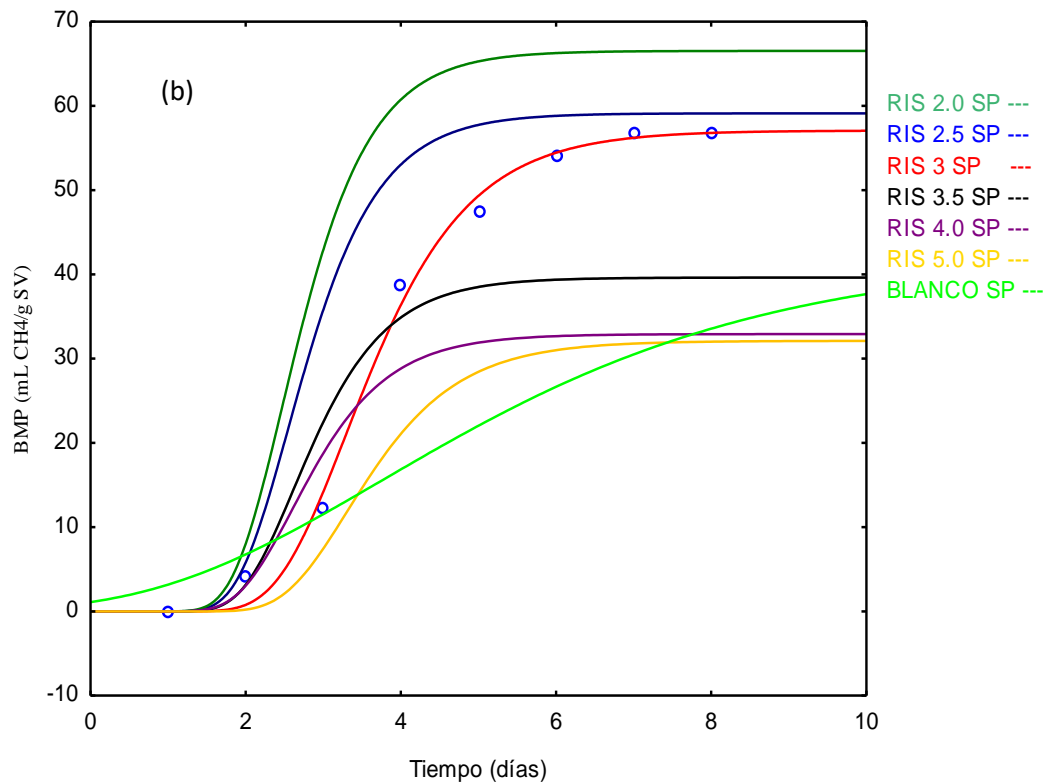
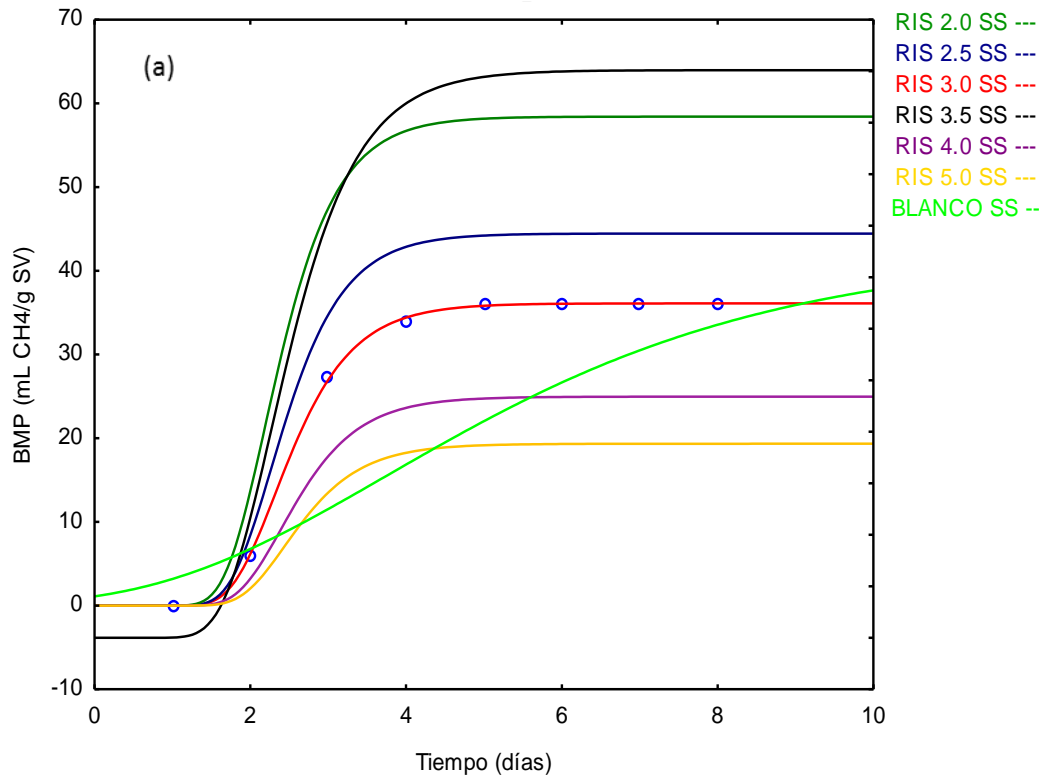


Figura 5: Modelo de Gompertz modificado a partir de los datos experimentales (a) lactoseruo salado y (b) lactoseruo puro

4. CONCLUSIONES

El lactosuero es un residuo líquido para la producción de biogás por medio de la digestión anaerobia, el PBM acumulado del lactosuero salado y puro de la RIS de 2 es 0.058 y 0.066 L CH₄/g SV siendo la mayor producción, es decir, la relación inóculo-sustrato si influye en ambos tipos de lactosuero. Los experimentos muestran que el lactosuero es un sustrato ácido que tendió inhibirse superando los 5000 mg/L de AGV, incluso la capacidad buffer AGV/AT excediendo los 0.4 que se acidificó evidenciando su inestabilidad en la DA. Por otra parte, el residuo de lactosuero es una alternativa para aprovechar como fuente de energía.

AGRADECIMIENTO

Se agradece al ingeniero Freddy Rodriguez por proporcionar inóculo de la PTAR, al señor Saúl Guerra por permitirnos ingresar a su planta quesera y al ingeniero Glen Madrigal por guiarnos en la parte experimental de la investigación.

REFERENCIAS

- Ali shah, F., Mahmood, Q., Maroof shah, N., Pervez, A., & Asad Ahmad, S. (2017). Retracted: Microbial Ecology of Anaerobic Digesters: The Key Players of Anaerobiosis. *The Scientific World Journal*, 2017, 3852369. <https://doi.org/10.1155/2017/3852369>
- American public health association, A. (2017). *Standard methods*.
- Araujo, Á., Monsalve, L., & Quintero, A. (2013). *A provechamiento del lactosuero como fuente de energía nutricional para minimizar el problema de contaminación ambiental*. 4, 55–66.
- Bansal, N., & Bhandari, B. (2016). Advanced dairy chemistry volume 1B: Proteins: Applied aspects: Fourth edition. *Advanced Dairy Chemistry: Volume 1B: Proteins: Applied Aspects: Fourth Edition*, 1–498. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2800-2>
- Barrena, M., Gamarra, O., Milla, M., Fellenberg, T., & Ordinola, C. (2017). Optimización de la producción de biogás a escala de laboratorio a partir de estiércol de bovino, lactosuero y totora (*Scirpus californicus*). *INDES Revista de Investigación Para El Desarrollo Sustentable*, 3(2), 60. <https://doi.org/10.25127/indes.201502.007>
- Bedoi, R., Spehar, A., Puljko, J., Cu, L., Cosi, B., & Puk, T. (2020). *Opportunities and challenges : Experimental and kinetic analysis of anaerobic co-digestion of food waste and rendering industry streams for biogas production*. 130(May). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109951>
- Capcha, L. (2014). *Evaluación de la macroalga ulva lactuca como aportante de nutrientes a un inóculo metanogénico en la producción de biogás y biol mediante digestión anaerobia de residuos orgánicos del comedor de la UNALM*. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Cárdenas, L. M., Parra, B. A., Torres, P., & Vásquez, 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. *Revista ION*, 29(1), 95–108. <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>

- Escalante, H., Castro, L. D. P., Besson, V., & Jaimes, J. (2017). Feasibility of the anaerobic digestion of cheese whey in a Plug Flow Reactor (PFR) under local conditions. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18(3), 264–277. <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2017.18n3.024>
- FEPALE. (2019). Situación de la cadena láctea en América Latina en el 2018. In *Federación Panamericana de Lechería*.
- Fernández, C., Martínez, E. J., Morán, A., & Gómez, X. (2016). Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno. Revisión bibliográfica. *Revista ION*, 29(1), 47–62. <https://doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016004>
- Giroux, H. J., Veillette, N., & Britten, M. (2018). Use of denatured whey protein in the production of artisanal cheeses from cow, goat and sheep milk. *Small Ruminant Research*, 161, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2018.02.006>
- Guerrero, W., Castilla, P., Gómez, C., & Castro, J. (2016). Degradación anaerobia de dos tipos de lactosuero en reactores UASB. *Tecnología-a Química*, 32(1), 90–106. <https://doi.org/10.1590/2224-6185.2012.1>
- 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>
- Jaimes, J., Castro, L. D. P., Rondón, Z., & Escalante, H. (2020). Metodología para la producción de biogás sin riesgos de inhibición en laboratorio: codigestión de lactosuero y estiércol bovino. *RedBioLac*.
- Jonge, N. De, Davidsson, Å., Jansen, C., & Lund, J. (2020). Characterisation of microbial communities for improved management of anaerobic digestion of food waste. *Waste Management*, 117, 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.047>
- Justesen, C., Astals, S., Mortensen, J., 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)*. 1–17.
- Kavacik, B., & Topaloglu, B. (2010). Biogas production from co-digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure. *Biomass and Bioenergy*, 34(9), 1321–1329. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.006>
- Kong, X., Wei, Y., Xu, S., Liu, J., Li, H., Liu, Y., & Yu, S. (2016). Inhibiting excessive acidification using zero-valent iron in anaerobic digestion of food waste at high organic load rates. *Bioresource Technology*, 211, 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.078>
- 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>
- Lievore, P., Simões, D. R. S., Silva, K. M., Drunkler, N. L., Barana, A. C., Nogueira, A., & Demiate, I. M. (2015). Chemical characterisation and application of acid whey in fermented milk. *Journal of Food Science and Technology*, 52(4), 2083–2092. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-1244-z>

- Liu, T. (1997). Phase separation during anaerobic fermentation of solid substrates in an innovative plug flow reactor. *Water Science and Technology*, 36.
- Macedo, A., Monteiro, J., & Duarte, E. (2018). A contribution for the valorisation of sheep and goat cheese whey through nanofiltration. *Membranes*, 8(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/membranes8040114>
- Mahat, S. B., Omar, R., Man, H. C., Idris, A. I. M., Kamal, S. M. M., Idris, A., & Anuar, N. K. (2020). Influence of substrate to inoculum ratio (S/i) on the treatment performance of food processing wastewater containing high oil and grease (o&g) in batch mode. *Desalination and Water Treatment*, 203, 267–278. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26231>
- Meneses-Quelal, W. O., Velázquez-Martí, B., Gaibor-Chávez, J., & Niño-Ruiz, Z. (2021). 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>
- MIDAGRI. (2020). Anuario estadístico: Producción ganadera y avícola 2020. In *Dirección General de Estadística, seguimiento y evaluación de políticas*.
- OCDE/FAO. (2015). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2015*.
- Parra, A., Torres, P., Marmolejo, F., Cárdenas, L. M., Vásquez, C., Torres, A., & Ordoñez, A. (2015). Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(4), 515–526. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.004>
- Parra, B. A., Vásquez, C., Torres, W. A., Marmolejo, L. F., & Torres, P. (2019). Efecto del pretratamiento térmico de residuos de alimentos sobre la producción de metano. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22(1), 1–10. <https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n1.2019.1220>
- Raposo, F., Borja, R., & Ibelli-bianco, C. (2020). Predictive regression models for biochemical methane potential tests of biomass samples : Pitfalls and challenges of laboratory measurements. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127(January), 109890. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109890>
- Raposo, F., Borja, R., Martín, M. A., Martín, A., de la Rubia, M. A., & Rincón, B. (2009). Influence of inoculum-substrate ratio on the anaerobic digestion of sunflower oil cake in batch mode: Process stability and kinetic evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 149(1–3), 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.10.001>
- Rico, C., Muñoz, N., & Luis, J. (2015). Bioresource Technology Anaerobic co-digestion of cheese whey and the screened liquid fraction of dairy manure in a single continuously stirred tank reactor process : Limits in co-substrate ratios and organic loading rate. *BIORESOURTE TECHNOLOGY*, 189, 327–333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.032>
- Rodrigues, C. V., Adames, L. V., Marques, R. F. C., Jacobus, A. P., Pires, L. O., & Maintinguer, S. I. (2021). Biosistemas integrados na codigestão do glicerol bruto em resíduos agroindustriais para a geração de H₂ e CH₄ Integrated biosystems in the co-digestion of crude glycerol in agro-industrial wastes for the H₂ and CH₄ generation. *Revista Matéria*, CV.
- Thanarasu, A., Periyasamy, K., Stanley, J. T., Devaraj, K., Periyaraman, P., Dhanasekaran, A., &

- Subramanian, S. (2019). Anaerobic Codigestion of Alkali-Pretreated *Prosopis juli flora* Biomass with Sewage Sludge for Biomethane Production [Research-article]. *Energy & Fuels*, 33, 7357–7365. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00836>
- Tribst, A. A. L., Falcade, L. T. P., Carvalho, N. S., Leite Júnior, B. R. de C., & Oliveira, M. M. de. (2020). Manufacture of a fermented dairy product using whey from sheep's milk cheese: An alternative to using the main by-product of sheep's milk cheese production in small farms. *International Dairy Journal*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104833>
- Trujillo, C., & Zapana, F. (2020). *Estudio del proceso de elaboración del queso fresco y madurado en la región Puno*. 1–303. [papers2://publication/uuid/45D7E632-B571-4218-9E47-8B4457FEA9D3](https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2020.104833)
- Xu, Z., Zhao, M., Miao, H., Huang, Z., Gao, S., & Ruan, W. (2014). In situ volatile fatty acids influence biogas generation from kitchen wastes by anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.04.037>
- Yang, G., Zhang, P., Zhang, G., Wang, Y., & Yang, A. (2015). Degradation properties of protein and carbohydrate during sludge anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 192, 126–130. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.076>