



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

POTENCIAL ENERGÉTICO DEL BIOGÁS DE LA CO-DIGESTIÓN DEL
SUERO LÁCTEO Y EL ESTIÉRCOL BOVINO.

Autora

Joselyn Fernanda Arias Chicaiza

Año
2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

POTENCIAL ENERGÉTICO DEL BIOGÁS DE LA CO-DIGESTIÓN DEL
SUERO LÁCTEO Y EL ESTIÉRCOL BOVINO

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniera Ambiental en Prevención y
Remediación.

Profesor Guía
M.Sc. Marco Vinicio Briceño León

Autora
Joselyn Fernanda Arias Chicaiza

Año
2019

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, Potencial energético del biogás de la co-digestión del suero lácteo y el estiércol bovino, a través de reuniones periódicas con la estudiante Joselyn Fernanda Arias Chicaiza, en el semestre 201910, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Marco Vinicio Briceño León

Master en Energías Renovables

CC: 1715967319

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, Potencial energético del biogás de la co-digestión del suero lácteo y el estiércol bovino, de la estudiante Joselyn Fernanda Arias Chicaiza, en el semestre 201910, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Santiago Daniel Piedra Burgos

Master of Science in Hydro Science and Engineering

CC: 1715384150

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

Joselyn Fernanda Arias Chicaiza

CC: 1723842892

AGRADECIMIENTOS

A Dios por bendecirme con unos padres maravillosos que, con su cariño, dedicación y esfuerzo, supieron guiarme y motivarme cada día. A mis docentes Marco Briceño, Santiago Piedra, Miguel Gualoto e Indira Black por haberme brindado sus conocimientos y guía durante el desarrollo del presente estudio. A todos aquellos que estuvieron presentes durante toda o la mayor parte de la realización y el desarrollo de la presente.

DEDICATORIA

Con todo el amor del mundo a mis padres Margarita y Fernando porque ellos han dado razón a mi vida, por su paciencia, sus consejos y su apoyo incondicional, quienes han sido y siempre serán mi mayor ejemplo y orgullo, todo lo que hoy soy es gracias a ellos. Igualmente, a las personas especiales en mi vida, quienes con sus consejos, cariño e influencia me motivaron a ejecutar con éxito mis objetivos personales.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación fue optimizar la producción de biogás a partir de suero de queso, ya que se investigó un producto energéticamente rico que puede contener más de 50 g de lactosa. Se usó un digestor anaeróbico por lotes a escala de laboratorio para investigar la idoneidad del suero de queso para la producción de biogás. Se generaron parámetros tecnológicos para el proceso de digestión anaerobia. El rendimiento de metano del suero de queso local se determinó y fluctuó $50 \text{ l}_N \cdot \text{kgSV}^{-1}$. Conclusión: la digestión anaerobia de suero de queso local en un digestor de lotes es aceptable, pero son necesarias algunas mejoras del equipo.

ABSTRACT

The aim of the present research work was to optimise biogas production from cheese whey as an energetically rich product that can contain more than 50 g lactose was investigated. A laboratory scale batch anaerobic digester was used to investigate suitability of cheese whey for biogas production. Technological parameters for anaerobic digestion process were generated. The methane yield of local cheese whey has been determined and fluctuated 50 l_n-kgSV⁻¹. Conclusion – anaerobic digestion of local cheese whey in a batch digester is acceptable, but some improvements of the equipment are necessary.

ÍNDICE

1. Capítulo I: Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Marco referencial.....	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo General.....	5
1.3.2. Objetivos específicos.....	5
1.4. Alcance	5
1.5. Justificación	5
2. Capítulo II: Marco Teórico.....	7
2.1. Industria Láctea Ecuador.....	7
2.1.1. Queso.....	9
2.1.2. Lacto suero.....	9
2.2. Digestión Anaerobia.....	11
2.2.1. Parámetros ambientales y operacionales	14
2.2.1.1. Naturaleza y composición de sustratos	14
2.2.1.2. pH y Alcalinidad	20
2.2.1.3. Temperatura	22
2.2.1.4. Sólidos Totales y Sólidos Volátiles.....	24

2.2.1.5.	Demanda química de oxígeno.....	25
2.2.1.6.	Tóxicos e inhibidores de metalogénesis.....	25
2.2.1.7.	Tamaño de las partículas.....	30
2.2.2.	Co-digestión anaerobia.....	30
2.3.	Biogás.....	31
2.3.1.	Composición del biogás.....	32
2.3.2.	Aplicaciones del biogás.....	33
2.4.	Biodigestores anaerobios.....	35
3.	Capítulo III: Metodología.....	38
3.1.	Caracterización de los sustratos de estudio.....	38
3.2.	Inóculo.....	40
3.3.	Reactores batch escala laboratorio.....	40
3.3.1.	Construcción.....	40
3.3.2.	Puesta en marcha.....	41
3.4.	Medición de Metano.....	46
4.	Capítulo IV: Resultados y Discusión.....	48
4.1.	Resultados.....	48
4.2.	Discusión.....	61
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	68

5.1. Conclusiones.....	68
5.2. Recomendaciones	68
REFERENCIAS	70
ANEXOS.....	85

1. Capítulo I: Introducción

1.1. Antecedentes

Durante décadas, la industria láctea ha representado una importante aportación económica. La producción total de leche a nivel mundial, para el año 2011, fue de 730.1 millones de toneladas métricas, de las cuales el 80% corresponden a la especie bovina. América Latina y el Caribe exportó 4,200 millones de litros de leche, e importó 7,000 millones de litros en el 2011, de tal manera que representa del 8 al 14% en el comercio mundial (FAO, 2012).

El consumo de lácteos ascendió en 2011 un 1,16% en relación con el 2010, teniendo un consumo de 103.3 a 104.5 litros de leche por persona y por año. Mostrándose una tasa de crecimiento en el rango de 2 a 4% acumulativo a nivel mundial.

Hoy en día el Ecuador genera 4'930.666 litros de leche diarios, del cual el 18% se usa en la elaboración de quesos, el 20% para autoconsumo, 8% productos artesanales y el 54% que corresponde a la industria láctea formal. La mayor productora de leche en Ecuador es la provincia de Pichincha que representa el 16,27% del total nacional, en la cual para el año 2017, tuvo un total de número de vacas en ordeño de 856.164, una producción de leche de 5'135.405 (INEC, 2017).

En Ecuador uno de los subproductos con mayor demanda después de la leche es el queso, su consumo per cápita se duplicó, siendo en el 2006 de 0.75 kg por persona a 1.57 kg al año en el 2014. Las ventas de la industria quesera se incrementaron 3.4 veces más entre el 2006 y el 2014, de \$ 71.4 millones a 243.1 millones de incremento durante este periodo. Siendo un aproximado de un tercio de la producción lechera del país que se dedica a la elaboración de distintos tipos de quesos.

La producción de quesos tanto industriales como artesanales da como subproducto, el suero de leche (Chanfrau, y otros, 2017), siendo este un

subproducto que durante muchos años se le ha considerado como desecho; pero actualmente se lo considera funcional por sus múltiples nutrientes y propiedades funcionales.

El suero de la leche es uno de los excedentes más representativos de la industria lechera. Es decir, para producir 1 kg de queso se necesita entre 9 y 10 lt de leche de vaca y por cada kilogramo de queso, se producen aproximadamente nueve litros de lacto suero (85-90% del volumen de la leche). A nivel mundial, Europa produce 75 millones de toneladas anuales de suero lácteo, América del Norte 27 millones y 8 millones en otras áreas del mundo, dando un total de 110 millones de toneladas anuales (Parra Huertas, 2009).

Pese a que actualmente gran parte del lacto suero generado es aprovechado para alimentación animal, así como también para materia prima en otros procesos industriales (lacto suero en polvo, separación de proteínas, aditivos para la industria alimentaria, etc.), aún persiste un elevado volumen que es manejado como excedente considerándose un componente adicional de las aguas residuales (Arango Bedoya y Sanches e Sousa, 2009). Aproximadamente el 47% del lacto suero producido a nivel mundial cada año, es vertido en los ríos, lagos, acuíferos o en el subsuelo produciendo un problema serio de contaminación (eutrofización acuática) (Badui Dergal, 2006). Esto genera una considerable pérdida de bienes, igualmente provoca problemas de polución debido a su alta demanda química de oxígeno (60-100 g/L).

Cuando a la comercialización del producto con cierto valor añadido, no le resulta posible alcanzar el umbral de rentabilidad (carencia de tecnología, sobreproducción, insuficiente demanda, etc.), la co-digestión anaerobia resulta ser una posibilidad significativa, debido a que posee potencial como recurso energético, a la vez que impide su vertido y sus consecuentes problemas de polución (Kavacik y Bahattin, 2010).

En Ecuador la utilidad más cotidiana que se le da al lacto suero, es como alimento para cerdos, sin embargo, determinadas industrias lo utilizan para fabricación de requesón, venta de suero ácido de leche, bebidas lácteas y

suplementos alimenticios (Pais Chanfau, y otros, 2017). Aunque, la industria láctea ha desarrollado distintos productos a partir del suero lácteo, se puede decir que muy poco del suero de leche a nivel nacional es aprovechado, como un ingreso para los ganaderos, o en algunos casos para pequeños empresarios. La mayoría del suero de leche en el Ecuador es desechado a cuerpos hídricos o usado negativamente en la adulteración de la leche (Prazeres, Carvalho, y Rivas, 2012).

El agua, siempre se ha considerado como un recurso esencial para la humanidad y el resto de seres vivos, debido a que constituye un componente imprescindible para el desarrollo de los procesos biológicos. La Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del agua, decreta que, toda industria que genere agua contaminada debe tener un tratamiento previo, de tal manera que cumpla con los parámetros determinados por la autoridad reguladora ambiental (Registro Oficial N° 305, 2014).

En Ecuador, la mayor parte de productores de queso son artesanales, por lo tanto, no generan ganancias significativas como para implementar un tratamiento previo a los desechos que genera la industria láctea. La producción artesanal de queso es abundante, debido a la distancia que existe entre comunidades, pésimas condiciones de accesibilidad y la ausencia de electricidad. Motivo por el cual, el acopio industrial es limitado, lo que exige a los pequeños y medianos productores a transformar la leche en queso, lo mismo que, genera una alta producción de suero e incrementa la vida útil de la leche (Castellón, 2016).

Con estos antecedentes se considera que desde el punto de vista social cultural y técnico, se tiene recursos valiosos para generar la óptima utilización del suero lácteo como fuente de energía renovable, y con la ventaja de poder usar para obtener energía térmica, electricidad, gas comprimido, etc.

El proceso de elaboración y tecnificación del suero lácteo generaría un sustento económico de gran valor, mediante la obtención de biogás, opción que generaría

combustible verde, para proporcionar energía parcial o totalmente a granjas o pequeñas comunidades cercanas que puedan verse favorecidas con el proyecto.

La elaboración de suero lácteo presenta un relevante alcance económico de transformación socio económica para los pueblos marginados del país, de manera que, explotar sus características al máximo es necesario en la industria alimenticia.

Por tanto, el presente estudio pretende demostrar la eficiencia del lacto suero como recurso energético, esto implicaría la reducción de uso de hidrocarburos (gas licuado de petróleo) en ciertos procesos de granjas pequeñas, orientado a resolver la problemática del país con respecto a estas industrias.

1.2. Marco referencial

La industria láctea nacional genera 11 millones de litros de suero por día como resultado de la elaboración de queso. De esta totalidad, se estima que seis millones de litros de suero son vertidos como parte del efluente industrial, provocando una elevada contaminación.

En el Ecuador, la industria láctea genera un alto porcentaje de litros de suero por día, por tanto la producción de queso es una de las fuentes de ingreso más importantes, y como subproducto de su proceso se obtiene el suero lácteo, esta materia prima adquiere potencial riqueza para la industria de derivados lácteos, como en la producción de yogurt, etc., pasando de un desecho a ser un co-producto, y otra parte se usa para la alimentación animal y un porcentaje se descarga al ecosistema.

Tomando en cuenta que la concentración de oxígeno disuelto es de 7 a 8 ppm para la mayoría de cuerpos de agua, se necesita todo el oxígeno presente en 6000 litros de agua para oxidar los sólidos de solo medio litro de leche entera. Igualmente se estima que la descarga a un curso de agua de 2,5 litros de suero por día tiene un poder contaminante equivalente al agua residual producida por un individuo. Es decir, que la manufactura de 1kg de queso ocasiona una contaminación semejante a la generada por cuatro personas (Petrenko, 2005).

Por lo tanto, si este recurso se usa eficientemente, se obtendrá un valor agregado por su uso energético, de tal manera existiría un mejor aprovechamiento socio cultural y económico del suero lácteo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Determinar la producción de metano por co-digestión del suero lácteo con estiércol bovino fresco

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los sustratos de estudio antes y después de la digestión anaerobia
- Determinar la relación estiércol-suero más eficiente para generar metano.
- Analizar la remoción de materia orgánica de los lodos al finalizar el proceso de digestión anaerobia

1.4. Alcance

El presente trabajo experimental se limitará a la evaluación de tres mezclas de suero lácteo: estiércol bajo una condición térmica, para determinar su capacidad de generar metano, a escala laboratorio, ejecutadas en la Universidad De Las Américas.

1.5. Justificación

Las empresas queseras del país están dispersas en diferentes zonas territoriales de la costa, sierra y oriente, no poseen instalaciones necesarias para procesar el suero dentro de sus empresas y darle un manejo comercial a este excedente, es costoso. Igualmente, por la lejanía de las comunidades, el mal estado del trayecto en algunas zonas y la carencia de servicio eléctrico, el acopio industrial es reducido, lo que obliga a los pequeños y medianos productores a convertir la

leche en queso, para un mayor tiempo de conservación, lo que genera una alta producción de suero en esa zona, el cual generaría ingresos extras a los productores. Su adecuado manejo, genera costos extra para el sector lechero, es así que explotar sus características al máximo es un enfoque estratégico, por el que podría optar la industria alimenticia.

Cabe recalcar que, el uso del suero lácteo se considera necesario debido a su alta demanda de oxígeno. Es decir, mil litros de suero tienen la carga contaminante de las aguas negras producidas en un día por cuatrocientas cincuenta personas. Dicha carga surge de la alta cantidad de oxígeno que los microorganismos consumen para degradarlo, de su poder impermeabilizante de los suelos, y de eutrofización en los cuerpos de agua (propicio crecimiento de algas) y de su toxicidad.

El presente proyecto de investigación pretende aprovechar eficientemente el uso del porcentaje de suero lácteo que se vierte al río, lo que implicaría evaluar su potencial para generar metano, dicho aprovechamiento implicaría la reducción del uso de hidrocarburos en ciertos procesos de granjas pequeñas, así como también su potencial contaminación. Cabe recalcar que la producción de biogás, a partir de la co-digestión del suero lácteo, es una excelente opción que podría generar combustible, capaz de alimentar parcial o totalmente a las fincas donde se da el suero de leche y en algunos casos a pequeñas comunidades que se beneficiarían de este proceso.

Según el INEC en el año 2013, la Industria Ecuatoriana comercializó más de 11 millones de suero lácteo ácido, como producto terminado, con un costo total de venta de más de 7 millones de dólares. Sin embargo, la comercialización de queso durante el mismo año fue de más de 14 millones de kilogramos cuya representación total fue de más de 85 millones de dólares (INEC, 2014). Si se toma en cuenta que por cada kilogramo de queso se generan en promedio 9 litros de suero lácteo (Parra Huertas, 2009), lo mismo que demuestra que a nivel nacional este subproducto se ha aprovechado un 1,8%.

Por medio de esta alternativa se puede moderar el impacto ambiental que ejerce el manejo inadecuado de este excedente que, debido a la escasez de presupuesto y poco conocimiento de su valor social y económico, podría ser eliminado a los cuerpos de agua. Así mismo, el impacto económico y social al ser una fuente de energía renovable es positivo para el medio ambiente.

2. Capítulo II: Marco Teórico

2.1. Industria Láctea Ecuador.

En el año 2017, la producción total de leche en todo el país fue de 5.14 millones de litros, distribuidos de la siguiente manera: la región Sierra proporcionó 3916 (miles de litros de leche), seguido de la Costa con 1010 (miles de litro de leche) y el Oriente con 208 (miles de litro de leche) que corresponden al 64.31%, 29.99% y 5.67%, respectivamente (*Ver Figura 1*). Con respecto a la media de litros de leche por vaca producidos, la región Sierra sobresalió con 7,11 litros/vaca. La región Oriental en el segundo lugar con 4,29 litros/vaca y la Costa con 3,93 litros/vaca. A nivel nacional, se evidenció que fue destinada en su mayoría a la comercialización (*Ver Figura 2*). Sin embargo, 963321 litros/día de leche a nivel nacional fue destinada para la elaboración de quesos, mantequilla, crema, yogur y otros productos lácteos con fines de autoconsumo y/o de venta en la Unidad de Producción Agropecuaria (UPA) (INEC, 2017).

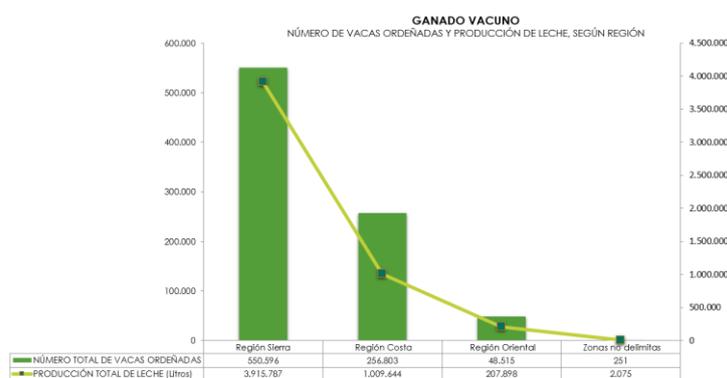


Figura 1 Número de vacas ordeñadas y producción de leche, según región.
Tomado de (INEC, 2017)

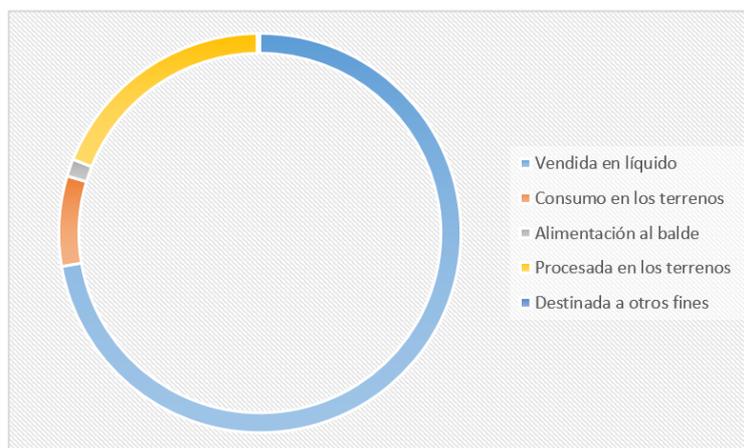


Figura 2 Destino de la producción de leche 2017.

Tomado de (INEC, 2017)

Dónde, según el INEC:

- *“Ventas” corresponde a la cantidad de leche puesta en venta como leche fresca o líquida.*
- *“Alimentación al balde” corresponde a la cantidad de leche usada para la alimentar los terneros (criados al balde).*
- *“Consumo en la UPA” corresponde a la cantidad de leche consumida en el hogar de la Persona Productora quienes aceptan la leche como parte de su salario o por regalo*
- *“Procesada en la UPA” corresponde a la cantidad de leche propuesta para la elaboración de quesos, mantequilla, crema, yogur y otros productos lácteos con fines de autoconsumo y/o de venta.*
- *“Otros” corresponde a cualquier otro destino que no corresponda litros vendida líquido, de consumo Unidad de Producción Agropecuaria (UPA), o de litros alimentación al balde, como, por ejemplo: leche desperdiciada y/o regalada a personas ajenas a la Unidad de Producción Agropecuaria (UPA).*

2.1.1. Queso

La elaboración de queso es una de las maneras más antiguas para conservar los principales nutrientes de la leche. Está compuesto de proteína, grasa, agua, sales minerales y otros elementos.

Este derivado de la leche puede ser fresco o maduro conseguido por medio de la coagulación de la leche, por añadir agentes coagulantes o cuajo, y eliminar el suero que se genera en el proceso de coagulación. Actualmente, existen diversos tipos de quesos en lo que corresponde a: apariencia, forma, tamaño, recubrimiento, tipo de leche usada, sistema de fabricación y almacenamiento. Las características de los quesos se encuentran determinadas por su forma, tamaño, peso, color y aspecto externo, así como también su composición la cual compete con: el porcentaje de grasa, sal, humedad, etc.

Cabe recalcar que, durante el proceso de elaboración de queso fresco y maduro se reconoce puntos críticos como: actividades de pasteurización (puesta en marcha y lavado de equipo); elaboración de la cuajada (descarga de suero), que corresponde con el mayor aporte contaminante de la industria, en un 30%; lavado de equipo después del uso (descarga de suero diluido) (Gil, Najul, y Pacheco, 2005).

2.1.2. Lacto suero

El lacto suero es el líquido que resulta de la precipitación y eliminación de la caseína de la leche durante la producción de queso. Este subproducto representa del 85 al 95% del volumen de leche y retiene el 55% de los nutrientes de la leche. Entre los más abundantes están: la lactosa (4,5-5% p / v), proteínas solubles (0,6-0,8% p / v), lípidos (0,4-0,5% p / v) y sales minerales (8-10% de extracto seco). Las sales de queso y suero de leche están compuestas por NaCl y KCl (más del 50%), sales de calcio (principalmente fosfato) y otros. El suero de queso también contiene cantidades apreciables de otros componentes, como los ácidos lácticos (0,05% p / v) y cítrico, compuestos nitrogenados no proteicos (urea y ácido úrico), vitaminas del grupo B, etc., (González, 1996).

La precipitación de la caseína genera dos tipos de lacto suero (Panesar, Kennedy, Gandhi, y Bunko, 2007):

- Lacto suero ácido: (pH = 5) se genera después de la fermentación o cuando se agrega ácidos orgánicos o minerales.
- Lacto suero dulce: (pH = 6) se genera cuando se agrega enzimas proteolíticos como la quimosina.

Tabla 1

Composición del Suero.

Componente	Suero Dulce	Suero Ácido
Agua	93 – 95	94 - 95
Materia seca	6.0 – 6.7	5.0 – 6.0
Lactosa	4.2 – 5	3.8 – 4.3
Grasa	0.1 – 0.5	0.1 – 0.5
pH	6.3 – 7	4.6 - 5

Tomado de (Gelegenis, Georgakakis, Angelidaki, y Mavris, 2007)

La concentración de lactosa y grasa son los principales responsables de la demanda química y bioquímica de oxígeno.

La eliminación del suero de queso es un problema continuo y creciente en la industria láctea. La elaboración de queso genera más de 145×10^6 toneladas de suero líquido por año, este subproducto no puede ser utilizado directamente como alimento para humanos o animales, sino que se desecha como desperdicio. Para hacer 1 kg de queso, se genera 9 kg de suero (Kosikowski, 1979). Alrededor de 115 millones de toneladas de suero líquido que contienen 6 millones de toneladas de lactosa se producen anualmente en todo el mundo (Parra Huertas, 2009).

Debido a su baja concentración de componentes de la leche (el suero es solo de 6-7% de materia seca), el suero se ha considerado comúnmente como un desperdicio. Aunque se han analizado varias posibilidades para la explotación de suero lácteo en los últimos 50 años, aproximadamente la mitad de la producción mundial de suero lácteo no se trata, se descarta como efluente. El

suero de queso tiene una alta carga orgánica (hasta 80 g/l de DQO) y una alta biodegradabilidad (Kalyuzhnyi, Perez Martinez, y Rodríguez Martínez, 1997), que causa un consumo excesivo de oxígeno, si se elimina directamente en cuerpos de agua. Dadas estas características requieren procesos de tratamiento biológico, el suero de queso necesita ser manejado como un efluente de desecho. Por lo tanto, las prácticas de eliminación del pasado, que incluyen el drenaje a las instalaciones de tratamiento de desechos o la fumigación en los campos, rara vez se practican actualmente (Rico, Muñoz, y Rico, 2015).

Se puede producir entre 9 y 23 m³ de metano/m³ de lacto suero, lo que equivale a de 7 a 18 kg de gas licuado de petróleo. El lacto suero puede ser degradado eficientemente en un proceso de una sola etapa cuando es combinado con residuos de bovinos (Barrena, Gamarra, Milla, Fellenberg, y Ordinola, 2017).

2.2. Digestión Anaerobia

La descomposición anaerobia, es un proceso biológico, en el cual la materia orgánica se degrada, en ausencia del oxígeno, generando biogás, con una alta composición de metano, lo mismo que consigue la eliminación de la carga orgánica (Pozuelo, Castells, y Ripoll, 2005). A través de este proceso, el carbono, hidrógeno y el azufre de desechos sólidos municipales, industriales, efluentes de la industria alimentaria, papelera, etc., se convierten en subproductos útiles. Entre estos se tiene: biocombustibles (hidrogeno, butanol y metano), electricidad de celdas de combustible microbiano, fertilizantes (biosólidos) y químicos útiles (azufre, ácidos orgánicos, etc.,) (Khanal S. , 2009) (FAO, 2011).

Además, presenta un enfoque sostenible, debido a que enlaza el tratamiento de residuos con la recuperación de subproductos útiles y biocombustibles renovables. La aplicación de estas tecnologías limpias podrían favorecer la disminución de la inseguridad energética e impedir la emisión de contaminantes tóxicos a la atmosfera (gases de efecto invernadero) (Khanal S. , Overview of Anaerobic Biotechnology, 2009).

La digestión anaeróbica se considera un proceso muy complejo, donde actúan un sin número de microorganismos, en distintas reacciones bioquímicas, estos organismos biológicos necesitan de condiciones ambientales y de operación adecuadas para su interacción con los sustratos de estudio (FAO, 2011).

El proceso de degradación de materia orgánica se divide por fases, las cuales se distinguen por los distintos grupos bacterianos que participan y los productos que generen (Pavlostathis y Giraldo Gómez, 1991).

El primer paso es la hidrólisis, donde, la materia orgánica polimérica (carbohidratos, lípidos y proteínas) son transformados en compuestos solubles, por enzimas extracelulares generados por microorganismos hidrolíticos. Dicha etapa depende principalmente del tamaño de las partículas, además de considerar importante la temperatura, tiempo de retención hidráulico, composición bioquímica del sustrato, pH, etc., (Hajji y Rhachi, 2013). Los compuestos solubles están constituidos por distintos tipos de azúcares, oligosacáridos, alcoholes, ácidos grasos y aminoácidos. Los carbohidratos se manifiestan como celulosa, polisacáridos y almidón. A causa del contenido de oxígeno en los carbohidratos, este se comporta como aceptor de electrones. De tal manera que, una porción del carbohidrato es oxidada como CO_2 y ácidos orgánicos. Mientras que los polisacáridos son hidrolizados por enzimas extracelulares, segregadas por bacterias, en monosacáridos como son: glucosa, fructuosa y manosa.

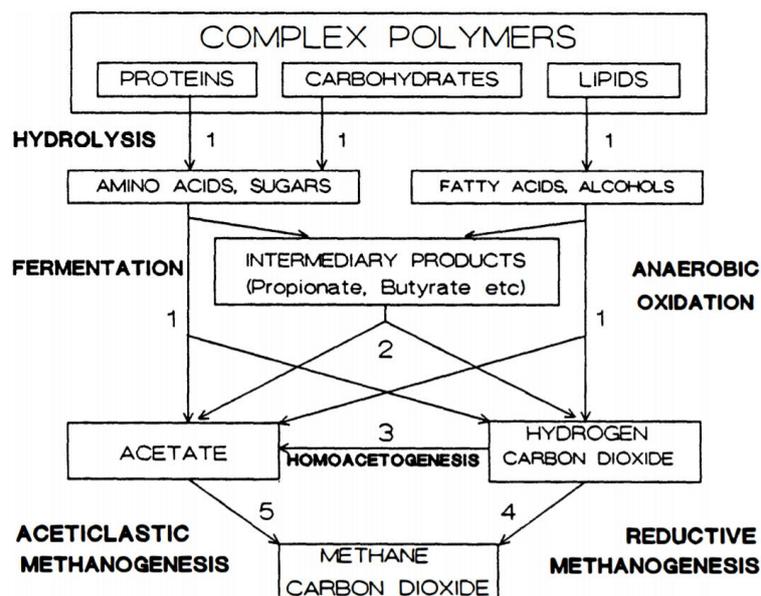


Figura 3 Proceso de digestión anaerobia.

Tomado de (Pavlostathis y Giraldo Gómez, 1991)

Posteriormente, se da paso a la etapa de acetogénesis, donde los monosacáridos son convertidos en ácidos orgánicos y alcoholes. Esta etapa corresponde a la conversión de material orgánico complejo a simple. Los ácidos generados en mayoría son: el ácido acético y el butírico, siendo el ácido acético el más significativo, porque, se ha demostrado que el 72% de metano se produce a partir del ácido acético y un 13% del ácido butírico; el restante 15% se produce a partir del hidrogeno y dióxido de carbono derivado de la reducción del metanol y la degradación de compuestos intermediarios (Monroy y Viniegra, 1990).

Finalmente se produce la metanogénesis, donde se produce el metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por enlace covalente: acetato, H_2/CO_2 , formato, metanol y ciertas metilaminas. En esta etapa actúa una amplia gama de bacterias anaeróbicas estrictas sobre los productos resultantes anteriormente (FAO, 2011).

2.2.1. Parámetros ambientales y operacionales

2.2.1.1. Naturaleza y composición de sustratos

La constitución del biogás depende directamente de la materia prima utilizada y del dinamismo del proceso. Como se puede observar en la Tabla 2, cada tipo de elemento usado en el proceso presenta fortalezas y debilidades en la producción de metano, debido a su diversa composición (Wheatley A. , 1990).

Tabla 2

Componentes del biogás en función del sustrato utilizado (% en volumen).

Biogás	Residuos agrícolas	Lodos de depuradora	Gas de vertedero
CH₄	50-80%	50-80%	45-65%
CO₂	20-50%	30-50%	55%
H₂O	Saturado	Saturado	Saturado
H₂	0-2%	0-5%	0-1%
H₂S	100-700ppm	0-1%	0.5-100ppm
NH₃	Trazas	Trazas	Trazas
CO	0-1%	0-1%	Trazas
N₂	0-1%	0-3%	0-20%
O₂	0-1%	0-1%	0-5%
MO	Trazas	Trazas	5ppm

Tomado de (Wheatley A. , 1990)

Hay varios residuos orgánicos aprovechables, que pueden ser explotados como materia prima en la digestión anaerobia, como fragmentos de desperdicios, productos secundarios industriales y cultivos energéticos. Los fragmentos de desperdicios abarcan restos de alimentos, desechos de cocina y residuos de poda. Industrialmente se genera cantidades relevantes de subproductos agroindustriales (estiércol, residuos de cosecha, etc.) y los subproductos procesados (residuos de mataderos, lacto suero, etc.). Incluso, las aguas

resultantes de procesos agroindustriales pueden ser útiles en plantas de biogás. Así como también, los cultivos exclusivos para generar energía verde, como maíz, pasto y remolacha (Drosg, Braun, y Bochmann, 2013). No obstante, no todos los residuos son aptos para la producción de biogás y, en ciertas circunstancias, la producción de biogás podría no ser ventajoso.

Generalmente los compuestos orgánicos como estiércol y lodos residuales muestran equilibrio en sales minerales, carbono y nitrógeno, es decir presentan condiciones ideales para la generación de biogás. Por otro lado, en el caso de residuos industriales, la degradación puede requerir un post tratamiento o adición de nutrientes (FAO, 2011).

Adicionalmente, el reparto eficiente de macromoléculas como proteínas, lípidos y carbohidratos es de gran trascendencia, puesto que su descomposición implica la formación de ácidos grasos volátiles (AGV) (Khanal S. , 2009). En general, el elevado contenido de grasa incrementa los AGV y reduce el pH, el elevado contenido de proteína genera grandes cantidades de amoníaco y también reduce el pH y finalmente, el elevado nivel de carbohidratos (azúcar y almidón tienen muy buena digestibilidad; celulosa tiene pobre digestibilidad) reducen el pH (Steffen, Szolar, y Braun, 1998). La Tabla 5 presenta pautas de desechos comúnmente utilizados en la digestión, así como también sus propiedades importantes. Por otra parte, la Tabla 6 indica la composición orgánica, rendimiento de metano y producción de metano (%v/v) de ciertas materias primas agrupadas por sectores, susceptibles a la formación de metano.

Tabla 3

Producción de biogás estimada de diversos compuestos orgánicos.

Compuesto Orgánico	Formula química	Biogás m³/kg S.V.	CH₄ m³/kg S.T.
Carbohidratos	C ₆ H ₁₀ O ₅	0.75	0.37
Lípidos	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	1.44	1.44
Proteínas	C ₁₆ H ₂₄ O ₅ N ₄	0.98	0.49

Tomado de (Varnero M y Arrellano V, 1990)

Tabla 4

Producción de biogás por tipo de desecho animal.

Estiércol	Relación C/N	Volumen de biogás m³/kg
Bovino	25:1	0.04
Porcino	13:1	0.06
Aves	19:1	0.08
Caprino	40:1	0.05
Ovino	35:1	0.05
Equino	50:1	0.04
Conejo	13:1	0.06

Tomado de (Varnero M y Arrellano V, 1990)

Tabla 5

Rendimiento de biogás y contenido de metano de diversas materias primas agrícolas.

Materia prima	Sólidos Totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	Tiempo de retención (días)	Rendimiento biogás^a (m³/kg SV)	Contenido CH₄ (%)	Problemas Frecuentes
Estiércol Cerdo	3-81 ^b	70-80	20-40	0.25-0.5	70-80	Capas de escoria, sedimentos
Estiércol Vaca	5-12 ^b	75-85	20-30	0.2-0.3	55-75	Capas de espuma, rendimiento bajo de biogás
Estiércol Pollo	10-30 ^b	70-80	>30	0.35-0.6	60-80	Inhibición de amonio,

						capas de espuma
Suero lácteo	1-5	80-95	3-10	0.8-0.95	60-80 ^d	Reducción de pH.
Hojas	80	90	8-20	0.-0.3 ^c	NA	
Paja	70	90	10-50 ^c	0.35-0.45 ^c	NA	Capas de espuma, digestión pobre.
Desechos de jardín	60-70	90	8-30	0.2-0.5	NA	Degradación pobre de compuestos celulíticos.
Ensilaje de hierba	15-25	90	10	0.56	NA	Reducción de pH
Desperdicios de fruta	15-20	75	8-20	0.25-0.50	NA	Reducción de pH
Restos de comida	10	80	10-20	0.50-0.60	70-80	Sedimentos, problemas mecánicos.

Tomado de (Steffen, Szolar, y Braun, 1998).

Nota: ^aDepende del tiempo de retención. ^bDepende de la dilución. ^cDepende de la velocidad de secado. ^dDepende del tamaño de partícula.

Tabla 6

Características de ciertas materias primas para generar biogás.

Tipo de materia prima	Contenido Orgánico	C: N	MS ^a (%)	SV ^b (% de MS)	SV (%)	MR ^c (m ³ CH ₄ /k g SV)	MP ^d (m ³ CH ₄ / m ³)
Residuos de animales y subproductos							

Lechada de cerdo	Carbohidratos, proteínas, lípidos.	7	5	80	4	0.3	12
Estiércol de cerdo sólido	Carbohidratos, proteínas, lípidos.		20	80	16	0.3	48
Lechada de bovino	Carbohidratos, proteínas, lípidos.	13	8	80	6.4	0.2	12.8
Estiércol de bovino sólido	Carbohidratos, proteínas, lípidos.		20	80	16	0.2	32
Excremento de ave de corral	Carbohidratos, proteínas, lípidos.	7	5	80	4	0.3	12.6
Estiércol de ave de corral sólido	Carbohidratos, proteínas, lípidos.		20	80	16	0.3	48
Estomago/contenido intestinal, bovino	Carbohidratos, proteínas, lípidos.	4	12	80	9.6	0.4	38.4
Estomago/contenido intestinal, cerdo	Carbohidratos, proteínas, lípidos.	4	12	80	9.6	0.46	44.2
Residuos vegetales y subproductos							
Paja	Carbohidratos, lípidos	90	70-90	80-90		0.15-0.35	
Residuos de jardín	Carbohidratos, lípidos	125	60-70	90		0.2-0.5	
Césped	Carbohidratos, lípidos	18	20-25	90		0.3-0.55	
Residuos de fruta	Carbohidratos, lípidos	35	15-20	75		0.25-0.5	
Residuos orgánicos industriales							

Suero	75-80% lactosa; 20-25% proteína	-	5	90	4.5	0.33	15
Suero concentrado	75-80% lactosa; 20-25% proteína	-	10	90	9	0.54	31.5
Lodos de flotación	65-70% proteínas; 30-35% lípidos	-	5	80	4	0.54	21.6
Fermentación de agua sucia (slop)	Carbohidratos	7	1-5	90		0.35-0.78	
Ensilaje entero (grano)			12.6	91	11.5	0.47	53.9
Ensilaje fino (grano)			8.5	86	7.3	0.5	36.5
*Aceite de pescado	30-50% lípidos	-	90	90	81	0.8	648
*Aceite de soja/margarina.	90% aceite vegetal	-	95	90	85.5	0.8	684
*Alcohol	40% alcohol	-	40	95	38	0.4	152
			98	40	39.2	0.8	313.6
*Lejía arcilla							
*Pulpa de oliva		-	24	96	23	0.18	41.4
*Cerveza (granos gastados)							
*Glicerina		-	20	90	18	0.33	59.4
Cultivos energéticos		17	15-40	90		<0.45	

Ensilaje de hierba						
Ensilaje de maíz						
Forraje de remolacha						
Lodos de aguas residuales	5	75	3.7 5	0.4	15	
Concentrado de lodo de aguas residuales	10	75	7.5	0.4	30	
Restos de comida	10	80		0.5- 0.6		

Tomado de (Drosg, Braun, y Bochmann, 2013)

Nota: *Indica refuerzo de metano. ^aMateria Seca. ^bSólidos Volátiles. ^cRendimiento de Metano. ^dProducción de Metano.

2.2.1.2. pH y Alcalinidad

La biodegradación anaerobia está en función del pH (Mathew, y otros, 2014). La fase metanogénica es óptima con pH 6.5 – 8.2, por otro lado, durante la hidrólisis y la acetogénesis se desarrolla mejor en pH 5.5 y 6.5 respectivamente (Lee, Behera, Kim, y Park, 2009). El pH ideal para cultivos compuestos se halla entre 6.8 y 7.4, siendo el pH neutro el más óptimo (FAO, 2011).

El pH establece tanto las condiciones para generación de biogás, como su composición (*Ver Figura 4*). Parte del resultado de que decrezca el pH a valores inferiores a 6 es que el biogás generado es muy pobre en metano, a consecuencia de esto no es eficiente energéticamente. Puesto que, la metanogénesis se considera una etapa clave durante la generación de metano en el biogás, esta debe mantener un pH próximo a la neutralidad para su óptimo desarrollo (Drosg, Braun, y Bochmann, 2013).

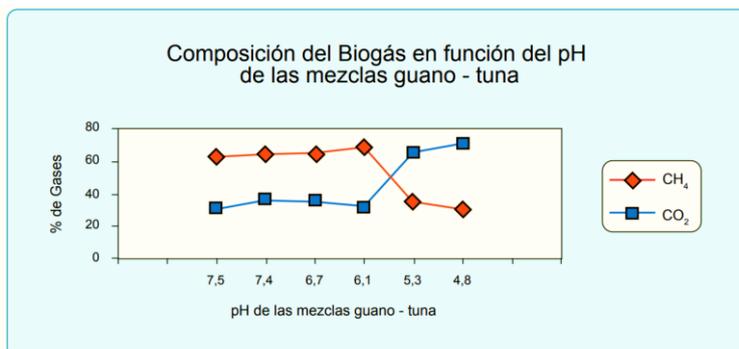


Figura 4 Composición de biogás en función del pH.

Tomado de (Varnero M y Arrellano V, 1990)

El pH inferior a 6 provoca una reducción significativa de microorganismos metanogénicos, lo cual causa, la aglomeración de ácido acético y H₂. La abundancia de H₂ inhibe las bacterias que degradan el ácido propiónico, lo cual genera un exceso de ácidos grasos volátiles, generalmente ácidos propiónico y butírico, lo mismo que originara la reducción del pH (Bischofsberger, Dichtl , Rosenwinkel, Seyfried, y Bohnke, 2005).

En la digestión anaerobia, el descenso del pH es generalmente provocado por el exceso de ácidos grasos volátiles (AGV) y/o la aglomeración de dióxido de carbono. Una de las posibilidades para solucionar esta contrariedad es disminuir la carga orgánica volumétrica hasta el punto en el que los AGV se consuman más rápido de lo que se genera. Una vez hecho esto, los niveles de pH reanudan los rangos normales de operación y la metanogénesis empieza a manifestarse (FAO, 2011).

Para mantener un sistema optimo, el pH puede llegar a estar entre 6.0 - 8.3 (Lay, Li, y Noike, 1997) (*Ver Figura 5*)

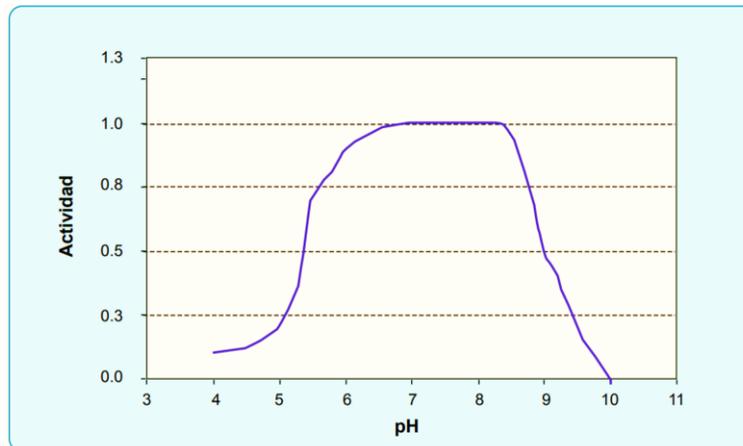


Figura 5 Dependencia del pH en la actividad metanogénica.

Tomado de (Speece, 1983)

2.2.1.3. Temperatura

Los procesos anaeróbicos dependen de la temperatura. Es decir, la temperatura influye en la velocidad de reacción de cada uno de los procesos, lo cual permite el desarrollo de los microorganismos. En proporción al incremento de temperatura, intensifica el crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a generaciones de biogás superiores (Chae, Jang, Yim, y Kim, 2008; Van Haandel y Lettinga, 1994).

En procesos anaerobios se presentan tres rangos óptimos de temperatura para metanogénesis (*Ver Tabla 7*): psicrófilos, mesófilos y termófilos. La transformación anaeróbica muestra su potencial más alto a 5 – 15°C para los psicrófilos, 35 – 40°C para los mesófilos y alrededor de 55°C para los termófilos, con valores reducidos entre procesos (*Ver Figura 6*) (Lettinga, Rebac, y Zeeman, 2001)

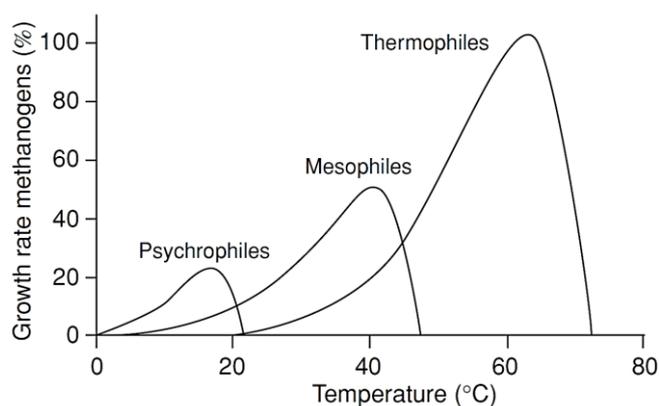


Figura 6 Tasa de crecimiento relativo de microorganismos psicrófilos, mesófilos y termófilos.

Tomado de (Lettinga, Rebac, y Zeeman, 2001)

Tabla 7

Rangos de Temperatura y tiempo de fermentación Anaeróbica.

Fermentación	Mínimo	Óptimo	Máximo	Tiempo de fermentación
Psycrophilica	4-10 °C	15 – 18 °C	20 – 25 °C	Sobre 100 días
Mesophilica	15 – 20°C	25 – 35 °C	35 – 45 °C	30 – 60 días
Thermophilica	25 – 45°C	50 – 60 °C	75 – 80 °C	10 – 15 días

Tomado de (FAO, 2011)

Gran parte de reactores anaeróbicos a pequeña escala (laboratorios) operan en el rango de temperatura mesófila. La *Figura 7* expone los efectos de la temperatura en el rango mesófilico en las actividades de los metanógenos (Khanal S. K., 2008).

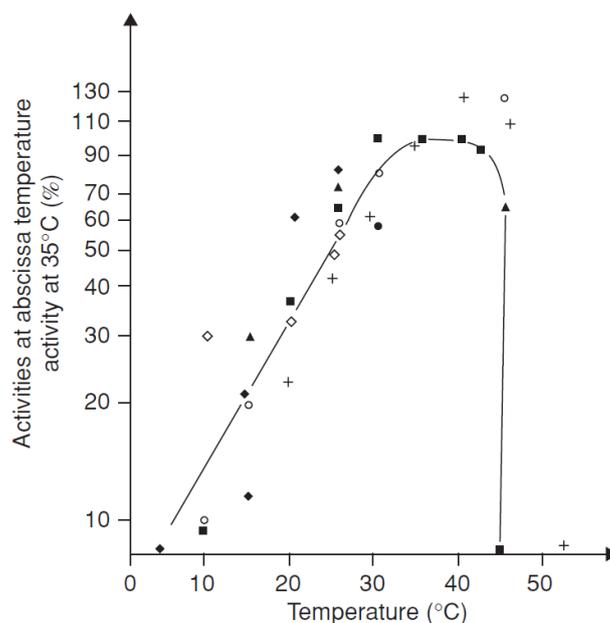


Figura 7 Actividades de los metanógenos mesófilos a distintas temperaturas.

Tomado de (Lettinga, Rebac, y Zeeman, 2001)

Rangos de temperatura entre 35 – 37 °C son generalmente recomendados para producción de metano (CH₄) (Sakar, Yetilmezsoy, y Kocak, 2009). Normalmente los rangos termófilos tienden a tener inestabilidad, sin embargo, dependiendo del sustrato, los procesos termófilos presentan un índice de generación de metano superior y tiempos de retención hidráulica (TRH) reducidos, en comparación de los rangos mesófilos, a causa del desarrollo veloz de los microorganismos termófilos que consumen los ácidos. Igualmente, se caracterizan por ser un proceso anaerobio que destruye patógenos (Zinder, 1990). Adicionalmente, en rangos termófilos se puede asignar altas tasas de cargas (de Mes, Stams, Reith, y Zeeman, 2003).

2.2.1.4. Sólidos Totales y Sólidos Volátiles.

La valoración de los sólidos totales y volátiles en un proceso de digestión anaerobia es fundamental, puesto que esto permite garantizar que el proceso se ejecute adecuadamente. Este factor permite un dinamismo conveniente de las bacterias dentro del sistema, pues a medida que incrementa el contenido de sólidos, limita la movilidad de las bacterias, lo cual está directamente relacionado

con la eficiencia y producción de gas (Drosg, Braun, y Bochmann, 2013). En circunstancias donde se usa concentraciones bajas de ST, decrece la eficiencia de conversión, el digestor se desestabiliza y se reduce la producción de metano, debido al alto contenido de agua de la materia prima. Mientras que con altas concentraciones de sólidos totales existe la posibilidad de una acumulación de compuestos que inhiben el crecimiento de microorganismos (Itodo y Awulu, 1999).

2.2.1.5. Demanda química de oxígeno.

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) indica el total químicamente oxidable de muestras líquidas y predice el potencial de producción de biogás. La cantidad de oxígeno de la materia orgánica que es factible oxidar se evalúa usando un agente oxidante químico en un medio ácido (de Mes, Stams, Reith, y Zeeman, 2003). Por ello, se materializa como la energía química cúspide presente en la materia prima. En vista de que, los microorganismos transforman la energía química en metano (Drosg, Braun, y Bochmann, 2013).

Tanto la DQO, como los sólidos volátiles se toma en cuenta para determinar la degradación neta metanogénica. Sin embargo, la relación de la producción de metano con el DQO se usa para valorar muestras mayormente líquidas (aguas residuales) (DBFZ, 2016; Gülzow, 2010). Se debe agregar que, el consumo de 1kg de DQO genera 0,35 Nm³ de metano. La energía eléctrica generada por metano es 1.29 kWh/kg de DQO _{removida}. Partiendo de esto, una de las ventajas de la digestión anaerobia es que, anteriormente para remover 1 kg de DQO, durante la gestión de residuos, se necesitaba de 0.5 – 0.75 kWh (Van Haandel y Lettinga, 1994). Hoy en día, se necesita mantener condiciones apropiadas y elegir correctamente los sustratos para hacer posible tanto la remoción de DQO como la generación de metano.

2.2.1.6. Tóxicos e inhibidores de metalogénesis.

Los microorganismos anaerobios presentes durante la digestión pueden ser inhibidos por sustancias tóxicas en dos situaciones, primero pueden estar

presentes en los sustratos y en segundo lugar pueden ser subproductos de los mismos. Los metales pesados, el amoníaco, los compuestos halogenados, cianuro y fenoles pertenecen al primer punto, por otro lado, el amoníaco, el sulfuro y ácidos grasos de cadena larga pertenecen al segundo punto. Cabe recalcar que, muchas bacterias anaerobias son capaces de desintegrar compuestos orgánicos refractarios (Stronach, Rudd, y Lester, 1986).

En ciertos casos, la tolerancia se expone por previa aclimatación a los tóxicos. Por otro lado, muchos de estos inhibidores a bajas concentraciones pueden estimular la digestión (Khanal S. K., 2008).

Ácidos grasos volátiles

En los digestores anaerobios, la concentración de ácidos grasos volátiles (AGV) puede determinar el progreso del sistema, a causa de su sensibilidad ante variaciones del sistema, en cuanto a un exceso orgánico, inclusión de tóxicos o perturbaciones en el sistema como cambios en la temperatura o el sustrato (Ahring, Sandberg, y Angelidaki, 1995).

La aglomeración de AGV revela un desajuste cinético entre los productores de ácido y los consumidores. Las concentraciones de acetato, por ejemplo, superiores a 13 mM indican un desequilibrio (Hill, Cobb, y Bolte, 1987). Un incremento en los niveles de acetato advierte un inconveniente con las bacterias metanogénicas, puesto que, el 70% de metano generado se origina a partir del acetato, de tal manera que el rendimiento del digestor se relaciona directamente (Hill, Cobb, y Bolte, 1987). Varios investigadores han determinado que es importante tomar como indicador al propionato, para mostrar inestabilidad en el proceso (Kaspar y Wuhrmann, 1978) (*Ver Figura 8*).

Hill (1982) sugiere que la proporción de propionato/acetato debería estar en valores inferiores a 1.4.

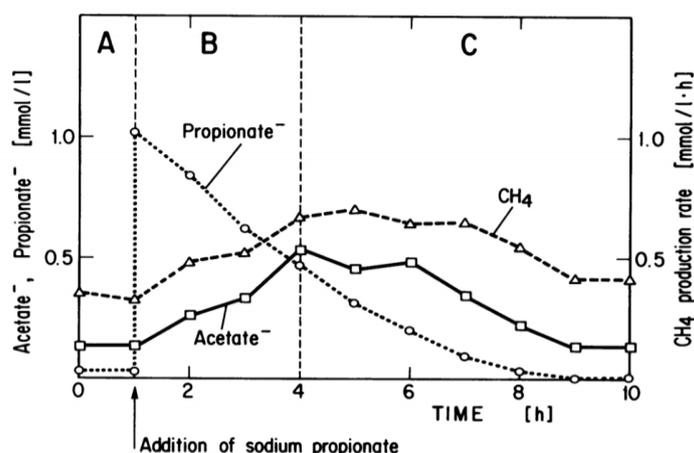


Figura 8 Degradación de propionato en la digestión de lodos.

Tomado de (Kaspar y Wuhrmann, 1978)

Nota: (A) Producción de metano y concentraciones de propionato y acetato. (B) Degradación de propionato en la fase dependiente. (C) Degradación del propionato en la fase dependiente.

Por otro lado, la concentración eficiente de AGV se localiza generalmente entre 50-250 mg HAc/l. Se puede alterar, debido a: Inhibición de bacterias metanogénicas debido a toxicidad (sulfuro, amoníaco, etc.), cambios en las condiciones del reactor (pH, temperatura, etc.) o una restricción de nutrientes puede originar la aglomeración de acetato e hidrogeno. La presión parcial exorbitante de hidrogeno inhibe exageradamente las bacterias que desintegran propionato. Un incremento en la concentración de AGV conlleva una desestabilización exorbitante del sistema y consecuentemente, la disminución de la generación de biogás.

Hidrógeno

En la digestión anaerobia, el hidrógeno tiene un papel primordial, puesto que es un compuesto intermedio en el proceso, su aglomeración implica la inhibición de la acetogénesis y por ende la acumulación de ácidos grasos volátiles con más de dos átomos de carbono (Hill y Cobb, 1993). El aumento de niveles de hidrógeno en el sistema provocara una mayor producción de butirato, propionato, lactato o etanol, mas no de metano (Schink, 1997).

Nitrógeno amoniacal

En la digestión anaerobia ingresan materias primas o se generan compuestos orgánicos nitrogenados como proteínas o aminoácidos. Por lo general, las proteínas contienen 16% de nitrógeno. Durante la digestión, el nitrógeno orgánico es hidrolizado, formando de tal manera compuestos amoniacales (FAO, 2011). El nitrógeno amoniacal (NH_3) presenta relación directa con el pH y temperatura.

Aquellos sustratos que abarquen una considerable abundancia de proteínas tienen más probabilidad de presentar problemas de inhibición por amonio (FAO, 2011). El amonio perjudica especialmente a bacterias metanogénicas acetoclásticas, lo que causa el incremento del acético (Angelidaki y Ahring, 1993), simultáneamente es capaz de inhibir la acetogénesis y por ende, generar la aglomeración de ácidos grasos volátiles, como propiónico, butírico y valérico (Fukuzaki, Nishio, Shobayas, y Nagai, 1990) lo mismo que ocasiona una depreciación de pH en el proceso (Hansen, Angelidaki, y Ahring, 1998).

Sulfatos y sulfuros

Los compuestos de azufre son utilizados por varias bacterias como fuente de azufre, sin embargo, son inhibidores de los metanógenos cuando presentan altas concentraciones. Igualmente, tienen predisposición problemática, puesto que provocan la precipitación de oligoelementos primordiales como: hierro, níquel, cobre y molibdeno, que son insolubles a potenciales redox bajos. El H_2S junto con enzimas y coenzimas interfieren en el metabolismo intracelular (Wheatley, Fisher, y Grobicki, 1997). La estructura ionizada (HS^-) se considera de menor toxicidad.

Por consiguiente, el proceso de inhibición puede presentar dos etapas: la primera resulta de la disputa entre microorganismos metanogénicos y sulfato-reductores y la segunda es directa del crecimiento metanogénico por la presencia de sulfuros solubles (Khanal S. K., 2008).

Cationes y metales pesados

Metales pesados como el cobre y el zinc, así como también los iones de metales alcalinos y alcalino-térreos, como el Na, NH₄, K y Ca, se consideran inhibidores. Sin embargo, en bajas concentraciones los alcalinos pueden ser estimuladores del crecimiento de microorganismos (Murphy y Thamsiroj, 2013).

Las concentraciones inhibitorias de tales elementos químicos varían debido a muchos factores (Chen, Cheng, y Creamer, 2008). Igualmente, los metales solubles tienden a ser más complicados, en comparación con los insolubles. Los sulfuros reducen significativamente la inhibición por metales solubles, convirtiéndolos en contacto en metales insolubles, a excepción del cromo. Generalmente 0.5 mg de sulfuro se requiere para precipitar 1.0 mg de metal (FAO, 2011).

Otros inhibidores

Los solventes clorados, pesticidas, biocidas y antibióticos también se presentan como inhibidores de la digestión anaerobia (Murphy y Thamsiroj, 2013). En la *Tabla 8* se observan referencias de concentraciones de algunos inhibidores frecuentes. A estas referencias se las valora como una guía, puesto que los microorganismos que intervienen presentan la habilidad suficiente para adaptarse después de un tiempo, a pesar que hayan sido afectados severamente en un principio (Svensson, Paruch, Gaby, y Linjordet, 2018).

Tabla 8

Concentración inhibidora de sustancias en un proceso anaeróbico.

<i>Inhibidores</i>	<i>Concentración inhibidora</i>
<i>SO₄</i>	<i>5000 ppm</i>
<i>NaCl</i>	<i>40000 ppm</i>
<i>NO₃</i>	<i>0.05 mg/ml</i>
<i>Cu</i>	<i>100 mg/l</i>
<i>Cr</i>	<i>200 mg/l</i>
<i>Ni</i>	<i>200-500 mg/l</i>

<i>CN</i>	25 mg/l
<i>Na</i>	3500-5500 mg/l
<i>K</i>	2500-4500 mg/l
<i>Ca</i>	2500-4500 mg/l
<i>Mg</i>	1000-1500 mg/l

Tomado de (Parkin y Owen, 1986)

2.2.1.7. Tamaño de las partículas

La técnica de disminución de medida y tamaño de partícula puede intervenir en el rendimiento de digestión (Raposo, De la Rubia, Fernández-Cegrí, y Borja, 2012). Por lo regular, la hidrólisis es la etapa decisiva para determinar la velocidad de digestión de sustratos en partículas (Sanders, Geerink, Zeeman, y Lettinga, 2000). Es decir, tamaños de partícula más cortos incrementan el área superficial, lo cual permite que los microorganismos puedan llevar acabo con mayor facilidad la degradación enzimática (Wall, Allen, O'Shea, O'Kiely, y Murphy, 2016). El mayor rendimiento de biogás involucra a partículas con mayor superficie, menor tamaño y uniformes. Se calcula un tamaño de partícula de ≤ 10 mm (Sharma, Mishra, Sharma, y Saini, 1988; Tedesco, Lochlainn, y Olabi, 2014).

2.2.2. Co-digestión anaerobia

La Co-digestión es una digestión anaerobia conjunta de dos o más materias primas que se complementan entre si, para mejorar la producción de biogás y los efectos sinérgicos (Castrillón, Fernández-Nava, Ormaechea, y Marañón, 2013). La co-digestión permite a los sustratos compensar las carencias del otro, tanto para condiciones termófilas como mesófilas (IDAE, 2007).

Los residuos urbanos e industriales son altamente degradables en su mayoría, debido a su composición (lípidos, carbohidratos y proteínas) (Ver Tabla 6), es por esto que revelan un alto potencial para generar biogás que los residuos ganaderos (Ver Tabla 9) (Campos, Bonmatí, Teira, y Flotats, 2001). No obstante, tienen características que dificultan el crecimiento de bacterias metanogénicas,

por ende, necesitan complementar sus carencias con sustratos con capacidad tampón y nutrientes (Gülzow, 2010).

La Tabla 9 presenta una identificación significativa de las características propias de cada sustrato. Las flechas en sentidos distintos determinan las ventajas y desventajas de cada categoría.

Tabla 9

Identificación significativa de la co-digestión.

	Residuos ganaderos	Lodos EDAR	FORSU	Residuos industria alimentaria
Micro y macronutrientes	↑	↑	↓	↓
Relación C/N	↓	↑↓	↑	↑
Capacidad tampón (alcalinidad)	↑		↓	↓
Materia orgánica biodegradable	↓	↑↓	↑	↑

Tomado de (Campos, Bonmatí, Teira, y Flotats, 2001)

2.3. Biogás

El biogás es un biocombustible gaseoso versátil, debido a que puede ser generado con diversos recursos orgánicos. La generación de biogás es posible gracias a la digestión anaerobia, la misma que es una opción limpia para producir energía, reducir y gestionar residuos orgánicos (Bharathiraja, y otros, 2018). La generación de biogás presenta un papel relevante en la mitigación de residuos, a pesar de no estar totalmente exento de gases de efecto invernadero, no coopera al calentamiento global, por contraste contribuye a combatirlo. El metano liberado del biogás generado disminuye la polución de los recursos (agua, suelo, aire), debido a que aporta energía limpia y disminuye eventos

desafortunados (Borja y Rincon, 2011). En inclinación a todo ser vivo, el metano, generado a partir del biogás, se considera una de las mejores alternativas para satisfacer la demanda actual de energía, sin contribuir con el calentamiento global (Bharathiraja, y otros, 2018).

2.3.1. Composición del biogás

La constitución del biogás varía en función, tanto del tipo de residuo utilizado durante el proceso de digestión, como de las circunstancias de funcionamiento del digestor (Surendra, Takara, Hashimoto, y Khanal, 2014). Por lo regular, consiste esencialmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), sin embargo, contiene impurezas como vapor de agua (H_2O), sulfuro de hidrogeno (H_2S) y amoniacó (NH_4) (Vögeli, Lohri, Gallardo, Diener, y Zurbrügg, 2014). La composición típica y las propiedades de cada componente se pueden observar en la Tabla 10. El biogás, cuyo contenido de metano sea superior a 45%, tendrá un valor energético crucial. Así, por ejemplo, 1 m^3 de biogás a presión y temperatura estándar con 60% de metano posee un valor de calentamiento de 21.5 MJ (5.97 kWh de electricidad), en contraste con 38.8 MJ (9.94 kWh de electricidad) generada por m^3 de CH_4 puro a temperatura y presión estándar (Surendra, Takara, Hashimoto, y Khanal, 2014). En efecto, el valor calórico del biogás es directamente proporcional a la cantidad de metano, en vista de que con una concentración de metano entre 55 a 65 %, el valor calórico corresponde a 19.7 y 23.3 MJ/m^3 respectivamente. Estos valores corresponden al 50 y 70 % del valor calórico del gas natural en condición comercial de 31.6 – 39 MJ/m^3 , que es dependiente en su totalidad de su origen y constitución (Persson, Jonsson, y Wellinger, 2006).

Tabla 10

Composición Típica de biogás.

Composición	Formula	Concentración (v/v)	Propiedades
Metano	CH_4	40-75 %	Poseedor de energía

Dióxido de Carbono	CO ₂	15-60 %	Disminuye el valor de calentamiento. Corrosivo, principalmente en presencia de humedad.
Vapor de agua	H ₂ O	1-5 %	Facilita la corrosión en presencia de CO ₂ y SO ₂ .
Nitrógeno	N ₂	0-5 %	Disminuye el valor calorífico.
Hidrogeno	H ₂	Trazas	Combustible
Ácido Sulfhídrico	H ₂ S	0-5000 ppm	Corrosivo Emisión de dióxido de azufre durante la combustión.
Oxígeno	O ₂	< 2%	No Combustible
Gases Traza	-	< 2%	
Amonio		0-500ppm	

Tomado de (Surendra, Takara, Hashimoto, y Khanal, 2014; Baciocchi, y otros, 2013; Bharathiraja, y otros, 2018)

2.3.2. Aplicaciones del biogás

El biogás presenta un sin número de aplicaciones de utilización final en contraste con otras energías renovables (Kaparaju y Rintala, 2013). Tradicionalmente, el biogás presenta aplicaciones relacionadas con el aporte calor y energía (Persson, Jonsson, y Wellinger, 2006). La eficiencia de transformación de energía del biogás es de 55, 30 y 3%, para estufas, motores y lámparas respectivamente (Vögeli, Lohri, Gallardo, Diener, y Zurbrügg, 2014).

Tabla 11

Tratamiento según el uso.

Uso Final	Eliminación de agua	Eliminación de CO ₂	Eliminación de H ₂ S
Producción térmica en caldera	1	0	0 – 1 - 2
Producción de electricidad en motores.	1 o 2	0 – 1 - 2	1 o 2
Combustible de vehículos o para turbinas	2	2	2
Gas natural para calefacción	2	2	2
Pilas de combustible.	2	2	2

Tomado de (IDAE, 2007)

Nota: 0= no tratamiento; 1=tratamiento parcial; 2=tratamiento elevado.

Energía calorífica

Alrededor del mundo, esta se considera la aplicación más general. Sin embargo, se necesita eliminar el contenido de agua del gas antes de su combustión. Industrialmente se usa calderas para producir calor, dicho calor se puede utilizar en procesos de las industrias y el excedente compartir con la comunidad aledaña con ayuda de tuberías (Lam, Heegde, y Von Eije, 2014).

Energía eléctrica y calórica

El biogás puede emplearse para la co-generación de electricidad y calor. Aproximadamente, el 30-40% del poder calórico se puede transformar en electricidad y lo que queda en calor, dependiendo tanto de la tecnología utilizada para su conversión, como en la calidad que posea el biogás (Ver Tabla 11) (Dieter y Angelika, 2008).

Industria

En la industria, la combustión del metano genera fuego limpio y puro, lo cual quiere decir que los equipos industriales no se obstaculizarían durante la combustión con hollín o cenizas. Asimismo, las industrias que generen residuos altamente contaminantes, pueden usarlos para generar biogás y ser autosuficientes (Borja y Rincon, 2011).

2.4. Biodigestores anaerobios

Los digestores anaerobios son sistemas que permiten tener un entorno biológicamente activo, sin oxígeno y hermético (Goswami, y otros, 2016). El primer digester se construyó en 1859, en India. La elección de un biodigestor depende del clima de la ciudad, situación económica y materia prima disponible.

Existen varios tipos de reactores que se han usado y se usan actualmente, entre ellos tenemos:

Digestor de cúpula fija

El digester de cúpula fija es más conocido como el modelo chino, debido a que fue construido y desarrollado en China en 1936. Este modelo se ha construido con ayuda de moldes y concreto. Está constituido por un digester en forma de cúpula cerrada con un soporte de gas rígido e inmóvil, una entrada de materia prima y un pozo de desplazamiento (Ver *Figura 9*). El gas generado se recolecta en la parte superior del digester, con ayuda de una válvula cerrada de salida, el incremento del gas aumenta la presión dentro del digester, generando un empuje del digestato al pozo de desplazamiento. Cuando la válvula de salida está abierta para el uso del gas, la presión se reduce y una cantidad leve de digestato regresa del pozo de desplazamiento al digester. Este modelo tiene variaciones de presión constantes y esto depende de la producción y utilización del gas. Este tipo de digestores se construyen bajo tierra, evitando de tal manera las caídas de temperatura por las noches y durante estaciones frías, así como también, el incremento de temperatura en las mañanas y en verano (Lam, Heegde, y Von Eije, 2014).

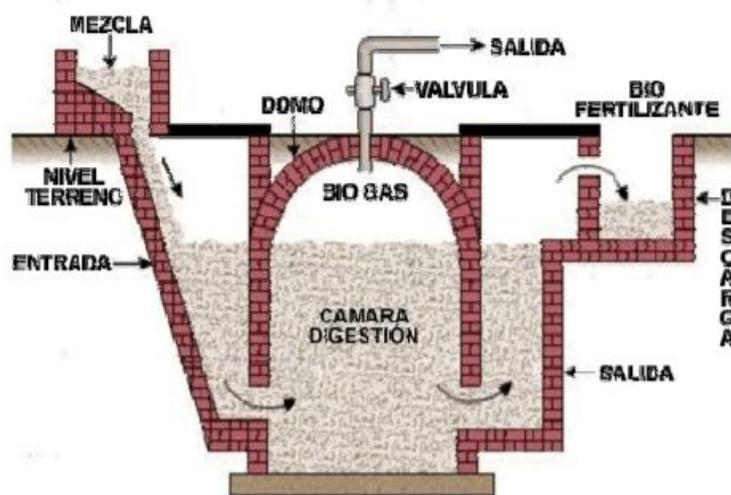


Figura 9 Esquema de un biodigestor tipo chino

Tomado de (Guardado Chacón, 2007)

Este sistema normalmente se encuentra conectado directamente con los inodoros, recibe aguas grises, desechos animales y residuos de cocina, con el fin de usar el biogás para cocinar e iluminar. Generalmente, presentan un volumen de 5-7 m³ y generan aproximadamente 0.5 m³ por m³ de volumen (Surendra, Takara, Hashimoto, y Khanal, 2014).

Son biorreactores económicos y de larga vida útil (entre 15 a 20 años). Sin embargo, la construcción con el tiempo puede presentar poros y tender a agrietarse, lo cual causa escape del gas. Este sistema presenta limitantes como: problemas de construir en roca, dificultad de acceso a la estructura en caso de daños, necesidad de materiales (sellador) y mano de obra adecuada, y la presión es irregular, debido a que es directamente proporcional al volumen de gas almacenado (Vögeli, Lohri, Gallardo, Diener, y Zurbrügg, 2014).

Digestor de tambor flotante

El digestor de tambor flotante se basa en los principios del modelo chino y su funcionamiento es similar. Este diseño se desarrolló en Nepal, hace 20 años. El digestor consiste en una cúpula de hormigón, la pared y la salida se construyen con ladrillos o piedras (Lam, Heegde, y Von Eije, 2014). El digestor de tambor flótate se encuentra sobre el suelo, a diferencia del anterior modelo, sin embargo,

el resto de componentes se mantiene bajo tierra. El soporte del gas está hecho de metal y cubierto con pinturas sintéticas para evitar corrosión. Un soporte con mantenimiento regular dura entre 3 a 5 años en áreas húmedas, o de 8 a 12 años en regiones secas (Vögeli, Lohri, Gallardo, Diener, y Zurbrügg, 2014). El biogás generado sale por la tubería de gas ubicada en la parte superior del reactor. Un cambio relevante, en comparación con el modelo chino, es el acceso al pozo. Este se encuentra en la parte superior del domo entre el digestor y la toma corriente. Además, este diseño se puede edificar en cualquier país (Lam, Heegde, y Von Eije, 2014).

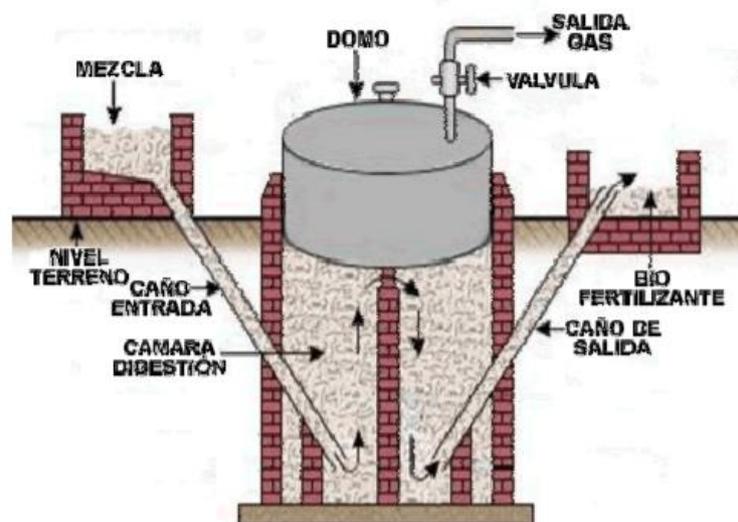


Figura 10 Esquema de un digestor tipo hindú.

Tomado de (Guardado Chacón, 2007)

El sistema presenta tanto ventajas como desventajas, entre las ventajas se tiene que: su operación es fácil, el gas almacenado es visible, la presión es constante, la construcción es fácil y no requiere mano de obra especial. Entre las desventajas, se puede ver las siguientes: alto costo de construcción y mantenimiento, susceptible a corrosión, carece de mezcla correcta y no posee un sistema de eliminación de carga (Vögeli, Lohri, Gallardo, Diener, y Zurbrügg, 2014).

Digestor Tubular

El digester tabular se fundamenta en un sistema aislado térmico en forma longitudinal, resistente al entorno. Normalmente, utiliza una bolsa de plástico para el tanque principal, junto con tuberías de PVC para recoger el gas. Con el propósito de mantener la temperatura en las noches, en áreas frías, se entierra la bolsa en una zanja y se cubre. El reactor posee una vida útil de 2 a 10 años, reduce costos de mantenimiento e instalación, uso de materia prima disponible, no requiere equipo de mezcla o calentamiento (Sanders, Geerink, Zeeman, y Lettinga, 2000).

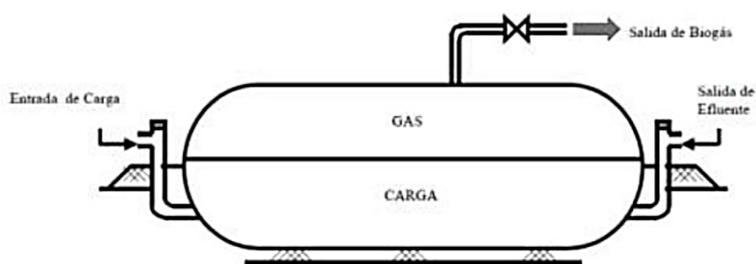


Figura 11 Esquema de un digester tipo tubular

Tomado de (Vögeli, Lohri, Gallardo, Diener, y Zurbrügg, 2014)

3. Capítulo III: Metodología

3.1. Caracterización de los sustratos de estudio

Los sustratos utilizados en el presente estudio (estiércol y suero) así como los reactores al final del tratamiento fueron caracterizados en cuanto a parámetros físicos y químicos, la caracterización se realizó en el laboratorio de aguas de la Universidad de las Américas, los sustratos fueron suministrados por la Granja Udla Nono ubicada en la parroquia de Nono a 22 km de la ciudad de Quito. Cabe recalcar, que todas las medidas se realizaron por triplicado.

Sólidos Totales y Sólidos Volátiles

Para el cálculo de sólidos totales, en primer lugar, se procedió a colocar los crisoles en el horno durante una hora a 105 °C, seguido de esto, se ubicó cuidadosamente, con ayuda de pinzas, en el desecador durante treinta minutos. Finalmente, se verificó que la balanza analítica estaba calibrada para continuar

con el registro del peso de dichos crisoles como " W_{dish} ". En segundo lugar, con ayuda de la balanza analítica, se tomó una muestra de 25 gr, de cada sustrato, con una precisión de dos decimales, se colocó en los crisoles, previamente pesados, los mismos que se ubicaron en el horno durante doce horas a 105°C. Después, se tomó delicadamente, con ayuda de las pinzas, los crisoles del horno al desecador, donde permanecieron treinta minutos, antes de ser colocados en la balanza analítica, donde se procedió al registro de pesos como " W_{total} ". Adicionalmente, la sumatoria del crisol junto con la muestra (25 gr) se registró como " W_{sample} ".

Por otra parte, para el cálculo de sólidos volátiles, dichas muestras, después de doce horas y de ser registradas, fueron colocadas cuidadosamente, con ayuda de pinzas, en la mufla a 550°C durante dos horas, seguido de esto, nuevamente, se colocaron cuidadosamente, con ayuda de pinzas, en el desecador y finalmente, después de treinta minutos, en la balanza analítica para ser registradas como " $W_{volatile}$ ".

Para determinar el porcentaje de sólidos totales (Ecuación 1) y sólidos volátiles (Ecuación 2), con los datos anteriormente registrados, se efectuaron las siguientes ecuaciones:

(Ecuación 1)

$$\% \text{ total solids} = \frac{W_{total} - W_{dish}}{W_{sample} - W_{dish}} * 100$$

(Ecuación 2)

$$\% \text{ volatile solids} = \frac{W_{total} - W_{volatile}}{W_{total} - W_{dish}} * 100$$

Tomado de (EPA, 2001).

Demanda Química de Oxígeno y pH

Para determinar el DQO y pH se utilizó el espectrofotómetro y el pHmetro portátil para suelos, que posee el laboratorio de aguas de la Universidad de las

Américas, con ayuda de los kits NOVACHEM con un rango de 15000 mg/l, en el caso del DQO.

3.2. Inóculo

Para incrementar la actividad metanogénica, se usó un inóculo en este estudio. El mismo que fue generado, después de 15 días de pre-incubación, con estiércol recolectado de la Granja de Nono. Este inóculo consistía en una mezcla 1:1 estiércol-agua, es decir 400 gr de estiércol y 400 ml de agua destilada, dicha mezcla se colocó en un Erlenmeyer (*Figura 12*) de 1000 ml, el mismo que se pre-incubo a 34°C, para reducir el contenido de materia orgánica residual. Se produjeron por duplicado, y al final se usó el lodo del reactor con mayor producción de biogás, seguido de esta elección, se caracterizó con respecto a DQO, pH, ST y SV, usando la metodología anteriormente descrita. Al cabo de los 15 días, se recolecto el inóculo y se utilizó en cada uno de los tratamientos, evaluando el potencial residual de metano (100% inóculo).



Figura 12 Reactores con inóculo.

3.3. Reactores batch escala laboratorio

3.3.1. Construcción

Los reactores batch fueron construidos con un Erlenmeyer de 500ml y tapones de caucho. Por otra parte, para el sistema de medición de metano se usó una probeta, dos equipos de venocllisis y un vaso de precipitación de 250 ml. Dentro

del Erlenmeyer (Reactor) se llevó a cabo la digestión. Con el objetivo de mantener la temperatura de digestión a 35°C se utilizó una incubadora.

3.3.2. Puesta en marcha

Se armaron los reactores batch y el sistema de medición, cada uno se llenó hasta 100 ml con diferentes proporciones de estiércol, inóculo, agua y lacto suero. Cabe recalcar que, con el fin de mantener condiciones óptimas, se tomaron en cuenta dos puntos clave durante el proceso: primero, todos los tratamientos mantendrán una relación inóculo-sustrato de 0,5 $SV_{inóculo}/SV_{sustrato}$ como lo recomienda la norma alemana (Verein Deutscher Ingenieure-VDI 4630, 2016); segundo, se estableció una carga de sólidos totales de 6% en el reactor (Parra-Orobio, y otros, 2015). Dicha composición fue determinada de la siguiente manera

(1)

(Ecuación 3)

$$ST (g) = \%_{STd} * \%_{STr} * MT_S$$

Dónde:

$\%_{STd}$ = Sólidos totales del sustrato definido por el tratamiento Tabla 12.

$\%_{STr}$ = Sólidos totales recomendado por tratamiento (6% valor constante)

MT_S = Masa total de cada sustrato (g)

Nota: Sustrato se considera a los componentes de la mezcla.

Tabla 12

Tratamientos valorados según ST de los sustratos.

Tratamiento	Sustratos	
	Estiércol (%ST)	Lacto suero (%ST)
1	80	20
2	20	80

3	50	50
----------	----	----

(2)

(Ecuación 4)

$$SV(g) = ST(g) * SV_{Sustrato}(\%)$$

$ST(g)$ = Sólidos totales en gramos. (Ecuación 3)

$SV_{Sustrato}$ = Sólidos volátiles de cada sustrato. (Ecuación 2)

(3)

(Ecuación 5)

$$M_{Ts} = ST(g) / ST_{Sustrato}(\%)$$

$ST(g)$ = Sólidos totales en gramos. (Ecuación 3)

$ST_{Sustrato}$ = Sólidos totales de cada sustrato ((Ecuación 1)

(4)

Para cumplir con una relación inóculo-sustrato de 0,5 $SV_{inóculo} / SV_{sustrato}$ como lo recomienda la norma alemana (Verein Deutscher Ingenieure-VDI 4630, 2016), se realiza lo siguiente:

(Ecuación 6)

$$SV_{mix} = \sum SV(g)$$

Nota: Se realiza la sumatoria de los sólidos volátiles (g) (Ecuación 4) de cada sustrato usado en la mezcla.

(4.1)

(Ecuación 7)

$$M_{Tinóculo}(g) = \frac{SV_{mix}}{(R_{SVi/SVs} * ST_{inóculo} * SV_{inóculo})}$$

SV_{mix} = Sumatoria de los $SV(g)$ de cada sustrato.

$R_{SVi/SVs}$ = Valor constante (0,5) – Relacion $SV_{inóculo}/SV_{sustrato}$

$ST_{inoculo}$ = Sólidos totales del inóculo (%). (Ecuación 1)

$SV_{inoculo}$ = Sólidos volaátiles del inóculo (%). (Ecuación 2)

(4.2)

(Ecuación 8)

$$ST_{inoculo}(g) = ST_{inoculo} * M_{Tinoculo}$$

$M_{Tinoculo}$ = Masa total del inóculo. (Ecuación 7)

$ST_{inoculo}$ = Sólidos totales del inóculo (%). (Ecuación 1)

(4.3)

(Ecuación 9)

$$SV_{inoculo}(g) = SV_{inoculo} * ST_{inoculo}(g)$$

$SV_{inoculo}$ = Sólidos volátiles del inóculo (%). (Ecuación 2)

$ST_{inoculo}(g)$ = Sólidos totales en gramos. (Ecuación 8)

(5)

(Ecuación 10)

$$M_{mix} = \sum M_{Ts}$$

M_{Ts} = masa total de cada sustrato.

(6)

(Ecuación 11)

$$M_{agua} = M_{Ts} - M_{mix}$$

M_{mix} = Masa total de la mezcla. (Ecuación 10)

MT_S = Masa total de cada sustrato (g)

(7)

(Ecuación 12)

$$M_{Tr} = M_{mix} + M_{Tinóculo}(g)$$

M_{mix} = Masa total de la mezcla (Ecuación 10).

$$M_{Tinóculo}(g) = \text{Masa total del inóculo}$$

(Ecuación 13)

$$ST_{C/REACTOR} = \frac{\sum ST(g) + ST_{inóculo}(g)}{M_{Tr}}$$

$ST(g)$ = Sólidos Totales (g) de cada sustrato. (Ecuación 3)

$ST_{inóculo}(g)$ = Sólidos totales de inóculo . (Ecuación 8)

$M_{Tr}(g)$ = Masa total para reactores. (Ecuación 12)

De tal manera, se comprueba que cada tratamiento cumpla el parámetro de menor o igual al 6%, de sólidos totales, en toda la mezcla.

Finalmente, las masas de cada uno de los sustratos usados (Ecuación 5), el agua (Ecuación 11) y del inóculo (Ecuación 7), es determinado de tal manera que se conoce la masa que ocupará cada reactor. En la Tabla 13 se muestra la composición exacta de cada uno de los tratamientos.

Tabla 13

Composición de cada uno de los tratamientos.

SUSTRATOS	TRATAMIENTO 1	TRATAMIENTO 2	TRATAMIENTO 3	TRATAMIENTO 0
AGUA (ml)	13.9	8.3	11.1	0
INÓCULO (g)	78.2	78.1	78.1	100
ESTIERCOL (g)	5.1	1.2	3.1	0
LACTOSUERO (ml)	3	11.8	7.5	0

Para conseguir significación estadística, cada tratamiento se probó en experimentos de lotes por triplicado. Seguido de esto, se selló la tapa con silicón caliente y parafina para garantizar la hermeticidad. Se colocaron los reactores en la incubadora y se programó para que la temperatura se mantenga a 34 °C +/- 1 de acuerdo al rango mesófilo para procesos biológicos.



Figura 13 Reactor listo en incubadora.

Para determinar sólidos totales iniciales se usó:

(Ecuación 14)

$$ST_{inicial} = (W_{inóculo} * ST_{inóculo}) + (W_{estiércol} * ST_{estiércol}) + (W_{suero} * ST_{suero})$$

Dónde:

W = *Peso que se usó por tratamiento de cada uno de los sustratos* (Tabla 13)

ST = *Sólidos totales de cada uno de los sustratos.* (Tabla 14)

Para determinar sólidos volátiles iniciales se usó:

(Ecuación 15)

$$SV_{inicial} = (W_{inoculo} * ST_{inoculo} * SV_{inoculo}) + (W_{estiércol} * ST_{estiércol} * SV_{inoculo}) + (W_{suero} * ST_{suero} * SV_{inoculo})$$

Dónde:

W = Peso que se usó por tratamiento de cada uno de los sustratos. (Tabla 13)

ST = Sólidos totales de cada uno de los sustratos. (Tabla 14)

SV = Sólidos volátiles de cada uno de los sustratos. (Tabla 14)

3.4. Medición de Metano.

Los gases, producto de la digestión, fueron llevados a una probeta a través de mangueras. Para capturar el dióxido de carbono del biogás, la probeta se rellena diariamente, hasta 100 ml, con una solución de hidróxido de sodio 2 molar, con ayuda de una jeringuilla y una manguera (*Figura 14*) (Van Loosdrecht, Nielsen, Lopez-Vazquez, y Brdjanovic, 2016). Por desplazamiento de volúmenes, el gas quedó contenido en la probeta y fue registrado de lunes a viernes entre las 15:00 y las 17:00, del día 1 al 39. En la *Figura 14* se muestra el diagrama del sistema.

Una vez realizada las mediciones, los valores registrados fueron transformados a condiciones normales, a través de la siguiente ecuación:

(Ecuación 16)

$$V_{tr,N} = V * \frac{(p - p_w) * T_N}{P_N * T}$$

Dónde:

$V_{tr,N}$ = Volumen del gas en condiciones normales.

V = Volumen del gas en ml

p = Presión del gas al momento de la medición.

p_w = Presión del vapor de agua en función a la temperatura de ambiente.

$T_N =$ Temperatura normal; $T_N = 273 K$

$P_N =$ Presión normal; $p_N = 1013 hPa$

$T =$ Temperatura de la fermentación del gas o del ambiente en K.

(Ecuación 17)

$$P_w = 6,11231 * e^{(17,5043 * T_c / 241,2 + T_c)}$$

Dónde:

$T_c =$ Temperatura del gas, al momento de medir en °C.

$p_w =$ Presión del vapor de agua en función a la temperatura de ambiente hPa.

Tomado de (Verein Deutscher Ingenieure-VDI 4630, 2016)

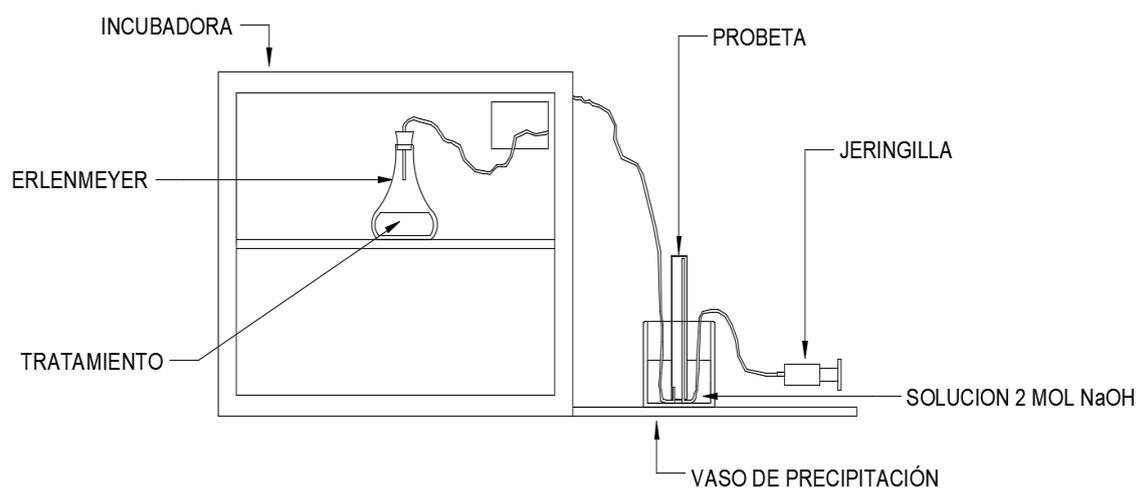


Figura 14 Sistema de producción de biogás.

4. Capítulo IV: Resultados y Discusión

4.1. Resultados

El presente capítulo plantea los resultados alcanzados durante la investigación, los cuales se disponen en función del cumplimiento de los objetivos del presente estudio.

4.1.1. Caracterizar los sustratos de estudio antes y después de la digestión anaerobia

Se determinaron las condiciones iniciales de cada sustrato utilizado (Ver Tabla 14) y las condiciones con las que empezaron los tratamientos. De cada uno de estos, se realizó un análisis por triplicado, usando la metodología anteriormente descrita en la página 38.

Tabla 14

Caracterización de los sustratos

Sustratos	Wdish (g)	Wsample (g)	Wtotal (g)	Wvolatile (g)	Sólidos totales (%)	Sólidos Volátiles (%)	pH	DQO (mg/l O ₂)
L1	20,6	45,1	22,74	20,75	8,73%	92,99%		
L2	23,85	48,85	26,1	23,98	9,00%	94,22%	4,25	124000
L3	24,66	49,39	26,75	24,8	8,45%	93,30%		
PROMEDIO LACTO SUERO (L)					8,73%	93,50%		
E1	22,22	47,22	26,4783	22,74	17,03%	87,79%		
E2	23,54	48,54	30,368	24,14	27,31%	91,21%	7,62	143000
E3	22,9	47,9	27,4551	23,45	18,22%	87,93%		
PROMEDIO ESTIÉRCOL (E)					20,86%	88,98%		
I1	38,33	63,35	39,27	38,5177	3,76%	80,03%		
I2	40,41	65,43	41,33	40,5921	3,68%	80,21%	5,25	140000
I3	38,98	58	39,75	39,1373	4,05%	79,57%		
PROMEDIO INÓCULO (I)					3,83%	79,94%		

Los valores iniciales de cada tratamiento en cuestión de ST y SV fueron encontrados utilizando la (Ecuación 14) y la (Ecuación 15) (Ver Tabla 15). Por otra parte, en el caso del DQO y pH, la medición se desarrolló con normalidad (Ver Tabla 16).

Tabla 15

Sólidos Totales y Volátiles iniciales.

Tratamientos	UNIDAD	T1	T2	T3	T0
INÓCULO	g	78,17	78,08	78,14	100
ESTIÉRCOL	g	5,05	1,22	3,11	0
LACTO SUERO	g	3,03	11,77	7,47	0
TOTAL ST	g	4,31	4,27	4,29	3,83
TOTAL SV	g	3,58	3,58	3,58	3,06
TOTAL ST	%	5,0%	4,7%	4,8%	3,8%
TOTAL SV	%	83,0%	83,7%	83,4%	79,9%

La Tabla 14 contiene las características de los sustratos usados en el presente estudio. Se observa que el sustrato con mayor proporción de sólidos totales y DQO es el estiércol y la mayor cantidad de sólidos volátiles pertenece al suero. Mientras que, el pH de los sustratos determina que el suero es el más ácido, seguido por el inóculo, con 4.25 y 5.25 respectivamente. Una vez explicado los sustratos a usar se preparan las mezclas que se utilizaron durante la digestión. En cuanto a los sólidos volátiles, la Tabla 15 señala que el tratamiento con mayor porcentaje es el tratamiento 3 y el tratamiento con menor cantidad es el 0. Cabe recalcar que, a pesar que el tratamiento 1 es el que mayor porcentaje presentó, no está considerablemente distante del tratamiento 2 y 3, con 83.7 y 83.4 respectivamente. Por otro lado, con respecto a los sólidos totales, como ya se explicó anteriormente, se intentó mantener una concentración de 6%, sin embargo, el tratamiento que más se acercó a este requerimiento fue el tratamiento 1. Por el contrario, el tratamiento con menor cantidad de sólidos totales fue el 0, seguido por el tratamiento 2 y el tratamiento 3, con 3.8, 4.7 y 4.8 respectivamente.

Tabla 16

Valores iniciales por tratamiento de DQO y pH

Tratamientos	pH	DQO (MG/L) O2	Media DQO inicial
T1	T1.1	5,75	42666
	T1.2	6,5	
	T1.3	7,57	
T2	T2.1	5,66	75000
	T2.2	7,11	

	T2.3	7,1	79000	
T3	T3.1	8,23	87000	
	T3.2	6,7	81000	90666
	T3.3	6,52	104000	
T0	T0.1	6,5	103000	
	T0.2	6,21	34000	64000
	T0.3	6,32	55000	

De tal manera, se conoció las condiciones iniciales del proceso anaerobio, que proporcionó información necesaria para ajustar los reactores a condiciones idóneas, como es el caso del pH que fue ajustado a condiciones ideales con ayuda de hidróxido de sodio y ácido clorhídrico (Ver Tabla 16). Al término de la medición de metano, de cada tratamiento se determinó sólidos totales, volátiles, pH y DQO, como ya se describió anteriormente en la sección de metodología ubicada en la pág. 38.

Tabla 17

Valores finales por tratamiento.

TRATAMIENTOS	T0			T1			T2			T3		
	T0.1	T0.2	T0.3	T1.1	T1.2	T1.3	T2.1	T2.2	T2.3	T3.1	T3.2	T3.3
Wdish	37,29	32,50	39,37	33,88	32,33	41,79	36,29	38,53	37,23	38,55	39,86	39,90
Muestra	25,09	25,23	25,08	25,40	25,48	25,44	25,29	25,02	25,07	25,07	25,43	25,3
Wsample	62,38	57,73	64,45	59,28	57,81	67,24	61,59	63,56	62,30	63,62	65,29	65,20
Wtotal	39,99	33,77	40,35	35,69	33,15	42,76	36,96	39,60	38,09	39,78	40,94	40,90
Wvolatile	39,13	33,11	40,03	35,16	32,72	42,27	36,45	38,84	37,57	39,02	40,31	40,31
Sólidos Totales	11%	5%	4%	7%	3%	4%	3%	4%	3%	5%	4%	4%
Sólidos Volátiles	32%	52%	33%	29%	53%	51%	76%	70%	60%	61%	58%	59%
pH_{final}	13.4	4.7	8.21	13.3	5.54	5.5	8.85	7.88	8.6	5.3	4.6	5.36
DQO (mg/l O₂)_{final}	33000	55000	30000	26000	30000	46000	81000	64000	45000	45000	8000	65000
Media pH_{final}		8.7			8.1			8.4			5.0	
Media DQO (mg/l O₂)_{final}		39333			34000			63000			63333	
Media ST		7%			5%			3%			4%	
Media SV		39%			44%			69%			60%	

En relación con el pH final, en la Tabla 17 se observa que el tratamiento más ácido fue el 3 con 50% de suero y el tratamiento más alcalino fue el 1 con 20 % de suero, con valores de 5.0 y 8.7 respectivamente. Asimismo, en el caso de los sólidos totales, el tratamiento con mayor cantidad fue el 0 y el tratamiento con menor cantidad fue el 2, con cantidades de 7 y 3 % respectivamente.

4.1.2. Determinar la relación estiércol-suero más eficiente para generar metano.

Se evaluaron tres tratamientos, distinguidos por la combinación de sustratos en términos de sólidos totales (Ver Tabla 12), manteniendo una constante de 6% de sólidos totales en cada uno, adicionalmente se fijó una relación S/I (SVsustrato/SVinóculo) menor o igual a 0,5.

La medición se realizó de lunes a viernes, la primera se llevó a cabo un viernes, motivo por el cual no se pudo medir durante el fin de semana, sin embargo, los resultados registrados el día (lunes), no sobrepasaron los 40 ml de reserva en el sistema de medición por desplazamiento volumétrico, por tal razón la producción de gas durante el fin de semana no se vio afectada. El día N°5 el volumen del tratamiento 1.1 disminuyó dos milímetros. A partir del día N°4 se consideró que el tratamiento 2.3 falló, debido a que presentó generación de gas demasiado alta, lo que indicó que el sistema presentaba fugas y lo que se estaba midiendo tenía la probabilidad de ser aire más no biogás.

Después de cuarenta y un días de medición se determinaron los datos, (producción acumulada y específica de metano, sólidos volátiles, sólidos totales y DQO final), de todos los tratamientos. La *Figura 15* muestra la producción de metano acumulada y normalizada obtenida a lo largo de la experimentación.

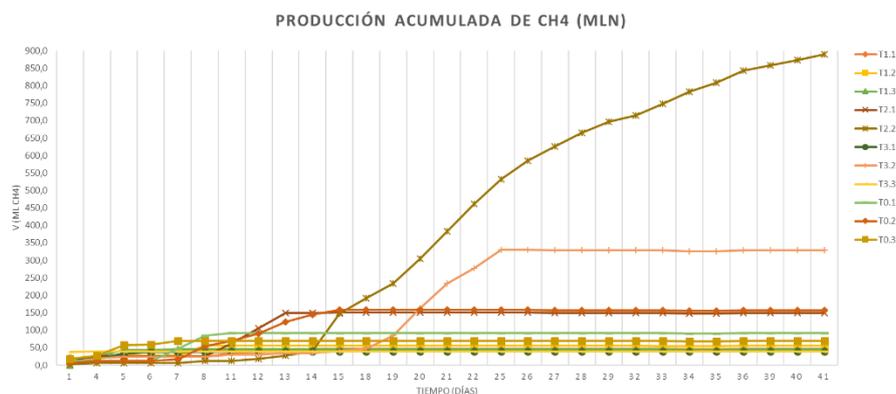


Figura 15 Producción acumulada de metano (ml_N)

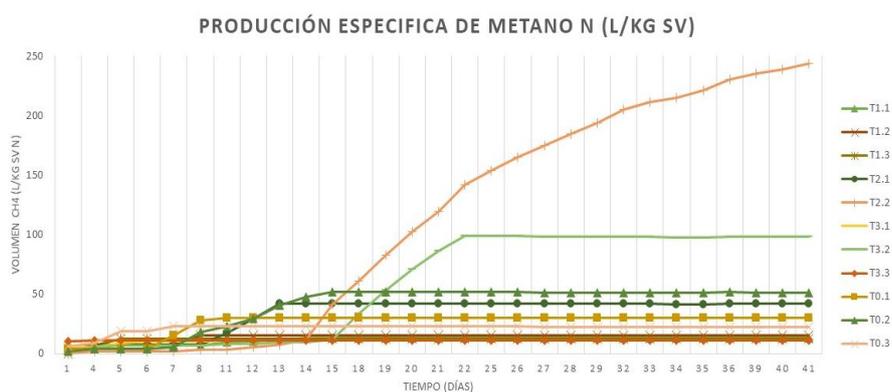


Figura 16 Producción específica de metano (l/kg SV)

Por otra parte, la Tabla 18 presenta la producción acumulada y específica de metano en el día cuarenta y uno, junto con el porcentaje de sólidos volátiles y DQO removido a lo largo de la digestión.

Tabla 18

Resultados medición.

Tratamientos	Producción de metano (l _N)	Producción Específica de metano (l/kg SV _N)	% Sólidos Volátiles Removidos	% Remoción DQO
T1.1	0.0463	12,9575	54%	57%
T1.2	0.0551	15,4023	30%	-30%
T1.3	0,0446	12,4685	32%	-2%

T2.1	0,1495	41,8077	8%	-31%
T2.2	0,8902	248,8905	13%	24%
T3.1	0,0394	10,9992	22%	43%
T3.2	0,3288	91,9048	25%	48%
T3.3	0,0394	10,9992	24%	1%
T0.1	0,0918	30,0108	48%	38%
T0.2	0,1574	51,4471	28%	68%
T0.3	0,0691	22,5795	47%	-62%

Una vez determinado los valores de producción de metano, se procedió a descartar datos, de acuerdo a la norma (Verein Deutscher Ingenieure-VDI 4630, 2016), donde establece que la diferencia entre los resultados de un mismo tipo de reactor debe ser 15% del promedio, así como también establece que si el tratamiento manifiesta una desviación mayor en dos de las repeticiones, debe excluirse. En la Tabla 19 se presenta los tratamientos seleccionados después de los descartes respectivos.

Tabla 19

Resultados depurados.

<i>Tratamientos</i>	<i>Producción de metano (I_N)</i>	<i>Producción Específica de metano (I/kg SV_N)</i>	<i>% Sólidos Volátiles Removidos</i>	<i>% Remoción DQO</i>
T1.1	0,0463	12,9575	54%	57%
T1.3	0,0446	12,4685	32%	-2%
T3.1	0,0394	10,9992	22%	48%
T3.3	0,0394	10,9992	24%	38%
T0.1	0,0918	30,0108	48%	68%
T0.3	0,0691	22,5795	47%	45%

Por consiguiente, como se puede apreciar en la Tabla 19, el tratamiento dos se eliminó en su totalidad debido a que, en primer lugar durante la digestión se descartó uno de los tres ensayos, ya que presentaron anomalías en la medición y en segundo lugar entre las repeticiones que quedaron no se mostró una diferencia mayor al 15% del promedio como establece la norma (Verein Deutscher Ingenieure-VDI 4630, 2016). La *Figura 17* manifiesta la producción acumulada de metano de cada uno de los tratamientos, que se mantienen durante el tiempo de digestión. Se puede destacar en la figura, la repetición tres del blanco, claramente es la que mayor producción de metano obtuvo, a pesar de haber sido pre-digerida.

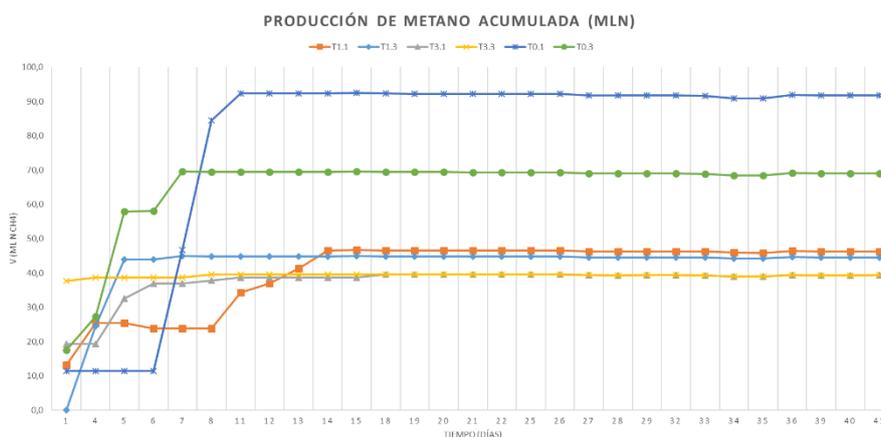


Figura 17 Comportamiento de la actividad metanogénica (ml_N CH₄)

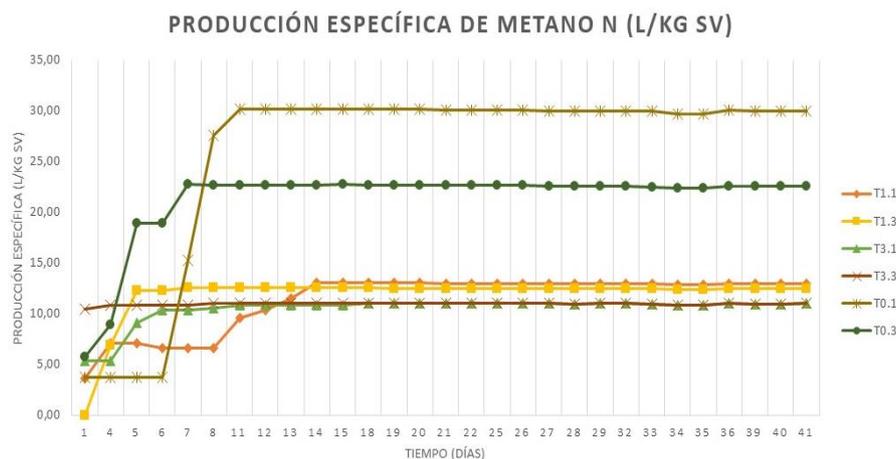


Figura 18 Producción específica de metano de tratamientos depurados N (l/kg SV)

Los resultados registrados en la *Figura 17* muestran que los valores significativos se obtuvieron pasados los cuatro días. Los valores de producción de metano se asemejan durante el séptimo día con valores entre 35 y 45 ml CH₄ en los tratamientos 1.3, 3.1, 3.3, 0.1. Esta tendencia cambia en el octavo día donde el blanco (100% inóculo) aumenta hasta 85 ml. En adelante, desde el vigésimo día la producción se mantiene hasta el vigésimo sexto día donde cambia por decimales, debido a cambios de presión vinculada con la normalización de valores. Finalmente, el tratamiento 1.1 y 1.3 con una relación 80:20, estiércol-suero correspondientemente, obtuvo 46,3 y 44,6 ml respectivamente, el tratamiento 3.1 y 3.3 con una relación 20:80, estiércol-suero proporcionalmente, obtuvo 39,4 y 39,4 ml respectivamente. De manera que, es evidente que el tratamiento con mejores resultados para generar biogás es el tratamiento uno.

Tabla 20

Promedio de los tratamientos estudiados.

RELACIÓN ENTRE LOS TRATAMIENTOS ESTUDIADOS				
Tratamientos	Producción de metano (l _N) vs	% SV Removidos	Producción Específica de Metano (L _N /kg SV)	%DQO Removido
T1	0,045	43%	12,713	27%

T3	0,039	23%	10,999	43%
T0	0,080	48%	26,295	57%

Tabla 21

Valores del comportamiento inicial y final de sólidos volátiles.

Tratamientos	SV inicial	SV final	% de remoción
1	83%	44%	39%
2	83,7%	69%	15%
3	83,4%	60%	24%
0	79,9%	39%	41%

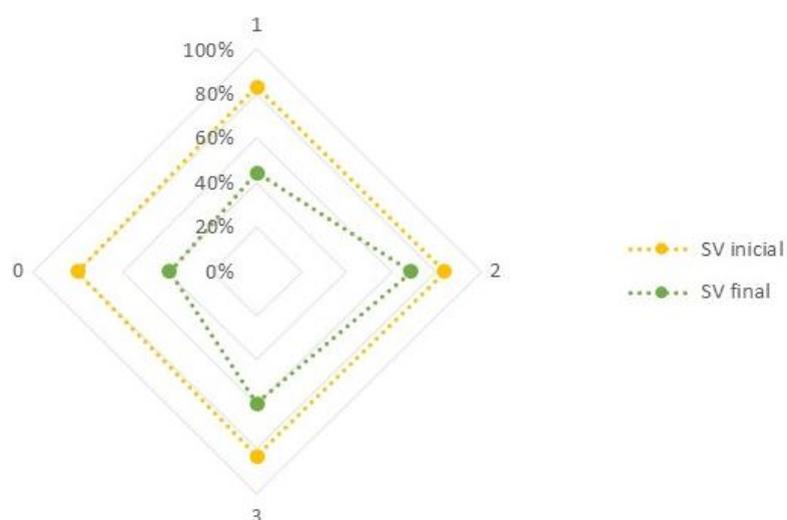


Figura 19 Comportamiento final e inicial de sólidos volátiles.

Asimismo, con relación a los sólidos volátiles consumidos durante la digestión, como muestra la *Figura 19*, tanto el tratamiento 1 con 20% de suero como el 0 con 0% de suero, degradaron la mayor cantidad de sólidos volátiles, con valores de 83 a 44% y de 79.9 a 39% respectivamente. Seguido por el tratamiento 3 con 50% de suero, con valores de 83.4 a 60% y, por ende, el tratamiento 2, corresponde al tratamiento con menor degradación de sólidos volátiles, con cantidades de 83.7 a 69%, lo mismo que es un porcentaje de remoción del 15%.

Con el fin de justificar, la variación de concentración de lacto suero durante la investigación, se llevó a cabo un ANOVA. El mismo que cuenta con los siguientes resultados:

Tabla 22
ANOVA de metano (ml_N).

ANOVA					
<i>FV</i>	<i>SC</i>	<i>gl</i>	<i>CM</i>	<i>F</i>	<i>P-valor</i>
Modelo	2,0E-03	2	9,8E-04	11,37	0,0398
Tratamientos	2,0E-03	2	9,8E-04	11,37	0,0398
Error	2,6E-04	3	8,6E-05		
Total	2,2E-03	5			

El análisis estadístico determina que, el valor de P-value debe ser inferior al nivel de significancia estadística de 0.05, lo cual determina que las variaciones entre los factores en los experimentos produjeron un efecto estadísticamente significativo sobre los resultados de esos ensayos. Asimismo, determina si hay correlación entre los factores y niveles. En este caso, el valor de P-value corresponde a 0,0398, lo cual es inferior a 0.05, lo que significa que, distintas concentraciones de suero lácteo influyen en la generación de metano.

Tabla 23
Test Tukey.

Tratamientos	Medias	N	E.E.		
3	0,04	2	0,01	A	
1	0,05	2	0,01	A B	
0	0,08	2	0,01	B	

Adicionalmente, se llevó a cabo el análisis de Tukey donde se colocó tanto los tratamientos 3 (50% Estiércol: 50% Lacto suero) y 1 (80% Estiércol: 20% Lacto suero) como los tratamientos 1 (80% Estiércol: 20% Lacto suero) y 0 (100% inóculo) en un mismo bloque, lo cual muestra que ambos conjuntos no presentaron diferencias estadísticas significativas, mientras que para el tratamiento 3 con respecto al 0 se muestra mayor diferencia significativa. Por otro lado, el tratamiento 0 (100% inóculo) se considere el más eficiente.

En cuanto a la producción específica de metano, tomando en cuenta los datos de la Tabla 19, se observan los siguientes resultados:

Tabla 24

Anova Producción específica de metano

ANOVA					
<i>FV</i>	<i>SC</i>	<i>gl</i>	<i>CM</i>	<i>F</i>	<i>P-valor</i>
Modelo	280,92	2	140,26	15,19	0,0269
Tratamientos	280,92	2	140,46	15,19	0,0269
Error	27,73	3	9,24		
Total	308,65	5			

El análisis estadístico determina que, si el P-valor es inferior al nivel de significancia de 0.05, se rechaza la hipótesis nula y se considera que las medias son diferentes. En este caso, el P-valor corresponde a 0,0269, lo mismo que nos indica que hay significancia estadística entre los tratamientos.

Tabla 25

Tukey producción específica de metano.

Tratamientos	Medias	N	E.E.
3	11,00	2	2,15 A
1	12,71	2	2,15 A
0	26,30	2	2,15 B

Por otra parte, mediante la estadística de Tukey se determina que, los tratamientos 3 (50% Estiércol: 50% Lacto suero) y 1 (80% Lacto suero: 20% Estiércol) presentan diferencias estadísticamente significativas. Mientras que, el tratamiento 0 (100% inóculo) se considera el tratamiento más eficiente.

4.1.3. Analizar la remoción de materia orgánica de los lodos al finalizar el proceso de digestión anaerobia.

Se evaluó el rendimiento de remoción de DQO, *Figura 20*, se observa un aumento del 57% hasta un 68% del rendimiento de remoción de DQO, que corresponde al T1.1 y T0.1 respectivamente. Mientras que, en el caso del T1.2, T1.3, T2.1 y T0.2 se presenta el incremento del DQO de 23000, 45000, 62000 y 34000 a 30000, 46000, 81000 y 55000, respectivamente Tabla 26.

Tabla 26
Resultados de DQO

Tratamientos	DQO (mg/l) O ₂		
	Inicial	Final	% DE REMOCIÓN
T1.1	60000	26000	57%
T1.2	23000	30000	-30%
T1.3	45000	46000	-2%
T2.1	62000	81000	-31%
T2.2	84000	64000	24%
T2.3	79000	45000	43%
T3.1	87000	45000	48%
T3.2	81000	80000	1%
T3.3	104000	65000	38%
T0.1	103000	33000	68%
T0.2	34000	55000	-62%
T0.3	55000	30000	45%

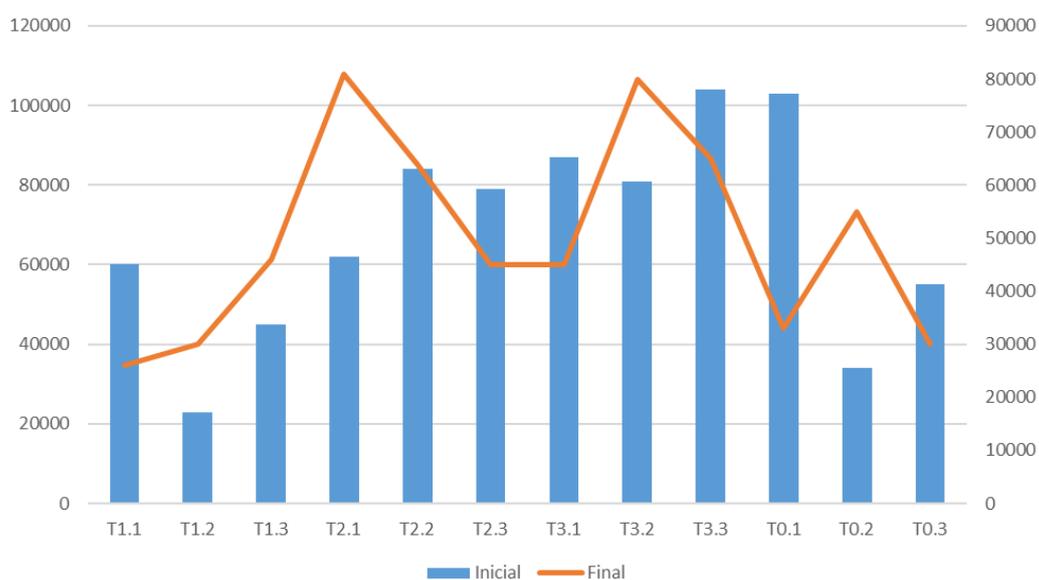


Figura 20 Rendimiento de eliminación de DQO

Adicionalmente, para evaluar de manera general cada tratamiento se desarrolló la siguiente tabla, a partir de los promedios de las réplicas presentes en la Tabla 26.

Tabla 27

DQO al comienzo y al final del estudio.

Tratamiento	DQO inicial	DQO final
1	42666	34000
2	75000	63333
3	90666	63333
0	64000	39333

Tabla 28

Comportamiento del DQO.

Tratamiento	DQO inicial	DQO final	% Remoción	(%) Suero Lácteo
1	42666,667	34000,000	20%	20
2	75000,000	63333,333	16%	80
3	90666,667	63333,333	30%	50
0	64000,000	39333,333	39%	0

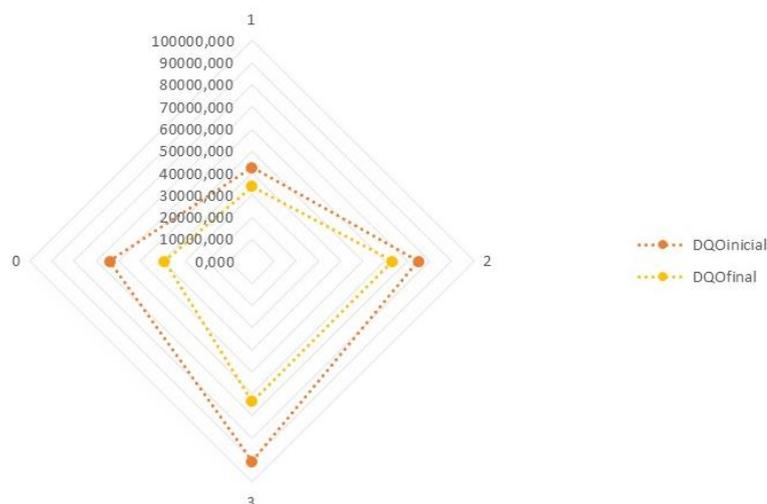


Figura 21 DQO inicial y final.

En la *Figura 21* se muestra la condición del DQO al comienzo y al final del estudio. El porcentaje de remoción del DQO máximo se encuentra en el tratamiento 0, con una mezcla de 0% de suero lácteo. El tratamiento 3 con 50% de suero lácteo manifiesta un cambio apreciable en los niveles de remoción de

DQO. Por otro lado, el resto de tratamientos con 80% (T2) y 0% (T0) de suero lácteo revelan poca degradación de la materia orgánica, con valores de eliminación de 16 y 20 % respectivamente.

Por otra parte, en la *Figura 22* el porcentaje de remoción de sólidos volátiles y DQO son similares en el tratamiento 2 con 80% de suero lácteo y 0 con 0% de suero lácteo, con una media de variación de 1.5%. Mientras que, difieren en gran proporción en los valores del tratamiento 1 con 20% suero lácteo y 3 con 50% de suero lácteo. Asimismo, como se observa en la figura, la remoción de los sólidos volátiles determina que tanto el tratamiento 1 como el 0 poseen mayor capacidad de degradación de materia orgánica y, por ende, producción de metano. Por otro lado, el DQO define que los tratamientos más óptimos para degradar materia orgánica corresponden al tratamiento 0 y 3.

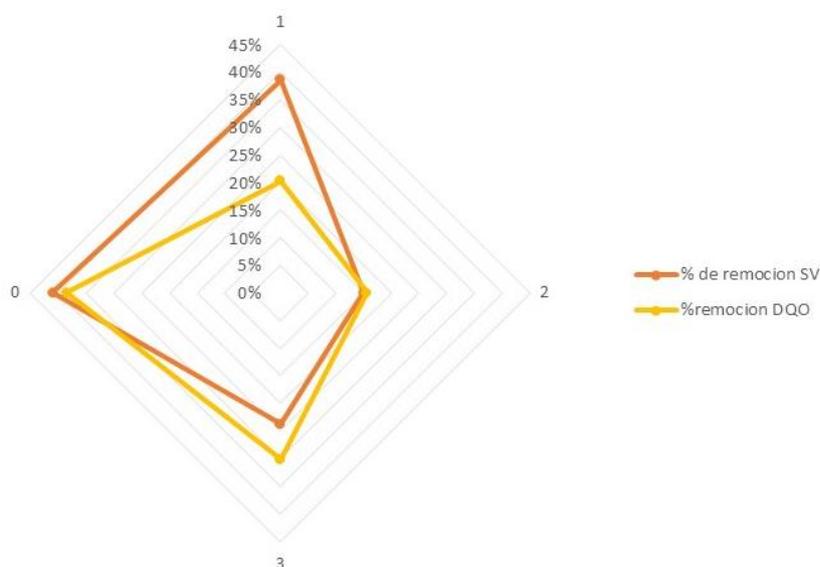


Figura 22 Comparación de la remoción de DQO y SV.

4.2. Discusión

La presente sección analiza las causas o razones de los resultados alcanzados durante la investigación, explican los mismos y comparan con lo esperado.

4.2.1. Caracterizar los sustratos de estudio antes y después de la digestión anaerobia

Se optó por una digestión mesofílica (35°C) debido a que según (de Mes, Stams, Reith, y Zeeman, 2003), la tasa de producción de metano con mayor rendimiento alcanza a un máximo referente de 35 a 37 °C. En cuanto al pH, según (Lettinga y Haandel, 1993), la metanogénesis nada más se ejecuta cuando el pH es neutro. Para valores de pH contrarios (6.5 - 7.5), la tasa de producción de metano declina, debido a lo cual, la producción metanogénica fue deficiente. Asimismo, los niveles de pH bajos inhiben la actividad del microorganismo, produciendo la acumulación de ácido acético y H₂. Cuando incrementa la presión parcial del H₂, las bacterias que desintegran el ácido propiónico serán suprimidas, provocando una severa acumulación de ácidos grasos volátiles. (de Mes, Stams, Reith, y Zeeman, 2003) mencionan que la aglomeración de ácidos grasos volátiles tendrá como consecuencia el descenso del pH, en cuyas circunstancias la metanogénesis se detiene, lo que ocasiona una disminución del pH. Por tal motivo, el pH fue regulado a condiciones entre 5.66 a 8.23, sin embargo no se neutralizó con una solución tampón, como sugiere (Camino, Riggio, y Rosso, 2012), como bicarbonato de sodio (1 mol/l).

Por otra parte, según (FAO/PNUD, 1977), la digestión anaerobia se ejecuta adecuadamente si los sustratos incluidos en la fermentación contienen entre 7 y 9 % de sólidos totales. Puesto que, una dilución reducida incrementa la viscosidad a tal punto que inhibe la multiplicación bacteriana, en el caso que esta sea desmedida, se convierte automáticamente en una estratificación, y se procede a la agitación continua. En consecuencia, el pH y el amonio alcanzan niveles críticos. Debido a lo cual, uno de los requerimientos en el presente estudio, fue mantener un porcentaje de sólidos totales de 6%.

En lo que se refiere a la relación sustrato/inóculo según los resultados de (Parra-Orobio, y otros, 2015) los tratamientos evaluados con un relación menor a 0,5 muestran mayor rendimiento de metano. Como reporta (Lü, Hao, Zhu, Shao, y He, 2012) el incremento de la relación S/I, causa una disminución de microorganismos degradadores, lo cual estimula a las aglomeraciones de AGV's. Según (Zhou, y otros, 2011), con una relación superior de 0.25, la biodegradabilidad se reduce. De tal manera que, para el presente estudio

mantuvo una relación I/S de 0,5 en cada uno de los tratamientos, como sugiere (Verein Deutscher Ingenieure-VDI 4630, 2016), donde asegura que, se da lugar a errores, si la materia prima con relación al inóculo es muy baja, o por el contrario, se podría apreciar condiciones acidificantes, si los tratamientos presentan una cantidad de materia prima muy alta con relación al inóculo, debido a que, existe aglomeración de ácidos en la fase hidrolítica, lo cual provoca un exceso en la capacidad tampón del tratamiento y por ende, una reducción del pH.

4.2.2. Determinar la relación estiércol-suero más eficiente para generar metano.

La producción específica de metano de T1, T3 y T0 fue de 12.71, 10.99 y 26.295 l/kg SV respectivamente, teniendo el T1 20% de lacto suero y T3 80% de lacto suero. Con respecto al pH, para los tratamientos 1 y 0, los resultados fueron 6.6 y 6.3 respectivamente, valores dentro de los óptimos. Ambos, muestran condiciones finales con respecto a la media del pH de 8. Esto significa que dichos reactores permanecieron en medios alcalinos, lejos del rango óptimo y por ende no generaron como se esperaba. Por otro lado, el tratamiento tres a pesar de haber empezado su digestión con un pH óptimo (7.1) y una producción de metano estable, a los 18 días de funcionamiento, se detuvo. Tal pérdida de eficiencia se generó por la caída del pH, el mismo que fue comprobado al final del proceso con un resultado de pH final de 5. (MacCarty, 1964) menciona que dicho desequilibrio generalmente va en compañía del incremento de los ácidos volátiles, lo que genera condiciones inoperables. Esto sucedió en vista de que, una de las réplicas del tratamiento tres fue irrupida por hidróxido de sodio durante la digestión, esto sucede debido a cambios de presión en el sistema. Por ende, la digestión no fue la esperada. Por otra parte, estos resultados difieren a los obtenidos por (Antonelli, y otros, 2016), donde con 80% de suero y 20% de inóculo, generaron 168 l/kg SV, así como (Camino, Riggio, y Rosso, 2012) que con una mezcla de distintos sustratos con una relación 1:1 (estiércol:suero), consiguieron una producción de metano de 155.75 l/kg SV.

Como determina (Kavacik y Bahattin, 2010), el lacto suero es un subproducto agroindustrial altamente biodegradable y produce un valioso aporte energético, en forma de gas metano, una vez digerido. Sin embargo, presenta dificultades técnicas como: tiende a acidificar rápidamente, tiene elevadas cantidades de carbohidratos conducen a la proliferación de bacterias acidificantes, mientras que influye directa y negativamente sobre las bacterias metanogénicas. Por tal razón, durante la digestión del presente estudio se encontró mayor rendimiento de metano en el tratamiento cuya composición tienen niveles inferiores de lacto suero. Adicionalmente, (Gelegenis, Georgakakis, Angelidaki, y Mavris, 2007) mantiene similitud con el presente estudio, en cuestión a la producción de biogás, debido a que presenta una reducción de biogás, con el tratamiento que contiene 50% de suero, en comparación con el tratamiento que posee 25% de suero, el mismo que presenta una producción de biogás con mayor regularidad.

Habría que decir también, que la tasa de degradación del presente estudio, se puede valorar de acuerdo con la inclinación de la *Figura 23* (Verein Deutscher Ingenieure-VDI 4630, 2016), donde se observa que los resultados obtenidos *Figura 17*, son similares a las curvas planas que determinan una disponibilidad lenta de materia prima o una ligera inhibición. También, (Verein Deutscher Ingenieure-VDI 4630, 2016) reporta que sustancias que se degradan con dificultad (como: lignina, grasas, etc.) muestran una curva de producción de gas retardada. Se debe agregar que, si la forma de la curva no presenta una degradación normal y al término del estudio el pH muestra valores inferiores a 6.8, se necesita realiza una prueba de ácido acético. Si el resultado es mayor a 200 mg/l, dicha medición debe descartarse. Cabe recalcar, que aquella prueba no se evaluó en el presente estudio, a pesar de presentar valores inferiores de 6.8 en el pH final de los tratamientos evaluados. Sin embargo, si se efectuaron descartes durante el estudio, de acuerdo con el apartado 7.3.3 de validez de la medida de la norma (Verein Deutscher Ingenieure-VDI 4630, 2016)(Ver Tabla 19)

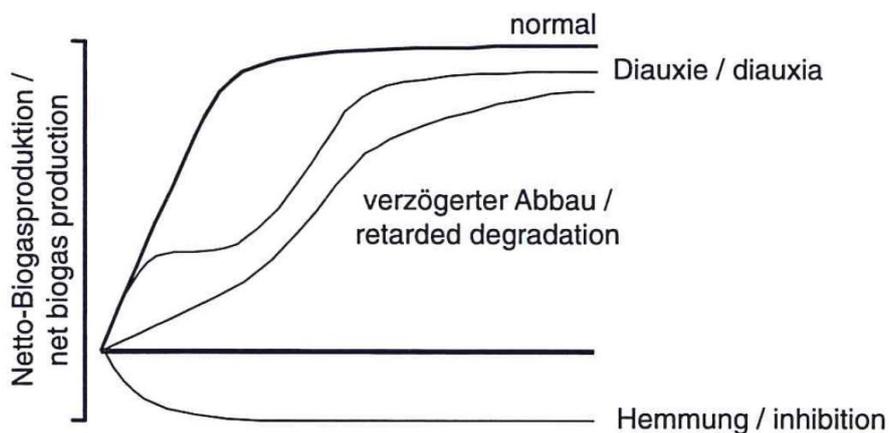


Figura 23 Curvas típicas de degradación.

Tomado de (Verein Deutscher Ingenieure-VDI 4630, 2016)

A menudo la concentración de sales se incrementa, de tal manera que llega a niveles tóxicos. Esto sucede cuando se necesita estabilizar el pH y para hacerlo se usa reactivos químicos como, hidróxido de sodio y ácido clorhídrico, los mismos que son formadores de sales. Esto puede ocasionar inhibición en la digestión, por lo general como menciona (Parkin y Owen, 1986) niveles de sodio entre 3500-5500 mg/l generan una inhibición moderada, mientras que niveles de 8000 mg/l propician una inhibición alta. (MacCarty, 1964) explica que 300 mg/l de potasio disminuye al 80% el efecto tóxico de 7000 mg/l de sodio. Es más, el efecto inhibitorio se eliminará totalmente si se adiciona 150 mg/l de calcio.

Igualmente, en el caso del análisis estadístico del coeficiente de correlación de Pearson, las mediciones son correctas, debido a que, la producción de metano demuestra ser los sólidos volátiles consumidos, esto es correcto, los sólidos volátiles determinan la cantidad de metano que puede generar un sustrato (Drosg, Braun, y Bochmann, 2013).

Asimismo, (Cardenas Cleves, Parra Orobio, Torres Lozada, y Vásquez Franco, 2016) reporta que es fundamental eliminar la mayor cantidad de oxígeno posible en los reactores, utilizando gases como: nitrógeno molecular (N_2), dióxido de carbono (CO_2), helio y mezclas entre sí, considerándose la combinación más utilizada $N_2:CO_2$ con porcentajes entre 70 y 80% para el N_2 y 20 y 30% para el CO_2 . (Koch, Bajón Fernández, y Drewes, 2015) demuestra un incremento del

20% en la producción de biogás con el uso de 20% de CO₂ para eliminar el oxígeno residual en los reactores antes de la incubación.

4.2.3. Analizar la remoción de materia orgánica de los lodos al finalizar el proceso de digestión anaerobia.

En lo que concierne a, la remoción de DQO durante la digestión, los resultados fueron inferiores a los reportados por (Rugele, y otros, 2013), donde se evaluó una digestión mesofílica con altas tasas orgánicas, sin inhibición ácida aparente, cuyo porcentaje de remoción de DQO fue de 59,8%, debido a la eliminación de grasas y proteínas. Por otra parte (Fernandez, Cuetos, Martínez, y Gómez, 2015), reporta una remoción del 87,4%, seguido por (Saddoud, Hassari, y Sayadi, 2007) que obtuvo una remoción del 79% en el tratamiento del suero usando un reactor anaeróbico de membrana con separación por fases.

(MacCarty, 1964) determina que un aumento de DQO puede ser la evidencia de condiciones desequilibradas en el sistema. Esto es relevante debido a que, en sistemas no continuos se podrían estabilizar las condiciones y, por ende, lograr mayor eficiencia.

Según los resultados redactados anteriormente, tanto la remoción de DQO como la remoción de sólidos volátiles definen al tratamiento 0 con 0% de suero lácteo como el mejor para consumo de materia orgánica. Sin embargo, cabe recalcar que, los tratamientos evaluados en el presente estudio no son considerados líquidos, como es en la mayoría de casos evaluados por el DQO, debido a que este es más efectivo con sustratos líquidos como aguas residuales (DBFZ, 2016).

Además, (Cavalho, Prazeres, y Rivas, 2013) sugiere que el uso de un reactor de dos fases para la degradación del DQO, en tratamientos con suero lácteo, muestran elevado potencial. Así como también, (Fang, 1991) determina que el uso de un lodo activado de tres etapas y un reactor anaerobio para la reducción de DQO, DBO y nitrógeno del suero lácteo, es efectivo. Por otra parte, (Rivas,

Prazeres, Carvalho, y Beltra, 2010) presenta que el uso de FeCl_3 o FeSO_4 a 250 ppm bajo condiciones alcalinas (pH. 8.5) reduce el DQO un 50%.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Entre los tratamientos evaluados se determina que, sin tomar en cuenta al blanco, el que posee mayor eficiencia en la producción de metano, corresponde al tratamiento uno, cuya composición establece menor cantidad (%ST) de lacto suero y mayor cantidad (%ST) de estiércol, el mismo que pudo haber sido útil como alimento del inóculo, en comparación con el tratamiento tres, que estaba compuesto por igual cantidad (%ST) de ambos sustratos. Evidentemente el tratamiento dos, que presentaba 80% de suero lácteo, no estaba generando biogás, debido a que no presenta un consumo de sólidos volátiles o DQO directamente proporcional a la producción de biogás.

Los resultados del presente estudio determinan que a mayor cantidad de lacto suero, menor producción de biogás e incremento de la DQO. Igualmente, el uso de hidróxido de sodio y ácido clorhídrico, para nivelar el pH, no fue apropiado en este estudio. Igualmente, con los resultados anteriormente expuestos se concluye que el tratamiento tres fue inhibido por acidificación.

Asimismo, los elementos de medición deben mantener una temperatura apropiada, es decir no tan distante de la temperatura a la que están los reactores, debido a que durante el proceso de digestión se presentaron problemas de regresión del hidróxido de sodio (sustancia usada para medir metano), por cambios de temperatura y disminución de presión. La disminución de presión se daba por la poco o escasa generación de biogás.

5.2. Recomendaciones

Para descartar resultados, se recomienda realizar una prueba de ácido acético y verificar que esto no supere los 200 mg/l. Si el equivalente los supera, será inmediatamente descartado.

Se recomienda que se mida el DQO, una vez que, el pH se encuentre en condiciones apropiadas para la digestión.

Se recomienda evaluar tratamientos similares con una relación S/I entre 0.25 a 1, para corroborar información bibliográfica y descartar posibles causas de inhibición.

Se sugiere, llevar a cabo un análisis químico con respecto a nitrógeno y carbono de los tratamientos para garantizar que el proceso anaerobio se lleve a cabo adecuadamente.

Para aumentar los niveles de producción de biogás, se recomienda controlar el pH, para que, en caso de ser necesario, reajustarlo.

Para elevar la producción de biogás, se recomienda evaluar tratamientos que incluya dentro de sus sustratos, glicerina, la misma que a partir de bibliografía se sabe que tiene una influencia directa, junto con materia prima agrícola, en la producción de biogás.

Para conseguir que se mantenga el pH en un rango efectivo durante la metanogénesis, se recomienda neutralizar las condiciones de pH con una solución tampón como bicarbonato de sodio.

Para evitar posible inhibición, se recomienda agregar una concentración de bentonita entre 0.15-0.45% en tratamientos que incluyan lípidos.

Para evitar el crecimiento acelerado de las bacterias acidificantes del suero lácteo, se recomienda autoclavar o hervir el suero lácteo antes de usar.

Se recomienda medir el pH de la solución alcalina (hidróxido de sodio 2 molar), en el momento de la medición, para determinar que la medición corresponde a metano, debido a que, el hidróxido de sodio en contacto con el CO₂ cambia el pH de la solución.

REFERENCIAS

- Chanfrau, J., Núñez Pérez, J., Lara Fiallos, M., Rivera Intriago, L., Trujillo Toledo, L., y Cuaran Guerrero, M. (2017). Valorización del suero de leche: Una visión desde la biotecnología. *Bionatura*, 2(4). doi:10.21931/RB/2017.02.04.11
- Ahring, B. K., Sandberg, M., y Angelidaki, I. (1995). *Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digestors. Applied Microbiology and Biotechnology*, 43(3), 559-565. doi:https://doi.org/10.1007/BF00218466
- Angelidaki, J., y Ahring, B. K. (1993). *Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia. Applied Microbiology and Biotechnology*, 38(4), 560-564. doi:https://doi.org/10.1007/BF00242955
- Antonelli, J., Lindino, C. A., Rodrigues de Azevedo, J. C., Melegari de Souza, S. N., Cremonese, P. A., y Rossi, E. (2016). *Biogas production by the anaerobic digestion of whey. Revista de Ciências Agrárias*, 39(3), 463-467. doi:http://dx.doi.org/10.19084/RCA15087
- Arango Bedoya, O., y Sanches e Sousa, L. (2009). TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA LÁCTEA EN SISTEMAS ANAEROBIOS TIPO UASB. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial.*, 7, 24 - 31. Recuperado el 20 de diciembre de 2018, de <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v7n2/v7n2a04.pdf>
- Bacocchi, R., Carnevale, E., Costa, G., Gavasci, R., Lombardi, L., Olivieri, T., . . . Zingaretti, D. (2013). *Performance of a biogas upgrading process based on alkali absorption with regeneration using air pollution control residues. Waste Management*, 2694-2705. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.022
- Badui Dergal, S. (2006). *Química de los Alimentos* (4 ed.). Nacaulpan de Juarez, México: Person. Addison Wesley. Recuperado el 22 de diciembre de 2018, de http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Libro-Badui2006_26571.pdf

- Barrena, M., Gamarra, O., Milla, M., Fellenberg, T., y Ordinola, C. (2017). *Optimization of biogas production at laboratory scale from bovine manure, lactosuero and totora. Optimización Biogas*, 60-66. doi:10.25127/indes.201502.007
- Bharathiraja, B., Sudharsanaa, T., Jayamuthunagai, J., Praveenkumar, R., Chozhavendhan, S., y Iyyappan, J. (2018). *Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 570-582. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.093>
- Bischofsberger, W., Dichtl, N., Rosenwinkel, K., Seyfried, C., y Bohnke, B. (2005). *Anaerobtechnik. Berlin: Springer*.
- Borja, R., y Rincon, B. (2011). *Biogas Production. Sevilla, España.: Elsevier*. Recuperado el 15 de diciembre de 2018, de <https://kundoc.com/queue/pdf-biogas-production-.html>
- Camino, E., Riggio, V., y Rosso, M. (2012). *Biogas production by anaerobic co-digestion of cattle slurry and cheese whey. Bioresource Technology*, 46-53. doi:10.1016/j.biortech.2012.02.090
- Campos, E., Bonmatí, A., Teira, M., y Flotats, X. (2001). APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LODOS RESIDUALES Y PURINES. ResearchGate, 1-18. Recuperado el 13 de diciembre de 2018, de <https://www.researchgate.net/publication/251855102>
- Cardenas Cleves, L. M., Parra Orobio, B. A., Torres Lozada, P., y Vásquez Franco, C. H. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *rev.ion*, 29(1), 95-108. doi:<http://dx.doi.org/10.18273/revion.v29n1-2016008>
- Castellón, L. (2016). Suero lacteo, "tesoro" desperdiciado. Nicaragua: La Prensa S.A. Recuperado el 27 de diciembre de 2018, de

<https://www.laprensa.com.ni/2016/03/10/economia/1999659-suero-lacteo-tesoro-desperdiciado>

- Castrillón, L., Fernández-Nava, Y., Ormaechea, P., y Marañón, E. (2013). *Methane production from cattle manure supplemented with crude glycerin from the biodiesel industry in CSTR and IBR. Bioresource Technology*, 127, 312-317. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.09.080>
- Cavalho, F., Prazeres, A. R., y Rivas, J. (2013). *Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. Science of the Total Environment*, 385-396. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.038>
- Chae, K., Jang, A., Yim, S., y Kim, I. (2008). *The effects of digestion temperature and temperature shock on the biogas yields from the mesophilic anaerobic digestion of swine manure. Bioresource Technology* 99, 1-6. doi:[10.1016/j.biortech.2006.11.063](http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.063)
- Chen, Y., Cheng, J. J., y Creamer, K. S. (2008). *Inhibition of anaerobic digestion process: A review. Bioresource Technology*, 99(10), 4044-4064. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- DBFZ. (2016). *Collection of Methods for Biogas. Methods to determine parameters for analysis purposes and parameters that describe processes in the biogas sector* (Vol. 6). Berlin. Recuperado el 20 de diciembre de 2018, de https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/media/6_Publikationen/07_MMS_Biogas_en_web.pdf
- de Mes, T., Stams, A., Reith, J., y Zeeman, G. (2003). *Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid wastes. En J. H. Reith, R. H. Wijffels, y H. Barten, Bio-methane y Bio-hydrogen. Status and perspectives of biological methane and hydrogen production* (págs. 1-167). Netherlands: Smiet offset, The Hague. Recuperado el 20 de diciembre de 2018, de <https://www.ircwash.org/sites/default/files/Reith-2003-Bio.pdf>

- Dieter, D., y Angelika, S. (2008). *Chapter 5. Utilization of Biogas for the Generation of Electric Power and Heat. En Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction* (págs. 361-388). Wiley. doi:<https://doi.org/10.1002/9783527621705.ch5f>
- Drosg, B., Braun, R., y Bochmann, G. (2013). *Analysis and characterisation of biogas feedstocks. En A. Wellinger, J. Murphy, y D. Baxter (Edits.), The biogas handbook* (págs. 52-84). Denmark: Woodhead Publishing Limited. doi:10.1533/9780857097415.1.52
- EPA. (2001). *U.S. Environmental Protection Agency Office of Water. Method 1684. Total, Fixed and Volatile Solids in Water, Solids and Biosolids. Washington.* Recuperado el 19 de diciembre de 2018, de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1002CZ8.PDF?Dockey=P1002CZ8.PDF>
- Fang, H. (1991). *Treatment of Wastewater from a Whey Processing Plant Using Activated Sludge and Anaerobic processes. Dairy Sci, 74(6).* doi:10.3168/jds.S0022-0302(91)78371-9
- FAO. (2011). *MANUAL DE BIOGÁS.* Santiago de Chile. Recuperado el 26 de diciembre de 2018, de <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>
- FAO. (2012). *Situación de la Lechería en América Latina y el Caribe en 2011, Observatorio de la Cadena Lechera. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, División de Producción y Sanidad Animal. Chile.*
- FAO/PNUD. (1977). *China: reciclaje de desechos organicos en la agricultura. Informe sobre un viaje de estudios fao/pnud a la republica popular de china.* FAO. Recuperado el 16 de diciembre de 2018, de <http://www.fao.org/docrep/019/ar795s/ar795s.pdf>
- Fernandez, C., Cuetos, M., Martínez, E., y Gómez, X. (2015). *Thermophilic anaerobic digestion of cheese whey: Coupling H₂ and CH₄ production. Biomass and*

Bioenergy, 81, 55-62.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.05.024>

- Fukuzaki, S., Nishio, N., Shobayas, M., y Nagai, S. (1990). *Inhibition of the fermentation of propionate to methane by hydrogen, acetate, and propionate. Applied and environmental microbiology*, 56(3), 719-723. Recuperado el 14 de diciembre de 2018, de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC183412/pdf/aem00068-0145.pdf>
- Gelegenis, J., Georgakakis, D., Angelidaki, I., y Mavris, V. (2007). *Optimization of biogas production by co-digesting whey with diluted poultry manure. Renewable Energy*, 2147-2160. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.11.015>
- Gil, K., Najul, M., y Pacheco, C. (2005). MANEJO DE DESPERDICIOS EN INDUSTRIAS DE DERIVADOS LÁCTEOS CON CRITERIOS COMPETITIVOS. Recuperado el 4 de diciembre de 2018, de <http://infolactea.com/wp-content/uploads/2015/03/378.pdf>
- González, S. (1996). *Biotechnological utilization of cheese whey: a review. Bioresource Technology*, 57, 1-11. doi:[https://doi.org/10.1016/0960-8524\(96\)00036-3](https://doi.org/10.1016/0960-8524(96)00036-3)
- Goswami, R., Chattopadhyay, P., Shome, A., Banerjee, S. N., Chakraborty, A. K., Mathew, A. K., y Chaudhury, S. (2016). *An overview of physico-chemical mechanisms of biogas production by microbial communities: a step towards sustainable waste management. Biotech. Springer*, 1-12. doi:10.1007/s13205-016-0395-9
- Guardado Chacón, J. A. (2007). Diseño y construcción de plantas de biogás sencillas. La Habana, Cuba.: CUBASOLAR. Obtenido de <https://es.slideshare.net/jonfawler88/cubasolar-diseno-yconstrucciondeplantasdebiogas>

- Gülzow. (2010). Guía sobre el Biogás. Desde la producción hasta el uso. (5 ed.). Alemania: FNR, Abt. Öffentlichkeitsarbeit. Recuperado el 22 de diciembre de 2018, de <https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/l/e/leitfadenbiogas-es-2013.pdf>
- Hajji, A., y Rhachi, M. (2013). *Energy Procedia. En The Influence of Particle Size on the Performance of Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste* (págs. 515-520). doi:doi:10.1016/j.egypro.2013.07.059
- Hansen, K. H., Angelidaki, I., y Ahring, B. (1998). *ANAEROBIC DIGESTION OF SWINE MANURE: INHIBITION BY AMMONIA. Water Research, 32(1), 5-12.* doi:[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00201-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00201-7)
- Hill, D. T., y Cobb, S. A. (1993). *Modeling Predictive Indicators in Animal Waste Methanogenesis. . Transactions of the ASAE, 36(3), 879-885.* doi:10.13031/2013.28412
- Hill, D. T., Cobb, S. A., y Bolte, J. P. (1987). *Using Volatile Fatty Acid Relationships to Predict Anaerobic Digester Failure. Transactions of the ASAE, 30(2), 496-501.* doi:10.13031/2013.31977
- IDAE. (2007). Biomasa: Digestores anaerobios. Madrid: BESEL, S.A. Recuperado el 15 de diciembre de 2018, de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Digestores_Anaerobios_A2007_0d62926d.pdf
- INEC. (2014). Encuesta Nacional de salud y nutrición ENSANUT-ECU 2012. Quito: Instituto Nacional de Estandarización y Normalización (INEN). Recuperado el 7 de diciembre de 2018, de http://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Sociales/ENSANUT/MSP_ENSANUT-ECU_06-10-2014.pdf

- INEC. (2017). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua. Recuperado el 23 de diciembre de 2018, de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>
- Itodo, I., y Awulu, J. (1999). *EFFECTS OF TOTAL SOLIDS CONCENTRATIONS OF POULTRY, CATTLE AND PIGGERYWASTE SLURRIES ON BIOGAS YIELD. TRANSACTIONS OF THE ASAE*, 42(6), 1853-1855. doi:10.13031/2013.13350
- Kalyuzhnyi, S. V., Perez Martinez, E., y Rodríguez Martínez, J. (1997). *Anaerobic treatment of high-strength cheese-whey wastewaters in laboratory and pilot UASB-reactors. Bioresource Technology*, 60, 59-65. doi:[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(96\)00176-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(96)00176-9)
- Kaparaju, P., y Rintala, J. (2013). 17 - *Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells. En The Biogas Handbook* (págs. 404-427). Woodhead Publishing. doi:<https://doi.org/10.1533/9780857097415.3.404>
- Kaspar, H., y Wuhrmann, K. (1978). *Kinetic Parameters and Relative Turnovers of Some Important Catabolic Reactions in Digesting Sludge. APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, 36(1), 1-7. Recuperado el 21 de diciembre de 2018, de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC243024/pdf/aem00211-0007.pdf>
- Kavacik, B., y Bahattin, T. (2010). *Biogas production from co-digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure. Biomass and Bioenergy*, 34(9), 1321-1329. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.04.006>
- Khanal, S. (2009). *CH₂-Biogas Processing and Utilization as an Energy Source. En S. Harikishan, Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications* (págs. 267-291). Maoma: John Wiley y Sons. doi:<https://doi.org/10.1002/9780813804545.ch12>

- Khanal, S. (2009). *Overview of Anaerobic Biotechnology*. En *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications* (págs. 1-27). doi:<https://doi.org/10.1002/9780813804545.ch1>
- Khanal, S. K. (2008). *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications*. Manoa: John Wiley y Sons. doi:<https://doi.org/10.1002/9780813804545.ch1>
- Khanal, S. K. (2008). *Environmental Factors*. En *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications* (págs. 43-63). John Wiley y Sons, Inc. doi:<https://doi.org/10.1002/9780813804545.ch3>
- Koch, K., Bajón Fernández, Y., y Drewes, J. E. (2015). *Influence of headspace flushing on methane production in Biochemical Methane Potential (BMP) tests*. *Bioresource Technology*, 186, 173-178. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.03.071>
- Kosikowski, F. V. (1979). *Whey Utilization and Whey Products*. *Journal of Dairy Science*, 62, 1149 - 1160. doi:[https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(79\)83389-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(79)83389-5)
- Lam, J., Heegde, F., y Von Eije, S. (2014). *Domestic biogas. Technology and mass dissemination*. Oldenburg: SNV. Obtenido de https://www.uni-oldenburg.de/fileadmin/user_upload/physik-ppre/download/Downloads/BiogasWorkshopProgramm_DAAD.pdf
- Lay, J.-J., Li, Y. -Y., y Noike, T. (1997). *Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion*. *Water Research*, 31(6), 1518-1524. doi:[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00413-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00413-7)
- Lee, D. H., Behera, A. K., Kim, J. W., y Park, H.-S. (2009). *Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: a lab scale study*. *Waste Management*, 876-882. doi:[10.1016/j.wasman.2008.06.033](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.033)

- Lettinga, G., y Haandel, A. (1993). *Anaerobic digestion for energy production and enviromental protection. Renewable energy: sources for fuels and electricity.*, 817-839.
- Lettinga, G., Rebac, S., y Zeeman, G. (2001). *Challenges of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. Trends Biotechnol*, 363-370.
- Lü, F., Hao, L., Zhu, M., Shao, L., y He, P. (2012). *Initiating methanogenesis of vegetable waste at low inoculum-to-substrate ratio: importance of spatial separation. Bioresource Technology*, 105, 169-173. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.104>
- MacCarty, P. (1964). *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals. Chemistry and Microbiology*, 95-124. Recuperado el 22 de diciembre de 2018, de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.456.3796yrep=rep1ytype=pdf>
- Mathew, A., Bhui, I., Banerjee, S., Goswami, R., Shome, A., Chakraborty, A., . . . Chaudhury, S. (2014). *Biogás production from locally available aquatic weeds of Santiniketan through anaerobic digestion. Clean Technol Environmental Policy*, 1681-1688. doi:10.1007/s10098-014-0877-6
- Monroy, O., y Viniegra, G. (1990). *Biotecnología para el aprovechamiento de los Desperdicios Orgánicos*. Mexico: AGT Editor.
- Murphy, J., y Thamsiriroj, T. (2013). *The biogas handbook. Science, Production and Applications. En A. Wellinger, J. Murphy, y D. Baxter (Edits.), Fundamental science and engineering of the anaerobic digestion process for biogas production.* (págs. 104-130). Woodhead Publishing. doi:10.1533/9780857097415.1.104
- Pais Chanfau, J., Nuñez Pérez, J., Lara Fiallos, M., Rivera Intriago, L., Trujillo Toledo, L., y Cuaran Guerrero, M. (2017). Valorización del suero de leche: Una visión desde la biotecnología. *Revista bionatura*, 2(4), 468-476. doi:DOI.10.21931/RB/2017.02.04.11

- Panesar, P., Kennedy, J. F., Gandhi, D. N., y Bunko, K. (2007). *Bioutilisation of whey for lactic acid production. Food Chemistry*, 105(1), 1-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.03.035>
- Parkin, G., y Owen, W. (1986). *Fundamentals of Anaerobic Digestion of Wastewater Sludges. Journal of Environmental Engineering*, 112(5), 867-920. doi:10.1061/(ASCE)07339372(1986)112:5(867)
- Parra Huertas, R. (2009). Lactosuero: Importancia en la industria de alimentos. 4967-4982. Recuperado el 9 de diciembre de 2018, de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/download/24892/25423>
- Parra-Orobio, B. A., Torres-Lozada, P., Marmolejo-Rebellón, L. F., Cárdenas-Cleves, L. M., Vásquez-Franco, C., Torres-López, W. A., y Ordoñez-Andrade, J. A. (2015). *Effect of Substrate-Inoculum Ratio on the Biochemical Methane Potential of Municipal Biowastes. Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVI(4), 515-526. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.004>
- Pavlostathis, S., y Giraldo Gómez, E. (1991). *Kinetics of anaerobic treatment: a critical review*. 21(5-6), 411-490. doi:<https://doi.org/10.1080/10643389109388424>
- Persson, M., Jonsson, O., y Wellinger, A. (2006). *Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection, IEA Bioenergy, Task 24- Energy from Biogas and Landfill Gas*. Recuperado el 10 de diciembre de 2018, de http://task37.ieabioenergy.com/files/daten-redaktion/download/publi-task37/upgrading_report_final.pdf
- Petrenko, O. (2005). Estudio de algunas características de las cepas de levaduras y de su rendimiento celular utilizando un medio de cultivo a base de suero lácteo. Belgrano. Recuperado el 13 de diciembre de 2018, de <http://repositorio.ub.edu.ar/handle/123456789/118>

- Pozuelo, E., Castells, X., y Ripoll, X. (2005). Procesos biológicos: digestión anaerobia y compostaje. En *Tratamiento y valorización energética de residuos* (págs. 618-1206). Díaz de Santos. Recuperado el 21 de diciembre de 2018, de <http://reader.digitalbooks.pro/book/preview/14126/00004.html?1550723143953>
- Prazeres, A., Carvalho, F., y Rivas, J. (2012). *Cheese whey management: A review. Journal of Environmental Management*, 48-68. doi:10.1016/j.jenvman.2012.05.018
- Raposo, F., De la Rubia, M. A., Fernández-Cegrí, V., y Borja, R. (2012). *Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 861-877. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008>
- Registro Oficial N° 305. (2014). LEY ORGÁNICA DE RECURSOS HÍDRICOS, USOS Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA. Quito, Ecuador: 6 de agosto de 2014.
- Rico, C., Muñoz, N., y Rico, J. L. (2015). *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. Bioresource Technology*, 327–333. doi:10.1016/j.biortech.2015.04.032
- Rivas, J., Prazeres, A., Carvalho, F., y Beltra, F. (2010). *Treatment of Cheese Whey Wastewater: Combined Coagulation–Flocculation and Aerobic Biodegradation. Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(13), 7871-7877. doi:10.1021/jf100602j.
- Rugele, K., Mezule, L., Dalecka, B., Larsson, S., Vanags, J., y Rubulis, J. (2013). *Application of fluorescent in situ hybridisation for monitoring methanogenic archaea in acid whey anaerobic digestion. Agronomy Research*, 11, 376-

380. Obtenido de <http://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2013/10/p11212.pdf#abstract-3041>

- Saddoud, A., Hassari, I., y Sayadi, S. (2007). *Anaerobic membrane reactor with phase separation for the treatment of cheese whey*. *Bioresource Technology*, 98, 2102-2108. doi:10.1016/j.biortech.2006.08.013
- Sakar, S., Yetilmezsoy, K., y Kocak, E. (2009). *Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment--a literature review*. *Waste Management y Research*, 3-18. doi:10.1177/0734242X07079060
- Sanders, W., Geerink, M., Zeeman, G., y Lettinga, G. (2000). *Anaerobic hydrolysis kinetics of particulate substrates*. *Water Science and Technology*, 41(3), 17-24. doi:<https://doi.org/10.2166/wst.2000.0051>
- Schink, B. (1997). *Energetics of Syntrophic Cooperation in Methanogenic Degradation*. *MICROBIOLOGY AND MOLECULAR BIOLOGY REVIEWS*, 61(2), 262-280. Recuperado el 15 de diciembre de 2018, de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC232610/pdf/610262.pdf>
- Sharma, S. K., Mishra, I. M., Sharma, M., y Saini, J. (1988). *Effect of Particle Size on Biogas Generation from Biomass Residues*. *Biomass*, 17, 251-263. doi:[https://doi.org/10.1016/0144-4565\(88\)90107-2](https://doi.org/10.1016/0144-4565(88)90107-2)
- Speece, R. E. (1983). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment*. *Environmental Science y Technology*, 17(9), 416-427. doi:10.1021/es00115a725
- Steffen, R., Szolar, O., y Braun, R. (1998). *Feedstocks for Anaerobic Digestion. Technical paper 1998-09-30*. Institute for Agro biotechnology, Tulln University of Agricultural Sciences, 1-25. Recuperado el 12 de diciembre de 2018, de <https://pdfs.semanticscholar.org/293e/a2a9a8d8315548b8d749f60e4b28378d9dfa.pdf>

- Stronach, S. M., Rudd, T., y Lester, J. N. (1986). *Anaerobic Digestion Processes in Industrial Wastewater Treatment*. Berlin: Springer-Verlag. doi:10.1007/978-3-642-71215-9
- Surendra, K., Takara, D., Hashimoto, A. G., y Khanal, S. K. (2014). *Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 846-859. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.015
- Svensson, K., Paruch, L., Gaby, J. C., y Linjordet, R. (2018). *Feeding frequency influences process performance and microbial community composition in anaerobic digesters treating steam exploded food waste*. *Bioresource Technology*, 269, 276-284. doi:https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.08.096
- Tedesco, S., Lochlainn, D. M., y Olabi, A. G. (2014). *Particle size reduction optimization of Laminaria spp. biomass for enhanced methane production*. *Energy*, 76, 857-862. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.086
- Van Haandel, A. C., y Lettinga, G. (1994). *Anaerobic Sewage Treatment: A Practical Guide for Regions with a Hot Climate*. Chichester, England: John Wiley y Sons. Recuperado el 13 de diciembre de 2018, de <https://oxrethso.firebaseio.com/24/Anaerobic-Sewage-Treatment-A-Practical-Guide-for-Regions-with-a-Hot-Climite.pdf>
- Van Loosdrecht, M., Nielsen, P., Lopez-Vazquez, C., y Brdjanovic, D. (2016). *Experimental Methods in Wastewater Treatment*. IWA Publishing. Recuperado el 22 de diciembre de 2018, de <https://experimentalmethods.org/wp-content/uploads/2018/01/Experimental-Methods-in-Wastewater-Treatment.pdf>
- Varnero M, M. T., y Arrellano V, J. (1990). Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. Ministerio de Agricultura (FIA). Universidad de Chile, Facultad

de Ciencias Agrarias y Forestales, Informe Técnico. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

- Verein Deutscher Ingenieure-VDI 4630. (2016). *Fermentatio of organic materials. Characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*. Dusseldoff: Fachbereich Energiewandlung und -anwendung.
- Vögeli, Y., Lohri, C. R., Gallardo, A., Diener, S., y Zurbrügg, C. (2014). *Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries: Practical Information and Case Studies*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). Dübendorf, Switzerland: Binkert Buag AG. Recuperado el 21 de diciembre de 2018, de https://www.eawag.ch/fileadmin/Domain1/Abteilungen/sandec/publikationen/SWM/Anaerobic_Digestion/biowaste.pdf
- Wall, D., Allen, E., O'Shea, R., O'Kiely, P., y Murphy, J. (2016). *Investigating two-phase digestion of grass silage for demand-driven biogas applications: Effect of particle size and rumen fluid addition*. *Renewable Energy*, 86, 1215-1223. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.049>
- Wheatley , A. D., Fisher, M. B., y Grobicki, A. M. (1997). *Applications of Anaerobic Digestion for the Treatment of Industrial Wastewaters in Europe*. *Water and Environment Journal*, 11(1), 39-46. doi:10.1111/j.1747-6593.1997.tb00086.x
- Wheatley, A. (1990). *Anaerobic digestion: a waste treatment technology*. Michigan: Elsevier Applied Science.
- Zhou, Y., Zhang, Z., Nakamoto, T., Li, Y., Yang, Y., Utsumi, M., y Sugiura, N. (2011). *Influence of substrate to inoculum ratio on the batch anaerobic digestion of bean curd refuse okara under mesophilic conditions*. *Biomass and Bioenergy*, 35, 3251-3256. doi:10.1016/j.biombioe.2011.04.002

Zinder, S. H. (1990). *Conversion of acetic acid to methane by thermophiles*. *FEMS Microbiology Letters*, 75, 125-137. doi:[https://doi.org/10.1016/0378-1097\(90\)90527-W](https://doi.org/10.1016/0378-1097(90)90527-W)

ANEXOS

ANEXO 1 Índice de abreviaturas

Índice de abreviaturas

AGV:	Ácidos grasos volátiles
HAc:	Ácido acético
mm:	Milímetros
mM:	Milimolar
p/v:	Porcentaje peso/volumen o masa/volumen.
pH:	Potencial de hidrógeno.
ppm:	Partes por millón.
PVC:	Policloruro de vinilo.
S/I:	Sustrato/inóculo.
ST:	Sólidos totales
SV:	Sólidos volátiles
TRH:	Tiempo de retención hidráulico.
v/v:	Porcentaje volumen/volumen

