

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Producción de biogás a partir de suero de leche para el aprovechamiento de desechos en la elaboración de quesos

Lucia Isabella Sandoval Calderón

Guatemala,
2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería




Producción de biogás a partir de suero de leche para el aprovechamiento de desechos en la elaboración de quesos

Lucia Isabella Sandoval Calderón

Guatemala,

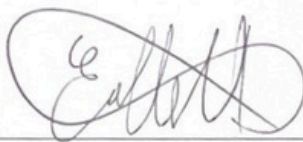
2024

Vo. Bo.


(f) 

Ing. Eddy Melendez

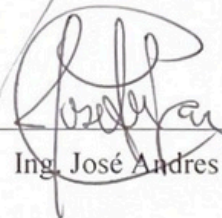
Terna examinadora

(f) 

Ing. Eddy Melendez

(f) 

Msc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f) 

Ing. José Andrés Lam

Fecha de aprobación: Guatemala, 10 de enero de 2024

PREFACIO

Mis cinco años de estudio de ingeniería química me dieron las herramientas necesarias para desarrollar mi pensamiento crítico y habilidades técnicas, las cuales me ayudaron en este trabajo y me ayudarán para la vida. El tema de este estudio surgió a raíz de mi interés por la investigación de energías renovables y nuevas maneras para aprovechar desechos. La experimentación fue retadora, pero me permitió aprender mucho del proceso y a poner en práctica mis habilidades de análisis y de resolución de problemas.

Quiero agradecer a Eddy Meléndez por guiarme en la elaboración de este trabajo y ayudarme cuando lo necesitaba.

A Pablo Galindo, Jorge Samayoa, InBio y EcoGuater por abrirme las puertas y proporcionarme los equipos necesarios para la obtención de resultados.

A Jose Javier por el apoyo incondicional y por siempre impulsarme a ser mejor.

Por último, a mi familia y mis amigos de la universidad por apoyarme siempre a lo largo de mi carrera universitaria.

ÍNDICE

PREFACIO	i
LISTA DE CUADROS	iv
LISTA DE FIGURAS	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
3. ANTECEDENTES	3
4. JUSTIFICACIÓN	4
5. MARCO TEÓRICO.....	5
5.1 Introducción al Biogás.....	5
5.2 Producción de Biogás	6
5.3 Proceso de Elaboración de Queso	10
5.4 Digestión Anaerobia.....	14
5.5 Tipos de biodigestores y características importantes	17
5.6 Desechos aprovechables para la digestión	19
5.6.1 Suero de Leche.....	19
5.6.2 Estiércol Animal.....	21
5.7 Codigestión.....	21

5.8 Demanda de Oxígeno	23
6. METODOLOGÍA.....	25
7. RESULTADOS.....	28
8. DISCUSIÓN.....	29
9. CONCLUSIONES.....	37
10. RECOMENDACIONES.....	38
11. REFERENCIAS.....	39
12. ANEXOS	43
12.1 Datos Originales	43
12.2 Datos Calculados	48
12.3 Cálculos de muestra.....	50
12.4 Datos de Placa	51
12.5 Figuras Adicionales	52
12.6 Análisis de Error.....	57
12.7 Glosario	58

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1: Composición de biogás	6
Cuadro 2: Métodos de almacenamiento de biogás.....	8
Cuadro 3: Clasificación de quesos según su contenido de grasa	13
Cuadro 4: Tipos de metanogénesis	17
Cuadro 5: Composición del Suero de Leche.....	20
Cuadro 6: Características de estiércol y suero de leche	22
Cuadro 7: Composición promedio de las mezclas evaluadas	28
Cuadro 8: Valor de prueba de DQO promedio de las mezclas evaluadas	28
Cuadro 9: Cantidades utilizadas de materia prima mezcla 1	43
Cuadro 10: Cantidades utilizadas de materia prima mezcla 2	43
Cuadro 11: Cantidades utilizadas de materia prima mezcla 3	43
Cuadro 12: Resultados preliminares mezcla 1	44
Cuadro 13: Resultados preliminares mezcla 2	44
Cuadro 14: Resultados preliminares mezcla 3	44
Cuadro 15: Resultados finales mezcla 1	45
Cuadro 16: Resultados finales mezcla 2	45
Cuadro 17: Resultados finales mezcla 3	46
Cuadro 18: DQO Mezcla 1	46
Cuadro 19: DQO Mezcla 2	46
Cuadro 20: DQO Mezcla 3	47
Cuadro 21: pH antes y después de la digestión anaerobia	47
Cuadro 22: Composición de lactosa del suero de leche utilizado	47
Cuadro 23: Promedio y desviación de resultados preliminares y finales (mezcla 1)...	48
Cuadro 24: Promedio y desviación de resultados preliminares y finales (mezcla 2)...	48
Cuadro 25: Promedio y desviación de resultados preliminares y finales (mezcla 3)...	49

Cuadro 26: Porcentaje de reducción de DQO mezcla 1.....	49
Cuadro 27: Porcentaje de reducción de DQO mezcla 2.....	49
Cuadro 28: Porcentaje de reducción de DQO mezcla 3.....	50
Cuadro 29: Promedio y desviación estándar del DQO	50
Cuadro 30: Promedio y desviación estándar del porcentaje de reducción del DQO ...	50
Cuadro 31: Datos de placa de Analizador de Biogás.....	51
Cuadro 32: Datos de placa de Reactor de DQO.....	51
Cuadro 33: Datos de placa de Fotómetro para DQO	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Centrifugadora de discos para el desnatado	12
Figura 2: Digestor Anaerobio.....	14
Figura 3: Esquema del proceso de la digestión anaerobia	16
Figura 4: Diferencias principales entre digestores de una etapa y dos etapas.....	18
Figura 5: Recipiente de detergente utilizado como biodigestor	52
Figura 6: Muestra de digestato (al final de la digestión).....	53
Figura 7: Extracto del manual del Analizador de biogás 5000: Preparar el equipo para la medición	53
Figura 8: Extracto del manual del Analizador de Biogas 5000: Medir la composición del biogás	54
Figura 9: Análisis de biogás	54
Figura 10: Equipos utilizados para medir el DQO.....	55
Figura 11: Reactivo utilizado para análisis de DQO.....	55
Figura 12: Curva de HPLC de análisis de lactosa del suero de leche	56
Figura 13: Curva de calibración para análisis de HPLC de lactosa (1)	56
Figura 14: Curva de calibración para análisis de HPLC de lactosa (2)	57

RESUMEN

El tema de estudio de este trabajo fue el aprovechamiento del suero de leche y estiércol para la producción de biogás considerando tres mezclas. Estas son: 40 % p/p suero – 60 % p/p estiércol (mezcla 1), 50 % p/p suero – 50 % p/p estiércol (mezcla 2) y 60 % p/p suero – 40 % p/p estiércol (mezcla 3). Se hicieron análisis de composición del biogás para identificar la mezcla con mayor proporción de metano, así como un análisis de DQO al digestato para observar el cambio del mismo antes y después de la digestión. Para esto se utilizó un detector de biogás marca Geotech y un fotómetro de Hanna Instruments respectivamente. Se encontró que la mezcla 2 fue la que más produjo metano, con un 4.7 ± 0.1 % v/v, luego la mezcla 1 con 1.9 ± 0.2 % v/v y por último la mezcla 3 con 0.8 ± 0.1 % v/v. Para propósitos de este estudio los porcentajes de metano se utilizaron para comparar las mezclas, pero idealmente el biogás debería de tener una composición del 30 % - 40 % de metano para que se considere de valor. También se encontró que todos los valores de DQO disminuyeron en todas las mezclas. El valor de la mezcla 1 disminuyó por 17.3 ± 0.8 %, la mezcla 2 disminuyó por 19.0 ± 0.7 % y la mezcla 3 disminuyó por 22.7 ± 3.3 %. Se recomienda llevar a cabo la metanogénesis en un nuevo digestor luego de las primeras tres fases así como implementar un sistema continuo para controlar mejor el proceso y maximizar la producción de metano.

ABSTRACT

The purpose of this study is to evaluate different proportions of whey and cow manure to determine which one produces the highest percentage of methane. The evaluated proportions of both substrates are: 40 % w/w whey – 60 % w/w manure (mixture 1), 50 % w/w whey – 50 % manure (mixture 2) and 60 % w/w whey – 40 % w/w manure (mixture 3). Additionally, the digestate was evaluated before and after the anaerobic digestion to determine if the COD value increased or decreased and the percentage of that change. The biogas composition was measured with a Geotech biogas analyzer and the COD value with a Hanna Instruments photometer. The mixture that had the highest methane percentage was mixture 2 with $4.7 \pm 0.1\%$, then mixture 1 with $1.9 \pm 0.2\%$ v/v and mixture 3 had the lowest value of $0.8 \pm 0.1\%$ v/v. For the purpose of this study we used these results to compare the three mixtures, but ideally for the biogas to have energetic and commercial value the methane percentage should be in a range of 30 % - 40 %. The COD values decreased in mixture 1 by $17.3 \pm 0.8\%$, in mixture 2 by $19.0 \pm 0.7\%$ and in mixture 3 by $22.7 \pm 3.3\%$. For the process to be more stable and controlled it's recommended to divide the digestion in two, the first part considering the first three stages and the second part being the methanogenesis. Also, it's recommended to implement a continuous process to maximize methane production.

1. INTRODUCCIÓN

Este informe aborda la producción de biogás a partir de suero de leche y estiércol para el aprovechamiento de los desechos del proceso de elaboración de queso. El objetivo es definir la mezcla de estiércol y suero de leche que maximice la proporción de metano producida. Para la producción de biogás, se empleará la digestión anaerobia de una mezcla de estiércol y suero de leche, ya que el estiércol aporta los microorganismos necesarios para la digestión y el suero de leche aporta bastantes nutrientes. Para el análisis del biogás producido, se utilizará un detector de biogás portátil. Para el digestato se emplearán pruebas de demanda de oxígeno para determinar si la digestión anaerobia puede tratar estos desechos y disminuir su DQO. Se encontró que la mezcla que produce más metano es la mezcla con proporciones de 50 % suero de leche y 50 % estiércol, seguida por la mezcla de 40 % suero de leche y 60 % estiércol, y 60 % suero de leche y 40 % estiércol respectivamente.

2. OBJETIVOS

General

- Producir biogás a partir de suero de leche, mediante una digestión anaerobia, para aprovechar los residuos del proceso de elaboración de queso.

Específicos

- Caracterizar el biogás y cuantificar el porcentaje de metano producido por medio de un detector de biogás portátil para determinar la pureza del mismo.
- Determinar la mezcla de estiércol y suero de leche, de las tres proporciones evaluadas, que produzca la mayor proporción de metano.
- Medir la demanda de oxígeno mediante un análisis de DQO tanto anterior como posterior a la producción de biogás para cuantificar la diferencia.

3. ANTECEDENTES

Anteriormente se han hecho estudios para determinar si el suero de leche puede utilizarse como un sustrato para la producción de biogás. En un estudio de Gelegenis, Georgakakis, Angelidaki y Mavris (2007), se obtuvo evidencia que la codigestión del estiércol con suero de leche es más efectiva para la producción de biogás que el uso exclusivo del estiércol. Cuando se ingresó el suero de leche al flujo del reactor se pudo determinar que la producción de biogás incrementó en un 40%. Esto se pudo haber dado ya que el suero de leche contiene más carbohidratos y el estiércol contiene más lípidos, por lo que el suero de leche aumenta la biodegradabilidad de la biomasa.

Es importante mencionar que este estudio quería probar la codigestión de ambos sin tratamiento químico previo. Es por eso que el artículo menciona que cuando se trabajó con una proporción de suero de leche mayor al 50% v/v el reactor se volvía inestable por el bajo pH y por lo tanto inhibe la producción de biogás. Sin embargo, según Comino, Riggio y Rosso (2012) la proporción máxima de suero a la que se puede llegar sin tener que hacer un ajuste de pH es de 65% v/v. Aunque se haya producido metano con esta proporción mencionan que el proceso empezó a ser más inestable y menos eficiente.

Según un estudio de Antonelli et al (2015) se realizó una digestión con proporciones de 20% v/v de estiércol y 80% v/v de suero de leche. Es importante mencionar que en este caso sí se hizo un ajuste de pH por la acidez inicial de la mezcla dado al suero de leche. El volumen de reactor fue de 2,350 mL, llenado al 80%, resultando en una mezcla de 376 mL de estiércol y 1,504 mL de suero de leche.

4. JUSTIFICACIÓN

El suero de leche es un subproducto del proceso de elaboración de quesos que por mucho tiempo se ha desechado sin considerar su aprovechamiento en otras industrias. Según Mihai y Holban (2019), el suero de leche representa 60-90 g/100 g de leche procesada, y desecharlo presenta varios problemas debido a su alto contenido de materia orgánica, que puede afectar a la tierra y cuerpos de agua a los que se desecha.

Se ha encontrado que el suero de leche puede aprovecharse para la elaboración de ciertos productos, como el biogás, que es útil en aplicaciones de generación de energía y calor. Sin embargo, según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, en la matriz energética de Guatemala el biogás presenta solamente un 0.06% de la generación de energía, por lo que no existen muchas instituciones o empresas que apliquen este proceso.

Dado lo mencionado anteriormente, se busca aprovechar los desechos del proceso de elaboración de quesos junto con estiércol para generar biogás que, una vez purificado, puede utilizarse en uso doméstico, energético o aplicaciones industriales. Adicionalmente, la digestión anaerobia disminuye el DQO del digestato, por lo que disminuye la capacidad de contaminación del mismo. Incluso, el digestato puede ser utilizado como abono dado a su alta concentración de nutrientes tales como nitrógeno, fósforo y potasio.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 Introducción al Biogás

Desde los años 60, se empezó a generar biogás a partir de estiércol bovino, para poder aprovechar este desecho y al mismo tiempo reducir el impacto ambiental. Está compuesto principalmente por metano, y su principal diferencia con el gas natural radica en su origen. El biogás se obtiene a partir de la descomposición de diversos tipos de compuestos con la ayuda de microorganismos en un periodo de 20 a 90 días, mientras que el gas natural se obtiene de la descomposición de materia orgánica a lo largo de millones de años. Es por esto que el biogás se considera una energía renovable y el gas natural no. Comúnmente, el biogás se genera a partir del estiércol de varios animales, como el de vaca o cerdo; sin embargo, se ha descubierto que se pueden aprovechar más tipos de desechos, entre ellos el suero de leche (Varnero 2011).

En términos generales, el biogás es un tipo de gas combustible que se genera por la descomposición de materia orgánica por medio de una digestión anaerobia, es decir, sin la presencia de oxígeno. La composición del biogás se puede ver en el siguiente cuadro:

Cuadro 1: Composición de biogás

Compuesto	Concentración (v/v)
Metano	40-75 %
Dióxido de carbono	15-60%
Vapor de agua	1-5%
Nitrógeno	0-5%
Hidrógeno	Trazas
Sulfuro de hidrógeno	0-5000 ppm
Oxígeno	< 2%
Amoníaco	0-500 ppm

(Bharathiraja et al, 2018)

La concentración de los compuestos mencionados anteriormente depende de la composición de la biomasa y factores externos como la temperatura y el pH.

5.2 Producción de Biogás

La producción de biogás se lleva a cabo a partir de la descomposición anaerobia de compuestos orgánicos, produciendo metano, hidrógeno y dióxido de carbono, entre otros. El tiempo de descomposición varía, dependiendo de la biomasa utilizada y del tamaño de las moléculas a descomponer. El proceso de producción de biogás empieza con la obtención de la materia prima. Hay muchos tipos que se pueden utilizar, los más comunes son el estiércol bovino, vacuno o de cerdo, desechos de aguas residuales, desechos de comida, suero de leche, entre otros. Una vez obtenida la materia prima, el siguiente paso es introducirla en un biodigestor que impida la entrada de oxígeno. Dependiendo del proceso se hará el montaje del biodigestor. Usualmente, el biogás se utiliza inmediatamente, en un proceso continuo, alimentando más biomasa conforme se produce el gas. Esto es lo más usual para los biodigestores a gran escala. Además, existe la producción de biogás en un proceso batch, donde es crucial el almacenamiento del gas según la cantidad producida (Krich *et al*, 2005).

El primer paso de la producción de biogás es la recolección de la materia prima. Usualmente la producción y recolección son en el mismo sitio, para facilitar el transporte y logística. Antes de utilizar la materia prima, es necesario analizarla para determinar la cantidad de agua y sólidos inorgánicos presentes. También se pueden hacer análisis de la cantidad de carbohidratos, proteínas y otros compuestos hidrolizables. Hay que tomar en cuenta que entre más pequeños sean los compuestos menos tiempo tardará en producirse el biogás, ya que la hidrólisis tomará menos tiempo (Al Seadi *et al*, 2008). El siguiente paso es el pretratamiento de la materia prima, para que tenga las características requeridas para el proceso. Por ejemplo, el pretratamiento más común es el ajuste de densidad de la materia prima, ya que dependiendo del proceso se necesita un slurry con densidad específica para cumplir con los requerimientos. Este tratamiento implica agregar agua para obtener una mezcla menos densa y se le agrega más estiércol para una consistencia más espesa. Adicionalmente, se remueven ciertas partículas sólidas, como piedras, que no participan en la digestión y pueden alterar el funcionamiento del sistema de producción (Krich *et al*, 2005).

Luego, se tiene la digestión anaerobia, la cual es la etapa más importante ya que es donde se produce el biogás. Para esta etapa se necesita un biodigestor, el cual es un tanque u otro tipo de contenedor que se diseña como un sistema cerrado para excluir el aire del proceso. Usualmente para que se obtenga un mejor resultado se tienen sistemas de agitación para mezclar las diferentes fases contenidas en el digestor, las cuales son sólidas, líquidas y gaseosas. Adicionalmente, el mezclado puede servir para facilitar el libramiento de burbujas de biogás de la mezcla hacia el recipiente recolector de gas. Por otro lado, calentar la mezcla a temperaturas superiores a la ambiente acelera el proceso y permite un control más uniforme de la temperatura durante el mismo. Dependiendo del rango de temperatura también se define qué tipo de microorganismos estarán presentes en la digestión, lo cual se hablará más adelante (Al Seadi *et al*, 2008). Por último, se tiene la recuperación del biogás y el digestato, el cual es un subproducto que se puede utilizar como abono. El gas producido es almacenado de diferentes maneras según su presión y la manera en que se quiere transportar luego de la digestión. A continuación, se tiene un cuadro

describiendo las diferentes maneras de atrapar y almacenar el biogás dependiendo de su clasificación (Krich *et al*, 2005).

Cuadro 2: Métodos de almacenamiento de biogás

Propósito de almacenamiento	Presión (psi)	Dispositivo de almacenamiento	Material	Tamaño (ft³)
Almacenamiento en periodos cortos e intermedios para usos en lugar de generación (es más utilizado para biogás)	<0.1	Cubierta flotante	Plásticos reforzados y no reforzados, cauchos	Volumen variable, típicamente la cantidad producida en un día
	<2	Bolsa de gas	Plásticos reforzados y no reforzados, cauchos	150-11,00
	2-6	Recipiente de gas sellado con agua	Acero	3,500
		Bolsa de gas con peso	Plásticos reforzados y no reforzados, cauchos	880-28,000
		Techo flotante	Plásticos reforzados, plásticos	Volumen variable, típicamente la cantidad producida en un día

Almacenamiento a largo plazo, para utilizar luego o para transportar fuera del lugar de generación (es más utilizado para biometano)	10-2,900	Tanques de propano o butano	Acero	2,000
	>2,900	Cilindros de gas comerciales	Aleación de acero	350

(Krich *et al*, 2005)

En el cuadro anterior se puede observar diferentes métodos para el almacenamiento de biogás dependiendo de la escala del proyecto. El método de almacenamiento es diferente, ya que dependiendo de la cantidad de biogás generado se pueden guardar a diferentes presiones. Por ejemplo: la producción de un día, que corresponde a una menor cantidad, tiene una presión de menos de 0.1 psi, por lo que no es suficiente gas para poder mantenerlo en un tanque a presión y no valdría la pena ese proceso para una cantidad tan pequeña. Es por eso que para esa presión el método de almacenamiento sería una cubierta flotante. Por otro lado cuando se tiene 350 ft³ de gas, la cual es una cantidad considerable que puede estar a una presión de 2,900 psi o más, ya vale la pena comprimir dentro de un cilindro de gas. Usualmente los primeros métodos de recolección son utilizados en una granja o lugar rural ya que el principal objetivo del biogás generado es para uso personal mientras que en las dos categorías más altas es venderlo.

El biogás se puede quemar directamente, ya que contiene metano, pero en la mayoría de ocasiones para incrementar el valor comercial del mismo se hace una purificación para remover impurezas como el dióxido de carbono, vapor de agua y sulfuro de hidrógeno y así obtener biometano. Estas impurezas tienen un efecto negativo en el ambiente y disminuyen la capacidad calorífica del biogás, por lo que disminuye su eficiencia energética (Ray *et al*, 2016).

Para llevar a cabo la purificación del gas se necesitan tres scrubbers, y cada uno sirve para separar cada componente mencionado en el párrafo anterior. Primero, para la separación del dióxido de carbono se utilizan cristales de caliza, ya que su principal componente es el óxido de calcio, que reaccionan con el dióxido de carbono formando así carbonato de calcio. Luego, para la separación de humedad (o vapor de agua), el biogás pasa por una unidad que contiene sílica gel. Después de este paso el biogás debería tener una pureza del 95%. Por último, se tiene la separación del sulfuro de hidrógeno, utilizando un catalizador de óxido de hierro que convierte esta última impureza en sulfuro elemental (Ray *et al*, 2016).

5.3 Proceso de Elaboración de Queso

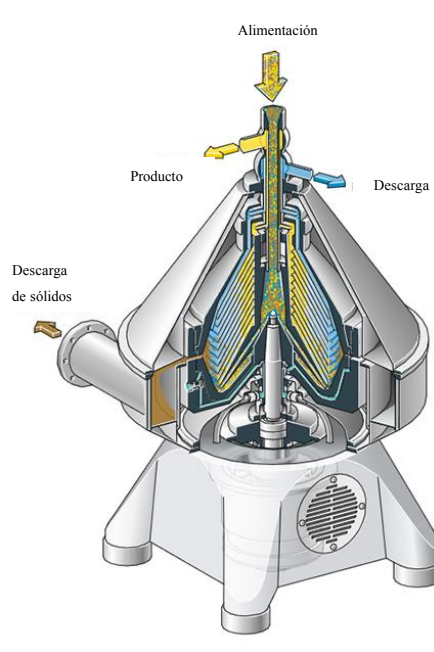
El suero de leche es un fluido que se genera como subproducto del proceso de elaboración de quesos. El proceso tiene pequeñas variaciones dependiendo del tipo de queso que se quiere producir, pero todos los quesos utilizan la leche como materia prima. Las vacas producen más leche de la que los terneros necesitan luego de nacer, y es por eso que se vende y se obtienen subproductos de la misma. La leche está conformada por 87.4% (p/v) de agua, 4.6% (p/v) de lactosa, 3.9% (p/v) de grasa, 3.2% (p/v) de proteína, y 0.9% (p/v) de otros componentes como minerales y vitaminas (Harding, 1995). La lactosa es el compuesto de mayor proporción en la leche, excluyendo el agua, la cual es el carbohidrato principal y es muy importante para la elaboración de yogurts y quesos, ya que se convierte en ácido láctico. Sin embargo, una gran parte de la lactosa no se convierte en ácido láctico, y pasa a formar parte del suero de leche (Miller *et al*, 2000).

El primer paso del proceso de elaboración de quesos es algún tipo de tratamiento térmico para que se pueda almacenar la leche y prolongar su vida útil. Los tratamientos térmicos que se utilizan son los procesos UHT, termización, tratamiento térmico por batch y la pasteurización. El más utilizado en la industria es la pasteurización, que consiste en calentar rápidamente la leche hasta 71 °C por un periodo de tiempo entre 15 y 25 segundos, y luego se enfría rápidamente hasta los 3 °C. Este tratamiento térmico tiene el propósito de eliminar patógenos y bacterias que pudieran estar presentes en la leche, para asegurar la salud del

consumidor y prolongar el tiempo de vida de la misma. Para la pasteurización se requiere un intercambiador de calor, y el más utilizado es el intercambiador de superficie rascada de Kelstream. Usualmente se utilizan dos intercambiadores, uno para calentar la leche y otro para enfriarla. El siguiente paso es la centrifugación, en el cual se desnata la leche. El desnatado es el proceso en donde se remueve la grasa que tiene naturalmente la leche, y la nata es a lo que se conoce comúnmente como la crema. Los tipos de desnatado son en caliente y en frío y el más utilizado es el primero, en donde se centrifuga en un rango de 45 a 55 °C, con el propósito de obtener una separación óptima (Gastalver, 2015).

Por otro lado, el desnatado en frío se hace a una temperatura menor a 4 °C. Esta se puede utilizar cuando se va a producir queso a partir de leche sin pasteurizar, cuando se quiere un queso con un sabor más fuerte y una nata de mayor calidad. La eficacia del proceso de desnatado se mide dependiendo del contenido residual de grasa en la leche desnatada, y los dos factores que pueden afectar la eficacia son la temperatura y el caudal. Es por eso que el desnatado de alta temperatura es más eficiente en términos de separación, aunque el desnatado en frío es más eficiente energéticamente. Por otro lado, cuando se tiene un menor caudal, el tiempo de residencia de la leche en el equipo es mayor (Miller *et al*, 2000).

Figura 1: Centrifugadora de discos para el desnatado



Fuente: Gea Group, 2023

La centrifugadora más utilizada para este proceso es la centrifugadora de discos, y la manera en la que funciona es que la leche entra desde arriba y se transporta hacia el centro del equipo. Luego, por la fuerza centrífuga se empieza a separar la leche desnatada y la nata. La fase más pesada, que es la nata o crema, se mueve hacia las afueras de la centrifugadora, mientras que la fase más ligera que es la leche se queda en el centro. Luego cada fase es expulsada de la centrifugadora por diferentes salidas, las cuales se pueden ver en la figura 1. Dependiendo de la cantidad de nata removida la leche se puede caracterizar como semidescremada o descremada (Miller *et al*, 2000).

El proceso de elaboración de queso continúa con las cubas de cuajar, en donde la leche se mezcla con los fermentos iniciadores. La temperatura de las cubas de cuajar es de 32-34°C, y el objetivo de este paso es lograr que el queso “cuaje” o se coagule. También se puede utilizar cloruro de calcio u otros compuestos para ayudar con el proceso de coagulación. Los fermentos iniciadores dependen del tipo de queso que se quiere hacer.

Por ejemplo, el fermento iniciador para hacer queso brie, parmesano y cheddar sería el *Lactococcus Lactis*. El fermento iniciador son los microorganismos necesarios para iniciar la fermentación en la que se descompone la lactosa de la leche y sus derivados para transformarla en ácido láctico. El siguiente paso es la mesa de desuere, la cual se utiliza para separar el suero de leche de los coágulos. Un equipo auxiliar en este paso son las liras, que se pueden utilizar para cortar los coágulos y que se pueda separar el suero de una manera más fácil. Por último, se utiliza la prensa para remover el suero remanente (Gastalver, 2015).

Los quesos se pueden clasificar según su contenido de grasa, su proceso de elaboración y el tiempo de maduración del mismo. Primero, están el queso fresco y el blanco pasteurizado que se comercializan directamente después del proceso. Luego, se puede clasificar los quesos en la categoría de afinado, madurado o fermentado, los cuales son los que llevan un periodo de maduración después del proceso de elaboración para que puedan generarse cambios físicos y químicos que aportan al sabor y apariencia del mismo. Este periodo de maduración depende del queso, y se hace en condiciones controladas para obtener las características deseadas (Gastalver, 2015). Los quesos también se pueden clasificar según su porcentaje de grasa. En el siguiente cuadro se muestra el nombre según el contenido de grasa.

Cuadro 3: Clasificación de quesos según su contenido de grasa

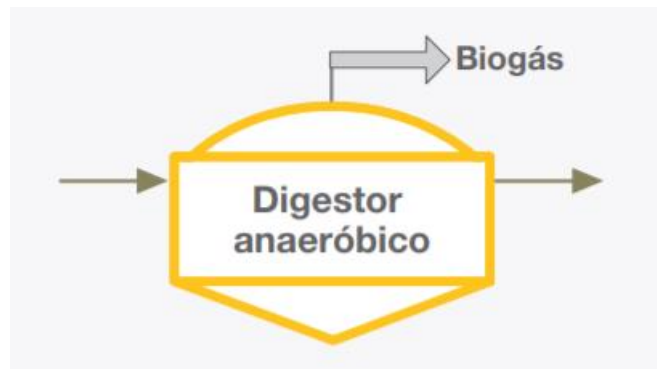
Nombre	Contenido de grasa
Desnatado	< 10%
Semidesnatado	10-25%
Semigraso	25-45%
Graso	45-60%
Extragraso	>60%

(Gastalver, 2015)

5.4 Digestión Anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso en ausencia de oxígeno que permite degradar materia orgánica, que puede ser desde estiércol hasta desechos alimenticios. El proceso se lleva a cabo en un reactor o biodigestor que puede tener diferentes formas y tamaños dependiendo de la aplicación. Además de la materia orgánica, se deben tener ciertos microorganismos que degradan la misma para la producción de gas. El biogás es conformado principalmente por metano y dióxido de carbono, y es usado para la generación de energía y calor. Después de la digestión se obtiene el biogás y el digestato, que es el residuo sólido y líquido restante (Gerardi, 2003). En la figura 2 se puede ver un diagrama típico de un biodigestor, en el que la entrada es la materia orgánica, y las dos salidas son biogás y digestato.

Figura 2: Digestor Anaerobio



Fuente: Varnero, 2011

La primera etapa de la digestión es la hidrólisis de los sólidos. Esta produce compuestos orgánicos simples y solubles (Gerardi, 2003). La hidrólisis es importante, ya que las partículas más grandes en la materia orgánica se degradan y reducen su tamaño para poder atravesar la pared celular de los microorganismos. La hidrólisis se hace por medio de enzimas extracelulares que son producidas por microorganismos hidrolíticos. Existen numerosos factores que afectan la hidrólisis, entre ellos la temperatura, el tiempo de retención hidráulico, la composición bioquímica del sustrato, el tamaño de las partículas, el pH. Dependiendo del tamaño de las partículas del sustrato esta puede ser de las etapas más largas en la digestión, ya que entre mayor tamaño los microorganismos tardarán más

tiempo en degradarlas. Usualmente, los microorganismos que están presentes en esta fase son los *Bacteroides*, *Lactobacillus*, *Propioni- bacterium*, *Sphingomonas*, *Sporobacterium*, *Megasphaera*, *Bifidobacterium* (Varnero 2011).

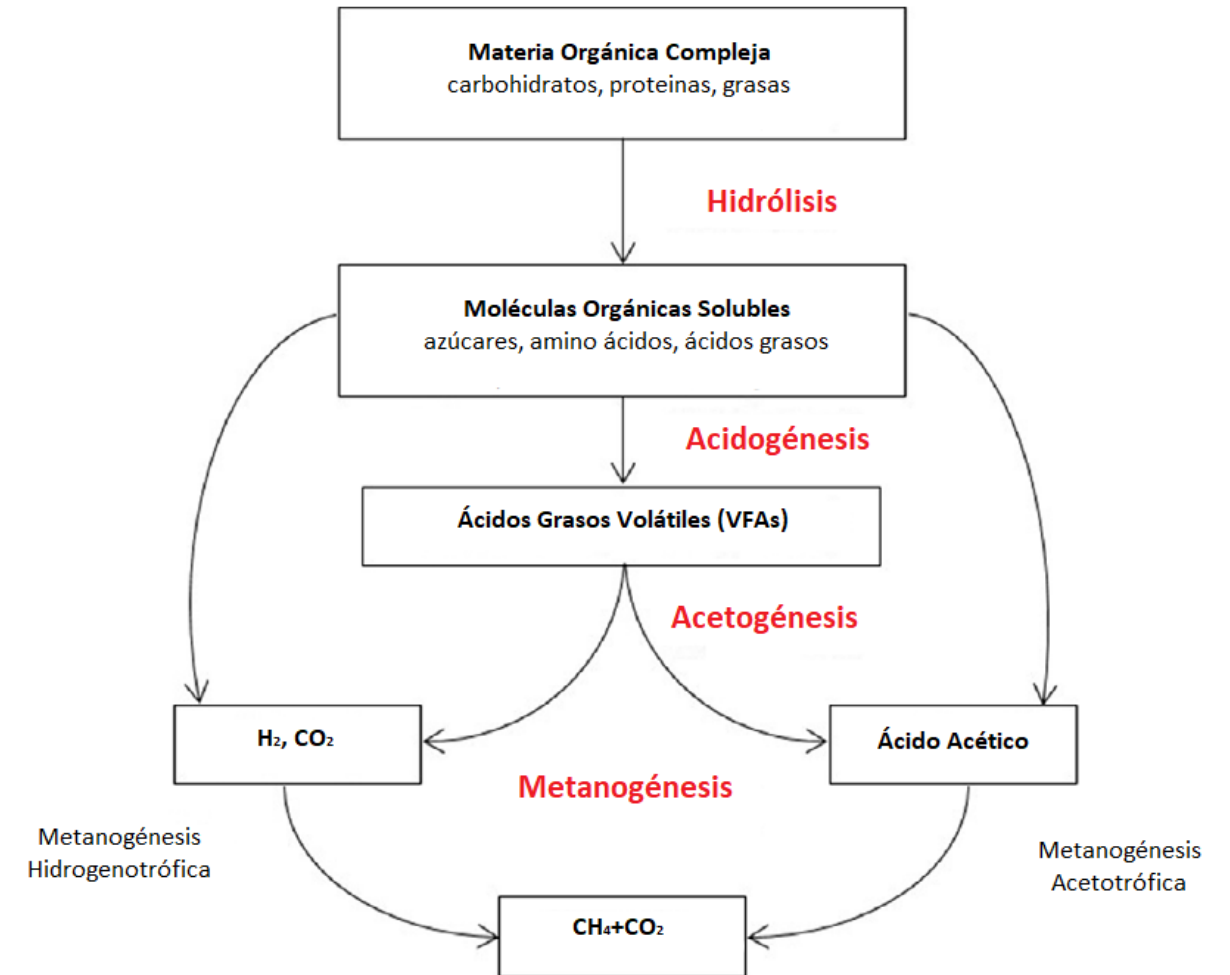
La siguiente etapa es la acidogénesis, en donde los compuestos orgánicos solubles obtenidos de la hidrólisis se usan para producir ácido acético, fórmico e hidrógeno para ser utilizados por las bacterias metanogénicas. Adicionalmente, se forman compuestos como el ácido propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol para que puedan ser oxidados por las bacterias acetogénicas. Otro propósito de la acidogénesis es eliminar cualquier traza de oxígeno que pueda haber en el sistema. De este modo, la digestión puede continuar en un ambiente anaeróbico. Los microorganismos involucrados en esta etapa son del género *Clostridium*, *Paenibacillus* y *Ruminococcus*, los cuales están presentes en todas las etapas de la digestión, pero son dominantes en la acidogénesis (Varnero, 2011).

La tercera etapa es la acetogénesis, en donde el etanol, ácidos grasos volátiles y compuestos aromáticos se descomponen para poder tener compuestos más simples como acetato e hidrógeno para que las bacterias metanogénicas puedan producir metano en la última etapa de la digestión (Lin *et al*, 2019). En la acetogénesis ya se ha consumido la mayoría de los nutrientes de la biomasa utilizada. Los microorganismos principales son de tipo *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*. Un tipo de microorganismo acetogénico son los homoacetogénicos. Estos son especiales, ya que crecen heterotróficamente en esta etapa de la digestión, y su alimento principal son azúcares, hidrógeno y compuestos monocarbonados, como el dióxido de carbono, para producir acetato (Varnero, 2011).

La última etapa de la digestión es la metanogénesis, donde se produce el metano que es el principal componente del biogás. La producción de metano empieza con los productos de las etapas anteriores, los cuales son: dióxido de carbono, hidrógeno, acetato, formiato, metanol y metilaminas (Varnero, 2011). Como se utilizan varios tipos de reactivos para producir metano, hay tres diferentes caminos para poder hacerlo, metanogénesis metilotrófica, metanogénesis hidrogenófila o hidrogenotrófica y la metanogénesis

acetoclástica o acetotrófica. El camino predominante para la producción de metano es la acetotrófica, atribuyéndole un 70% del metano total producido (Lin *et al*, 2019). En la figura 3 se puede observar un diagrama que detalla cada etapa.

Figura 3: Esquema del proceso de la digestión anaerobia



Fuente: Lin *et al*, 2019

Cuadro 4: Tipos de metanogénesis

Tipo de metanogénesis	Descripción	Reactivo	Producto
Metilotrónica	Producción de metano a partir de la descarboxilación de grupos metilos	Alcoholes de metilo, aminas de metilo, sulfuros de metilo	Metano
Hidrogenotrónica	Producción de metano por reducción de H ₂ /CO ₂	Hidrógeno y dióxido de carbono	Metano
Acetotrónica	Producción de metano por descarboxilación de acetato	Acetato	Metano

(Varnero, 2011)

5.5 Tipos de biodigestores y características importantes

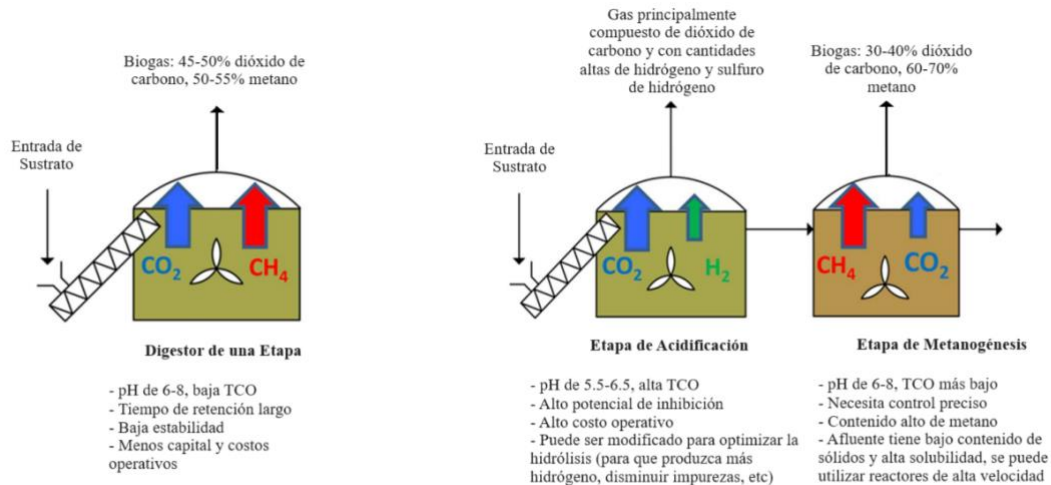
Para que se lleve a cabo una digestión anaerobia exitosa, se necesita un biodigestor con ciertas características para que se generen los productos deseados. Los principales factores que se deben considerar al diseñar o escoger un biodigestor son: el tamaño del digestor, temperatura, contenido de sólidos totales, composición del sustrato, pH y el mezclado de la biomasa.

Los biodigestores pueden operar bajo dos rangos de temperatura, el mesofílico que se encuentra entre 30 y 38°C y el termofílico que se encuentra entre 50 y 60°C. Los microorganismos presentes en cada uno de los rangos varían ya que prosperan a diferentes temperaturas. Las condiciones mesofílicas son las más comunes ya que no se necesitan condiciones tan extremas para funcionar. Por otro lado, bajo condiciones termofílicas suben los costos de calentamiento del proceso, pero son utilizadas cuando es necesario eliminar patógenos presentes en la biomasa (EPA, 2023).

Adicionalmente, un biodigestor se puede caracterizar como húmedo o seco dependiendo de la cantidad de sólidos presentes en la biomasa. En los biodigestores húmedos la biomasa típicamente está en formato de slurry, teniendo un porcentaje de sólidos de menos del 15%. Estos son los más utilizados, ya que se ha demostrado que entre menor contenido de sólidos incrementa la producción de metano (Lin *et al*, 2019). Por otro lado, cuando el contenido de sólidos es más del 15%, es un biodigestor seco (EPA, 2023).

Al analizar el sustrato, el parámetro más importante es la relación de carbono y nitrógeno. Idealmente se debería de tener una relación de 20 a 30 partes de carbono por parte de nitrógeno. En caso de que se tenga un exceso de nitrógeno, es decir que la relación sea baja, se puede generar un exceso de amoníaco y ácidos grasos volátiles los cuales pueden inhibir la digestión (Rivas-Solano *et al*, 2016). Por otro lado, si se tiene un exceso de carbono, es decir que la relación es alta, se puede disminuir la tasa de biodegradación de la materia orgánica y disminuye la producción de biogás (Lin *et al*, 2019).

Figura 4: Diferencias principales entre digestores de una etapa y dos etapas



Fuente: Xu *et al*, 2018

Un factor esencial para elegir el tipo de digestor es definir si la digestión es de una etapa o dos. Las principales diferencias se pueden ver en la figura 4. El digestor de una etapa es más fácil de manejar y se necesita menor capital para montar; sin embargo, tiene un rendimiento menor de metano relativo al digestor de dos etapas. Esto debido a que las dos etapas principales, acidificación y metanogénesis, tienen diferentes parámetros ideales para poder potencializar cada etapa. Si se divide el proceso en dos, se puede tener un mejor control de los factores que afectan la digestión. Y, como resultado, hay una mayor probabilidad de que se obtengan los resultados deseados. En la etapa metanogénica es importante tener un buen control de los parámetros pertinentes, ya que los microorganismos metanogénicos son más sensibles a cambios en el ambiente (Varnero, 2011). También se busca disminuir la cantidad de dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno que se produce en la etapa metanogénica.

Para aumentar la eficiencia del proceso, generalmente se utilizan los biodigestores de dos etapas, aunque en algunos casos se ha utilizado un digestor de tres etapas. Esto es debido a que el pH es más bajo para la hidrólisis que para la acidogénesis, y por lo tanto, se necesita hacer ese ajuste de pH para aumentar la eficiencia (Xu *et al*, 2018).

5.6 Desechos aprovechables para la digestión

5.6.1 Suero de Leche

Los desechos de la industria alimenticia se caracterizan por ser generados durante la cadena de suministro de la producción de alimentos. En países en vías de desarrollo 80-90% de estos desechos se generan en el proceso anterior y posterior a la cosecha y en el procesamiento de alimentos. Por otro lado, en países desarrollados el mayor problema de desechos alimenticios se presenta en la etapa del consumidor y minoristas (Xu *et al*, 2018). Los desechos de la industria alimenticia se caracterizan por tener un pH bajo y una relación baja de carbono/nitrógeno. La composición de ellos es principalmente de carbohidratos, grasa y proteína. Adicionalmente, estos tienen una cantidad alta de materia orgánica soluble que fácilmente se convierte en intermediarios en el proceso de la digestión. Sin embargo, la alta cantidad de sólidos solubles puede causar inestabilidad en la digestión

anaerobia y se tendrían que tomar más medidas para controlar el proceso (Lin *et al*, 2019). Una digestión solamente de estos desechos puede provocar biodigestores inestables ya que existe una acumulación significativa de ácidos grasos volátiles y amoníaco que inhiben los microorganismos, específicamente los metanogénicos (Xu *et al*, 2018).

El suero de leche es un líquido de color amarillo que se obtiene en el proceso de elaboración de quesos, luego de remover la caseína de la leche utilizando procesos de acidificación (Khezri *et al*, 2016). Este se puede clasificar como “dulce” o “ácido”. Hay dos tipos de suero de leche, el ácido y el dulce. La diferencia en el proceso de elaboración de los dos es que el suero dulce se obtiene cuando, para coagular el queso, se utilizan enzimas proteolíticas, las cuales descomponen las proteínas. Por otro lado, el suero ácido se coagula por medio de una fermentación o por el uso de ácidos. Típicamente los componentes del suero de leche son agua, lactosa y grasa, y las concentraciones varían levemente dependiendo si es suero dulce o ácido, pero su mayor diferencia es el pH. El rango de pH para el suero dulce es de 6.3-7, mientras que para el ácido es de 4.6-5 (Antonelli *et al*, 2016). Las características de ambos se demuestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 5: Composición del Suero de Leche

Componente	Suero de leche dulce (% p/v)	Suero de leche ácido (%p/v)
Agua	93-94	94-95
Materia seca	6-6.5	5-6
Lactosa	4.5-5	3.8-4.3
Ácido láctico	trazas	Hasta 0.8
Proteína	0.8-1	0.8-1
Ácido Cítrico	0.1	0.1
Minerales	0.5-0.7	0.5-0.7

(Tsakali *et al*, 2010)

Adicionalmente, el suero también puede contener lípidos, carbohidratos, vitaminas y minerales (Lievore *et al*, 2015). Las proporciones de los nutrientes dependen de la calidad de la leche, establecida según el tipo de animal, raza, su alimentación, salud general, entre

otros. Este subproducto es un desecho de la industria láctea, mientras que para la industria alimenticia es una materia prima valiosa dado a su alto contenido nutricional. La aplicación más popular del suero de leche es la proteína en polvo, que es comercializada mundialmente para atletas de medio y alto rendimiento.

Es importante considerar el aprovechamiento del suero de leche, ya que el 90% del volumen de materia prima utilizada se convierte en suero, el cual retiene 55% de los nutrientes iniciales de la leche (Dragone *et al*, 2009). También es necesario para evitar que el suero se deseche en cuerpos de agua, ya que por su alta carga de nutrientes puede causar la eutrofización. Este término se refiere al proceso en el cual existe una acumulación de nutrientes inorgánicos, los cuales necesitan oxígeno para ser descompuestos. Cuando hay un exceso de estos nutrientes, disminuye la cantidad de oxígeno disponible para los organismos nativos del cuerpo de agua, y así afectando negativamente su ciclo de vida y ecosistema (Butler Manufacturing Services, 2013).

5.6.2 Estiércol Animal

El estiércol es generalmente caracterizado por una relación baja de carbono/nitrógeno y una capacidad alta de amortiguación (Lin *et al*, 2019). Adicionalmente, el estiércol provee un ambiente más estable para microorganismos anaeróbicos e incrementa la biodegradación de sustratos ricos en carbono, como los lípidos (Xu *et al*, 2018). Esta materia prima es la más utilizada para la digestión anaerobia, sin embargo, se debe tener precaución ya que el estiércol puede contener metales pesados, hormonas y antibióticos dado al manejo del ganado. Estas impurezas pueden tener un efecto inhibitorio en los microorganismos y podrían afectar la digestión (Lin *et al*, 2019).

5.7 Codigestión

La codigestión es una digestión en la que, en lugar de utilizar un sustrato, se mezclan dos para poder obtener condiciones más favorables y tener una mejor producción de biogás. Cuando se está trabajando con más de un sustrato se debe tomar en cuenta la cantidad y el tipo de nutrientes que contiene cada uno. Un ejemplo de esto es lo beneficioso que es que se combine con un sustrato con bastante carbono y otro con bastante nitrógeno, así se tiene

un balance ideal de nutrientes para el proceso de digestión (Hagos *et al*, 2016). El pH también es un factor importante para la digestión. Ya que los microorganismos metanogénicos presentes en la reacción trabajan mejor con un pH neutral. En la fase de metanogénesis los microorganismos son bastante sensibles a cambios de pH, por lo que conviene tener un pH de 7. Mientras que en la acidogénesis son menos sensibles a cambios en el pH, y podrían trabajar en un rango de 4.0-8.5. Asimismo, para la hidrólisis, el pH ideal sería de 5.5-6.5 (Hagos *et al*, 2016). La digestión del suero de leche con estiércol puede ser beneficioso ya que diluye ciertos químicos tóxicos, aporta más nutrientes a la mezcla y se tiene más variedad de microorganismos y una mayor cantidad para que se pueda tener la digestión (Xu *et al*, 2018). El siguiente cuadro presenta ciertas características físicas y químicas del estiércol y el suero de leche, como el pH, los sólidos totales y sus componentes.

Cuadro 6: Características de estiércol y suero de leche

Parámetro	Estiércol	Suero de leche
pH	7.4	3.5
Sólidos totales (%w/w)	6.3	7.8
Sólidos volátiles (%w/w)	3.7	4.8
COD (g O ₂ /L)	103.6	74.9
Nitrógeno de amoníaco (g/L NH ₃ -N)	5.55	0.06
Nitrógeno total (g/L N)	6.81	1.02
Alcalinidad (g/L)	22.6	0
Proteínas (% w/w)	0.8	0.6
Aceite y grasa (%w/w)	2.7	0.7
Carbohidratos (%w/w)	0.3	3.6
Fenoles C ₆ H ₅ OH (mg/L)	137	0.5
Fósforo (g/L)	1.5	0.3

(Gelenis *et al*, 2007)

En el cuadro anterior se pueden analizar características importantes que beneficiarían la codigestión del estiércol y el suero de leche. En la tabla se puede ver que el pH del estiércol

es más alto que el del suero de leche, por lo que ayuda a que el pH de la mezcla sea más básico. La alcalinidad también es un factor importante, ya que indica la capacidad amortiguadora de cada componente, o qué tanto ácido puede absorber una solución manteniendo el pH estable. El estiércol tiene una capacidad amortiguadora mucho más alta que el suero de leche, por lo que aporta estabilidad a la digestión anaerobia. Los dos sustratos también se complementan ya que el estiércol aporta el nitrógeno y el suero aporta principalmente los carbonos dado a los carbohidratos presentes.

5.8 Demanda de Oxígeno

La demanda de oxígeno es una medición de la cantidad de sustancias oxidables en una muestra de agua. Es un parámetro importante para determinar la manera en la que cierta materia orgánica afecta la concentración de oxígeno disuelto en un cuerpo de agua. Los ecosistemas acuáticos necesitan una cantidad de oxígeno disuelto específico para poder sostenerse. La materia orgánica desechada en cuerpos de agua puede afectar negativamente el ecosistema ya que puede disminuir la cantidad de oxígeno disuelto, el cual es necesario para la supervivencia del mismo (Water Science School, 2018). Existen tres tipos de procedimientos que se pueden emplear para poder determinar la demanda de oxígeno, que consisten en medir la cantidad de oxígeno consumido en un periodo de tiempo determinado.

El primero es la demanda de oxígeno biológica (DBO), en el que se utilizan microorganismos para consumir compuestos orgánicos mientras consumen el oxígeno y se hace en un periodo de 5 días. De los tres tipos de análisis es el que toma más tiempo. Una ventaja del DBO es que si se utiliza el microorganismo correcto se puede modelar con mucha precisión el ambiente natural en el que se da la oxidación, obteniendo así una situación más apegada a la realidad. Este tipo de análisis tiene sus restricciones, ya que algunas muestras pueden tener sustancias tóxicas para los microorganismos, que eliminan la utilidad del análisis. Este procedimiento no es tan exacto, ya que tiene un 15% de desviación estándar, y la exactitud puede disminuir aún más si no se utiliza el microorganismo correcto (Boyles, 1997).

El siguiente es la demanda de oxígeno química (DQO), en donde se utilizan oxidantes químicos fuertes en una solución ácida caliente para oxidar el carbono orgánico a dióxido de carbono y agua. Este análisis determina el equivalente de oxígeno de la materia orgánica de una muestra que es susceptible a la oxidación al cuantificar la cantidad de oxidante químico utilizado por medio de un análisis volumétrico o fotométrico. Algunas ventajas de este tipo de análisis es que sustancias tóxicas no tienen un efecto en los resultados, el análisis se hace en un periodo relativamente corto (de 1.5 a 3 horas), y puede tener una desviación estándar del 5 al 10%. Los oxidantes que se utilizan comúnmente son el sulfato de manganeso ($Mn_2(SO_4)_3$) y el dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$). Las desventajas de este análisis son la interferencia de iones de cloro y la presencia de algunos compuestos orgánicos que no se han oxidado completamente (Boyles, 1997).

El último tipo de análisis es el carbón orgánico total (COT). Este mide la cantidad de carbono orgánico total en la muestra y consiste en utilizar calor, luz ultravioleta y un oxidante químico fuerte para que los compuestos orgánicos de la muestra se oxiden y se transformen en dióxido de carbono y agua. A diferencia del DQO y DBO, el COT es un análisis indirecto, ya que la demanda de oxígeno se mide al cuantificar la cantidad de dióxido de carbono que se produjo utilizando espectroscopía infrarroja o conductividad. Esto presenta un problema, ya que no puede diferenciar entre compuestos que tienen la misma cantidad de átomos de carbono.

Los resultados de la demanda de oxígeno serían, entonces, idénticos, pero en la práctica los compuestos pueden tener diferencias bastante significativas. Los oxidantes que se pueden utilizar para este análisis son el oxígeno, persulfato de potasio ($K_2S_2O_8$), calor y muchas veces se pueden combinar los compuestos mencionados anteriormente con un catalizador. Adicionalmente, tiene un tiempo de análisis corto, que puede demorar desde minutos hasta varias horas y tiene una desviación estándar del 5 al 10%. Una de las desventajas de este análisis es que se requiere equipo de alto valor económico para llevarse a cabo, y puede que exista una oxidación incompleta. La precisión del análisis puede ser menor si se tienen sólidos suspendidos en la mezcla, así que es importante la homogenización de la muestra (Boyles, 1997).

6. METODOLOGÍA

Materiales:

- Recipientes de detergente con válvula de despacho (hechos de polietileno de alta densidad)
- Estiercol
- Suero de leche
- Balanza
- Equipo de protección:
 - Guantes de látex
 - Lentes de laboratorio
 - Mascarilla quirúrgica

Procedimiento:

1. Primero se enjuagaron los recipientes a utilizar con agua, ya que pueden existir residuos de detergente. Esto se hizo hasta que ya no existiera rastro de espuma.
 - a. Al agregar el agua al recipiente se verificó que no existieran fugas, específicamente en el área de la tapadera y en la válvula. Esto se pudo ver al identificar que no existiera algún goteo de agua.
 - b. Después de enjuagar el recipiente no se tuvo que esperar a que seicara ya que el remanente era bastante pequeño como para modificar las proporciones de las mezclas.
2. Se hicieron las mezclas de estiércol y suero de leche. Las tres combinaciones fueron las siguientes: 40% suero de leche - 60% estiércol (mezcla 1), 50% suero de leche - 50% estiércol (mezcla 2) y 60% suero de leche - 40% estiércol (mezcla 3).
3. Para hacer cada combinación se utilizó una balanza, en donde se posicionó una cubeta y se agregaron las cantidades de estiércol y suero correspondientes a cada

mezcla. Todas tuvieron un peso final de 2000 g. Es importante mencionar que la proporción de estiércol mencionada anteriormente fue compuesta por 50% estiércol y 50% agua. Las cantidades correspondientes y el orden se detallará a continuación:

- a. Primero se agregó la proporción de suero y agua en el biodigestor. (mezcla 1: 800 g de suero y 600 g de agua, mezcla 2: 1000 g de suero y 500 g de agua, mezcla 3: 1200 g de suero y 400 g de agua).
 - b. Ya que esta mezcla tuvo un pH aproximadamente de 4, se ajustó con hidróxido de sodio hasta que llegara a un valor de 7. La cantidad de hidróxido de sodio a agregar para llegar a ese valor fue el siguiente para cada mezcla, mezcla 1: 5 g, mezcla 2: 8 g, mezcla 3: 10 g).
 - c. Para poder medir el pH se utilizaron tiras de pH. Para asegurar que todo estuviera homogenizado se tapó el digestor con su tapadera correspondiente para agitarlo.
 - d. Luego se agregó la proporción de estiércol y se mezcló todo de nuevo hasta obtener una mezcla uniforme (mezcla 1: 600 g, mezcla 2: 500 g, mezcla 3: 400 g). Para asegurar que todo estuviera homogenizado se tapó el digestor con su tapadera para agitarlo.
4. Se esperó aproximadamente 39 días para que la producción de biogás concluyera.
 5. Cuando el tiempo de producción terminó se midió la composición del biogás con el medidor de metano portátil (como dice el manual adjunto en el área de anexos) y se tomó una muestra de 20 mL del digestato para el análisis de DQO.

Análisis de Demanda Química de Oxígeno

Materiales:

- Reactivo de DQO de alto rango
- Agua Destilada
- Digestato
- Jeringa graduada
- Termoreactor
- Fotómetro
- Guantes de hule

1. Se diluyeron las muestras a analizar al 10%. Se tomó 5 mL del digestato correspondiente y se mezclaron con 45 mL de agua.
2. Se precalentó el termoreactor a 150°C.
3. Se agregaron 0.2 mL de la dilución que se hizo a un tubo de ensayo de reactivo de DQO. Cada muestra de digestato debió de tener su propio tubo de reactivo siendo un total de 3 muestras de digestato antes de la digestión, 9 muestras de digestato después de la digestión y un blanco (0.2 mL de agua destilada).
4. Se colocaron las muestras en el termoreactor por 2 horas a una temperatura de 150 centígrados.
5. Después de dejar que las muestras se enfriaran por 20 minutos en el termoreactor, se invirtió cada tubo de ensayo para homogenizar. Luego se colocaron en una gradilla para dejar que se terminaran de enfriar hasta temperatura ambiente.
 - a. Primero se leyó el blanco para calibrar el equipo. Luego se leyeron las muestras.
6. Por último, se leyó el dato de DQO de cada uno de los tubos de ensayo.

7. RESULTADOS

Cuadro 7: Composición promedio de las mezclas evaluadas

Compuesto	Promedio 40% Suero – 60% Estiércol	Promedio 50% Suero – 50% Estiércol	Promedio 60% Suero – 40% Estiércol
Metano (CH₄)	1.9 ± 0.2%	4.7 ± 0.1%	0.8 ± 0.1%
Dióxido de carbono (CO₂)	27.5 ± 2.2%	33.9 ± 2.3%	55.7 ± 3.0%
Oxígeno (O₂)	13.9 ± 2.9%	0.8 ± 1.0%	3.9 ± 1.0%
Sulfuro de hidrógeno (H₂S)	514 ± 84 ppm	480 ± 25 ppm	6191 ± 1605 ppm
Gas de Balance	56.7 ± 5.4%	60.6 ± 2.8%	39.6 ± 2.3%

Cuadro 8: Valor de prueba de DQO promedio de las mezclas evaluadas

Mezcla	DQO antes de digestión (mg/L)	DQO después de digestión (mg/L)	% reducido
1	4259 ± 150	3520 ± 150	17.3 ± 0.8%
2	5513 ± 150	4468 ± 150	19.0 ± 0.7%
3	7098 ± 150	5488 ± 150	22.7 ± 3.3%

8. DISCUSIÓN

El objetivo del estudio fue evaluar la factibilidad técnica de la producción de biogás a partir de suero de leche. El suero de leche por sí mismo no produce biogás por lo que se necesita utilizar una mezcla que contenga estiércol que aporte los microorganismos necesarios. Para este estudio se eligieron mezclas con las siguientes proporciones de peso: 40% suero de leche y 60% estiércol (mezcla 1), 50% suero de leche y 50% de estiércol (mezcla 2) y 60% suero de leche y 40% estiércol (mezcla 3). Se escogieron estas 3 mezclas ya que se quiso evaluar el comportamiento de una mezcla con la mayoría de estiércol, una mezcla con la mayoría de suero de leche y una mezcla con partes iguales de los dos componentes. Es importante mencionar que la proporción de estiércol utilizada en cada mezcla está conformada por 50% de agua y 50% de estiércol. Esto contribuyó a que se pudiera manejar mejor la mezcla y se pudiera agregar al biodigestor con mayor facilidad, ya que la entrada del recipiente tiene un diámetro de una pulgada y media. Adicionalmente, un digestato líquido no necesita tanta agitación como uno sólido, por lo que puede ser beneficioso agregarle agua dado a la falta de un sistema de agitación.

Para la producción de biogás se utilizó un recipiente que fuera anti-fugas, con volumen constante y que permitiera la cuantificación y caracterización utilizando el equipo de medición. Considerando estas características se utilizó un recipiente de detergente de 6.4 litros con una válvula dispensadora de detergente que funcionara como salida del gas para el momento de análisis. La apariencia del recipiente se puede ver en la figura 5 en el área de anexos. Adicionalmente, se eligió este recipiente ya que es accesible y de bajo costo. El recipiente no es muy grande, no ocupa mucho espacio, no se necesita tanta materia prima para cada prueba y se pueden transportar fácilmente. El material es de polietileno de alta densidad, por lo que es resistente a altas temperaturas, es duradero y es suficientemente resistente a las materias primas utilizadas en este estudio.

El estiércol utilizado en el estudio se obtuvo de una finca en Izabal. El proceso para obtenerlo fue: recolección, almacenamiento en un recipiente hermético y transporte de Izabal a la ciudad de Guatemala. La humedad es una característica importante del estiércol y es un parámetro útil para saber si se tendrá una digestión exitosa. El estiércol debe estar lo más húmedo posible para que los microorganismos del estiércol necesarios para la digestión sobrevivan. Si se trabaja con estiércol seco es posible que la población de microorganismos sea reducida o nula. Para obtener una materia prima activa se debe procurar que el estiércol sea recogido lo más antes posible del campo, antes que se seque dado al sol y el ambiente, y guardarlo en un recipiente hermético. Sin embargo, dado a que el método de recolección es bastante impreciso y manual, no se puede asegurar siempre la misma humedad en todas las muestras recolectadas. Todo el estiércol utilizado para las pruebas tenía apariencia y consistencia húmeda.

La composición promedio del biogás para cada mezcla se puede observar en la sección de resultados en el cuadro 7. Para la mezcla uno el porcentaje de metano fue de 1.9 ± 0.2 %v/v, para la mezcla dos 4.7 ± 0.1 %v/v y para la mezcla tres 0.8 ± 0.1 %v/v. Los valores de metano de las tres mezclas no fueron los esperados, ya que el biogás necesita contar con una proporción del 30-40% para que sea considerado de valor comercial o útil para producir energía. Hay varias posibles razones por las que el valor de metano no fue el esperado. Se pudo observar que la metanogénesis no se completó, a partir de la consideración del porcentaje bajo de metano y el porcentaje alto de dióxido de carbono. Como sí se produjo dióxido de carbono se puede inferir que la hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis se llevaron a cabo, mientras la metanogénesis no. Uno de los intermediarios que pudo haber sido el responsable de la inhibición del proceso son los ácidos grasos volátiles (AGV), los cuales se producen en la etapa acidogénica. Si la concentración de estos compuestos es muy alta, puede inhibir el proceso e interrumpir la metanogénesis. La producción excesiva de los AGV pudo haber sido por los cambios de temperatura que se tuvieron durante la digestión. Como no se tuvo un sistema de calefacción la temperatura de la reacción no era constante y según Deublein, y Steinhäuser (2008) los límites al que la temperatura puede fluctuar sin ocasionar problemas es de $\pm 2^{\circ}\text{C}$. En este estudio la

temperatura fluctuó fuera de ese rango. La fluctuación de temperatura inhibe específicamente la actividad de las bacterias metanogénicas ya que son bastante sensibles a cambios en su ambiente.

El contenido de dióxido de carbono de la mezcla 1 y 2 tienen poca diferencia entre ellos, con porcentajes de 27.5 ± 2.2 %v/v y 33.9 ± 2.3 %v/v respectivamente. Mientras que la mezcla 3 tuvo un porcentaje de 55.7 ± 3.0 %v/v, el cual difiere considerablemente de las primeras dos. El porcentaje elevado de la mezcla 3 puede ser por la proporción de suero, ya que en este caso es mayor comparada con la del estiércol. Esto puede causar que la cantidad de nutrientes sea muy elevada y que favorezca a la producción de dióxido de carbono en lugar de la producción de metano. Este desbalance de nutrientes también estimula la producción de sulfuro de hidrógeno y se puede observar la misma tendencia que el dióxido de carbono en los resultados. La cantidad de sulfuro de hidrógeno en la mezcla 1 y 2 es relativamente baja, con valores promedio de 514 ppm y 480 ppm respectivamente, y la mezcla 3 tiene un valor promedio de 6191 ppm, bastante por encima de las otras mezclas. Los resultados de estos dos compuestos demuestran que cuando se tiene una mezcla con la mayoría de suero el exceso de nutrientes puede desbalancear la digestión y favorecer la producción de otros compuestos en lugar del metano.

La mezcla que más produjo metano fue la 2 (50% suero y 50% estiércol), y la que menos produjo fue la mezcla 3 (60% suero y 40% estiércol). Según Comino (2012) la mezcla que produjo más metano también fue con proporciones de 50-50. Ese experimento se hizo por fases y se empezó con 100% estiércol, y al inicio de cada fase se incrementó la proporción de suero de leche. En la fase 2 y 3 de la prueba (en donde la mayoría era estiércol) la proporción de metano bajó a comparación de cuando solo se tenía estiércol. Luego, en la fase 3, la proporción llegó a 50-50 y el porcentaje de metano subió. Por último, en la fase 4 (en donde la mayoría era suero) la proporción de metano llegó a su punto más alto pero luego bajó rápidamente. Los resultados obtenidos son parecidos a los de Comino, ya que la mezcla con la proporción de 50-50 tuvo un mejor rendimiento. Luego la mezcla con mayor proporción de estiércol y por último la que tiene mayor proporción de suero. Basado en los resultados mencionados también se puede concluir que una mayor cantidad

de suero de leche mejora el rendimiento de la reacción. Esta conclusión solo es válida siempre y cuando la proporción de suero sea menor que la del estiércol. Cuando la proporción del suero es mayor a la del estiércol llega a un punto que a mayor proporción de suero de leche más inestable es la digestión y por lo tanto menor la producción de metano. El suero es una buena opción para la codigestión ya que aporta bastantes nutrientes solubles, sin embargo, una cantidad excesiva de estos nutrientes puede desbalancear la reacción e inhibirla.

Es importante considerar que en este estudio se utilizó un reactor batch, por lo que el funcionamiento es diferente a un continuo o semi continuo. Conviene utilizar un reactor batch para las primeras pruebas de un proceso, ya que requiere de poca inversión y manejo, pero puede presentar resultados diferentes a un proceso continuo. La productividad de un proceso batch es baja comparada a los otros tipos de procesos. Tiene un tiempo productivo menor y los microorganismos se mantienen mezclados con restos celulares, toxinas e impurezas que pueden inhibir su actividad. Al momento del montaje del proceso, se agregó la mezcla al digestor y se dejó $\frac{3}{4}$ del recipiente vacío para que el biogás que se iba a producir tuviera espacio. En este espacio vacío había aire, principalmente nitrógeno, y como este compuesto es inerte no se consumió en ningún momento. Se infiere entonces, que la composición principal del gas de balance es nitrógeno y por esto se tiene una proporción grande en los resultados de todas las mezclas. También es beneficioso tener un proceso continuo para que el aire inicial contenido dentro del sistema pueda ser removido a lo largo de la digestión.

En este estudio también se midió el DQO para poder definir cuánto baja el valor con la ayuda de la digestión. De los dos componentes el suero de leche es el que tiene un valor de DQO más alto. Por lo mismo la mezcla 3 tuvo el DQO inicial más alto, luego la mezcla 2 y la mezcla 1. Luego se midió el DQO al terminar la digestión y la mezcla que más redujo el valor de DQO fue la mezcla 3 con un $22.7 \pm 3.3\%$ y la que menos fue la mezcla 1 con un $17.3 \pm 0.8\%$. Aunque la mezcla 3 no haya sido la que más produjo metano sí es la que más produjo dióxido de carbono, y esa pudo haber sido la razón por la que esa mezcla tuvo la mayor reducción de DQO. En este caso se puede evidenciar que la mezcla

3 es la más inestable al analizar la desviación estándar de los resultados. La desviación estándar para la mezcla 3 es de 233 ppm mientras que la de la mezcla 1 y 2 es de 33 ppm y 40 ppm respectivamente. Los resultados para la mezcla 3 son bastante diferentes y por eso presenta una desviación estándar más alta. Esto pudo haber sido por la inestabilidad de la mezcla. Como ya se mencionó anteriormente, cuando la mayoría de la mezcla es suero de leche hay desbalance de nutrientes y eso puede causar inestabilidad en el reactor. Si hay inestabilidad los resultados van a ser menos constantes entre sí. Adicionalmente, aunque no se haya llegado al valor deseado de metano sí se puede concluir que la digestión se puede usar como un tratamiento para disminuir el valor del DQO y así disminuir la capacidad de contaminación del estiércol y del suero. Según Comino (2012) la disminución del DQO estuvo en un rango de 60%-85%. Estos valores son bastante más grandes que los que se obtuvieron en este estudio, por lo que es otro indicio que la digestión no se llevó a cabo en su totalidad por alguna inhibición.

Según Varnero (2011) el rango de pH que debería de tener la mezcla para la producción de biogás es de 6.5 a 7.5. En este caso el pH de todas las mezclas difiere, ya que tienen diferentes proporciones de suero y estiércol, pero a todas se le hizo la corrección a un pH de 7-8 antes de la digestión. Fue necesario que todas las muestras tuvieran el mismo pH para que se pudiera eliminar como un posible factor influyente en las diferencias de producción de metano entre ellas. El problema principal es el suero de leche ya que utilizando papeles indicadores de pH se encontró que tiene un valor entre 3 y 4. El pH de la mezcla sin corrección de pH es muy ácido, por lo tanto no pueden sobrevivir los microorganismos metanogénicos, por lo que se retrasa o impide la producción de metano y se tiene un digester inestable.

El orden en el que se agregan los componentes de la mezcla es importante, ya que los microorganismos que contiene el estiércol son sensibles a cambios repentinos en su ambiente, específicamente del pH. En las primeras pruebas que se hicieron se mezclaron los tres componentes en una cubeta y luego se le corrigió el pH. A lo largo de la digestión el biodigestor sí se infló, por lo que se asumió que sí se estaba produciendo biogás. Cuando el tiempo de retención fue de 30 días se analizó la composición del gas, y el metano era

menos del 1% y el dióxido de carbono más del 90%. Basado en estos resultados se pudo concluir que la digestión no fue exitosa y se encontró que era por el orden en el que se mezclaron los componentes. Como se mencionó anteriormente, los microorganismos son muy sensibles a cambios de pH, por lo que ajustar el pH después de mezclar todos los componentes no sirvió. Esto es dado a que antes que se corrigiera las bacterias estaban viviendo en un ambiente con un pH de 4, por lo que no podrían sobrevivir, y aunque se cambiara luego a un valor óptimo ese cambio repentino afecta su funcionamiento. Por esta razón, se cambió el procedimiento para que se mezclara el suero y el agua, se ajustara el pH y por último se agregara el estiércol, para que los microorganismos tuvieran un ambiente habitable desde el inicio. Luego de hacer ese cambio el pH antes y después de la digestión se mantuvo aproximadamente constante como se puede ver en el cuadro 18. Los resultados de pH fueron presentados en rangos ya que se utilizaron papeles indicadores de pH, cuyo principio es colorimetría, por lo que no se pueden obtener valores puntuales. Sin embargo, para el propósito de este estudio la exactitud de esta herramienta es suficiente.

Para tener mayor detalle de la digestión anaerobia se tomaron resultados intermedios y finales de la composición del biogás generado. El resultado intermedio específicamente, el cual fue tomado luego de 14 días, fue para ver el estado de la digestión. Cuando se hizo esta medición los niveles de dióxido de carbono no sobrepasaban el 60%, lo cual era un buen indicio. Esto es importante ya que basado en pruebas pasadas fallidas luego de 14 días la concentración del dióxido de carbono estaba en un valor de más del 90%, y cuando se hizo la medición luego de 30 días la proporción de dióxido de carbono seguía en ese rango.

Basado en los compuestos que se producen en cada fase de la digestión se puede inferir que cuando se hizo la medición preliminar la digestión ya estaba en la fase acetogénica, ya que el porcentaje de dióxido de carbono era bastante alto. Sin embargo, sí hay varias diferencias que se pueden observar entre las tres mezclas. La mezcla que tuvo un cambio más drástico en el porcentaje de metano fue la mezcla 2, ya que en la medición preliminar era un porcentaje de 0.8 ± 0.1 %v/v y en la final 4.7 ± 0.1 %v/v. La mezcla 1 también tuvo un incremento, no tan drástico, de 0.9 ± 0.6 %v/v a 1.9 ± 0.2 %v/v. Por

último, la mezcla 3 casi no presentó un incremento, ya que el valor preliminar fue de $0.6 \pm 0.1\%v/v$ y el final de $0.8 \pm 0.1\%v/v$. Estos resultados demuestran como las dos primeras mezclas sí lograron llegar a la etapa metanogénica, aunque los resultados no hayan sido los esperados, y la mezcla 3 siempre se quedó estancada en la etapa acetogénica.

Para poder hacer la medición final de la composición se esperó 25 días más. Para poder decidir el tiempo de finalización de la digestión se utilizó un parámetro visual: qué tan inflado estaba el biodigestor. Ya que el biodigestor de polietileno de alta densidad tiene cierta elasticidad, el mismo empezó a inflarse cuando el gas tenía suficiente presión. Para poder definir el punto en el que ya no se produciría más biogás se analizó visualmente qué tan inflado estaba el biodigestor, y cuando ya no se presentó cambio por varios días la digestión se dio por concluida. Una recomendación para que se sepa con más exactitud el momento final de la digestión es tener sensores de concentración de metano o el acceso a un detector de metano diariamente para poder observar el cambio de concentración.

Para maximizar la producción de biogás se deben tomar en consideración la temperatura a la que se lleva a cabo la digestión y la distribución de los elementos dentro del digestor. El sistema de calefacción es importante ya que le da más estabilidad a la degradación e incrementa la eficiencia, ya que los microorganismos siempre están trabajando a la temperatura óptima. En este caso no se tuvo la posibilidad de tener un sistema de calefacción. Además, el sistema de calefacción permite que la digestión se pueda llevar a cabo en las mismas condiciones en cualquier época del año. En caso no se tenga este sistema el tiempo de retención depende bastante del clima, ya que es bastante común que los digestores estén a temperatura ambiente, como en este estudio. Esto afecta ya que en la época de frío el tiempo de retención puede ser mayor que en la época de calor.

Los biodigestores fueron colocados al aire libre y se taparon con una lona de plástico. Esto para mantener la temperatura lo más constante posible y evitar que fueran afectados por factores ambientales como lluvia y sol. Los biodigestores se deben proteger del sol porque son de plástico puede que se degraden con el tiempo y puede haber mayor riesgo de fugas. Para que la reacción se pueda mantener a una temperatura más alta se

puede agregar otro sustrato con contenido alto en carbohidratos, como ensilaje de plantas de maíz y centeno, y así tener una digestión más exotérmica. Por otro lado, un sistema de mezclado promueve el movimiento de los microorganismos, por lo que siempre hay disponibilidad de sustrato para ellos. No es completamente necesario para este proceso ya que el sustrato tiene un contenido bajo de sólidos.

9. CONCLUSIONES

- Se logró analizar la composición del biogás y se encontró que en todas las muestras el porcentaje de metano es menor del 5%, y el dióxido de carbono y el gas de balance (que principalmente puede ser nitrógeno) fueron los que tuvieron mayor proporción.
- La proporción que genera la mayor cantidad de metano es la mezcla 2 (50% suero de leche y 50% estiércol) con un 4.7 ± 0.1 %v/v, luego la mezcla 1 con un 1.9 ± 0.2 %v/v y por último la mezcla 3 con un 0.8 ± 0.1 %v/v.
- El DQO para la mezcla 1 tuvo una reducción del $17.3 \pm 0.8\%$, la mezcla 2 del $19.0 \pm 0.7\%$ y la mezcla 3 del 22.7 ± 3.3 %. Esto demuestra que la digestión anaerobia se puede utilizar para disminuir la demanda química de oxígeno del sustrato y así disminuir el potencial de contaminación del mismo.

10.RECOMENDACIONES

- Agregar un sustrato alto en carbohidratos para que la digestión sea más exotérmica y disminuir la necesidad de un sistema de calentamiento.
- Dividir el proceso de digestión en dos, en la cual en la primera fase se llevan a cabo las primeras 3 etapas (hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis) y en la siguiente fase la metanogénesis para ajustar específicamente el pH dependiendo de la necesidad de la fase y eliminar compuestos tóxicos antes que empiece la etapa metanogénica.
- Llevar a cabo el proceso como semi continuo o continuo utilizando sensores de pH y temperatura para tener un mejor control y ajustar las variables en caso se necesite. También se recomienda utilizar un sistema de calefacción para mantener la temperatura lo más constante posible.
- Agregar carbón activado para la adsorción de inhibidores, como compuestos orgánicos volátiles y otras impurezas que impiden la producción de metano.
- Agregar arqueas metanogénicas para tener una población bacteriana más eficiente en la producción de metano.
- Llevar a cabo un análisis de nitrógeno, fósforo, potasio, metales pesados, materia seca, y pH al digestato para evaluar su posibilidad de ser reciclado en otro proceso.

11.REFERENCIAS

Al Seadi, T., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S., Janssen, R. (2008). Biogas Handbook. Dinamarca: University of Southern Denmark Esbjerg.

Antonelli, J., Lindino, C., Azevedo, J., Souza, S., Cremonez, P., Rossi, E. (2016). Biogas production by the anaerobic digestion of whey. *Revista de Ciências Agrárias*, 39, 463-468, doi: 10.19084/RCA15087

Bharathiraja, B., Sudharsana, T., Jayamuthunagaib, J., Praveenkumarc, R., Chozhavendhand, S., Iyyappan, J. (2018). Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 570-582, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.093>

Boyles, W. (1997). The Science of Chemical Oxygen Demand. *Technical Information Series*, 9.

CNEE. (2021). Monitor Mensual 2021. Extraído de <https://www.cnee.gob.gt/wp/monitor-mensual-2021/>

Deublein, D., Steinhauser, A. (2008). Biogas from waste and renewable sources. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Dragone, G., Mussatto, S., Oliveira, J., Teixeira, J. (2009). Characterization of volatile compounds in an alcoholic beverage produced by whey fermentation. *Food Chemistry*, 112, 929-935, doi:10.1016/j.foodchem.2008.07.005.

Gastalver, M. (2015). UF1180: Procesos básicos de elaboración de quesos. España: Editorial Elearning S.L.

Gea Group. (2023). Centrifugal Separator. Extraído de <https://www.gea.com/en/products/centrifuges-separation/centrifugal-separator/?i=dairy-processing>

Gelegenis, J., Georgakakis, D., Angelidaki, I., Mavriz, V. (2007). Optimization of biogas production by co-digesting whey with diluted poultry manure. *Renewable Energy*, 32, 2147-2160, doi: 10.1016/j.renene.2006.11.015

Gerardi, M. (2003). The Microbiology of anaerobic digesters. Estados Unidos: Jonh Wiley & Sons, Inc.

Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., Lu, X. (2016). Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>

Harding, F. (1995). Milk Quality. Reino Unido: Chapman & Hall.

Khezri, S., Seyedsaleh, M., Hasanpour, I., Dastras, M., Dehghan P. (2016). Whey: Characteristics, Applications and Health Aspects.

Krich, K., Augenstein, D., Barmale, JP., Benemann, J., Rutledge, B., Salour, D. (2005). Biomethane from Dairy Waste: A sourcebook for the production and use of renewable natural gas in California. Estados Unidos: Western United Dairymen.

Lievore, P., Simoes, D., Silva, K., Drunkler, N., Barana, A., Nogueira, A., Demiate, I. (2015). Chemical characterization and application of acid whey in fermented milk. *Journal of Food Science and Technology*, 52(4), 2083-2092. doi: 10.1007/s13197-013-1244-z

Lin, L., Xu, F., Ge, X., Li, Y. (2019). Biological treatment of organic materials for energy and nutrients production—Anaerobic digestion and composting. *Advances in Bioenergy*, Volume 4, ISSN 2468-0125. <https://doi.org/10.1016/bs.aibe.2019.04.002>

Mihai, A., Holban, A. (2019). Herbal Beverages as a Source of Antioxidant Phenolics. *Natural Beverages*, 125-142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816689-5.00005-5>

Miller, G., Jarvis, J., McBean, L. (2000). *Handbook of Dairy Foods and Nutrition*. 2a ed. Estados Unidos: CRC Press LLC.

Ray, N., Mohanty, M., Mohanty, R. (2016). Biogas Compression and Storage System for Cooking Applications in Rural Households. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6, 594-598.

Rivas-Solano, O., Faith-Vargas, M., Guillén-Watson, R. (2016). Biodigesters: chemical, physical and biological factors related to their productivity. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(Suppl. 1), 47-53. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v29i5.2516>

Tsakali, E., Petrotos, K., D'Alessandro, A., Goulas, P. (2010). A review on whey composition and the methods used for its utilization for food and pharmaceutical products. 6th International Conference on Simulation and Modelling in the Food and Bio-Industry 2010, FOODSIM 2010.

Turgeon, A., Morse, E. (2022). Natural Gas. Extraído de <https://education.nationalgeographic.org/resource/natural-gas>

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2023). Types of Anaerobic Digesters. Extraído de <https://www.epa.gov/anaerobic-digestion/types-anaerobic-digesters>

Varnero, M. (2011). *Manual de Biogás*. Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

Water Science School. (2018). Biochemical Oxygen Demand (BOD) and Water.

Xu, F., Li., Ge., Yang., Li. (2018). Anaerobic digestion of food waste – challenges and opportunities. *Bioresource Technology*, 247, 1047-1058.

12. ANEXOS

Nota: En la sección de anexos se encontrarán los datos originales anterior y posterior a la digestión, la proporción del biogás obtenido de cada mezcla y el cambio del valor del DQO. Adicionalmente, se encontrarán cálculos que se hicieron para poder resumir la información del triplicado que se hizo para cada mezcla, los datos de placa de los equipos empleados en el análisis e imágenes pertinentes para el mayor entendimiento del estudio y sus resultados. Las proporciones de las mezclas fueron de la siguiente manera: 40% suero de leche y 60% estiércol (mezcla 1), 50% suero de leche y 50% de estiércol (mezcla 2) y 60% suero de leche y 40% estiércol (mezcla 3).

12.1 Datos Originales

Cuadro 9: Cantidades utilizadas de materia prima mezcla 1

Componente	Porcentaje de mezcla (%)	Cantidad (g)
Suero de leche	40	800 ± 0.5
Estiércol	30	600 ± 0.5
Agua	30	600 ± 0.5

Cuadro 10: Cantidades utilizadas de materia prima mezcla 2

Componente	Porcentaje de mezcla (%)	Cantidad (g)
Suero de leche	50	1000 ± 0.5
Estiércol	25	500 ± 0.5
Agua	25	500 ± 0.5

Cuadro 11: Cantidades utilizadas de materia prima mezcla 3

Componente	Porcentaje de mezcla (%)	Cantidad (g)
Suero de leche	60	1200 ± 0.5
Estiércol	20	400 ± 0.5
Agua	20	400 ± 0.5

Cuadro 12: Resultados preliminares mezcla 1

Compuesto	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Biodigestor 3
Metano (CH ₄)	0.2 ± 0.3 %	1.3 ± 0.3 %	1.3 ± 0.3 %
Dióxido de carbono (CO ₂)	25.3 ± 0.3 %	23.9 ± 0.3 %	22.2 ± 0.3 %
Oxígeno (O ₂)	13.1 ± 1.0 %	19.0 ± 1.0 %	12.9 ± 1.0 %
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	1824 ± 36 ppm	1212 ± 24 ppm	1375 ± 28 ppm
Gas de Balance	61.4 ± 2.3 %	55.8 ± 2.3%	63.6 ± 2.3%

Nota: Los resultados preliminares se tomaron luego de dos semanas de digestión

Cuadro 13: Resultados preliminares mezcla 2

Compuesto	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Biodigestor 3
Metano (CH ₄)	0.7 ± 0.3 %	0.8 ± 0.3 %	0.9 ± 0.3 %
Dióxido de carbono (CO ₂)	56.0 ± 0.3 %	60.8 ± 0.3 %	62.2 ± 0.3 %
Oxígeno (O ₂)	3.6 ± 1.0 %	3.4 ± 1.0 %	0.2 ± 1.0 %
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	3645 ± 73 ppm	3406 ± 68 ppm	4010 ± 80 ppm
Gas de Balance	39.7 ± 2.3 %	35.0 ± 2.3 %	36.8 ± 2.3 %

Nota: Los resultados preliminares se tomaron luego de dos semanas de digestión

Cuadro 14: Resultados preliminares mezcla 3

Compuesto	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Biodigestor 3
Metano (CH ₄)	0.6 ± 0.3 %	0.7 ± 0.3 %	0.6 ± 0.3%
Dióxido de carbono (CO ₂)	60.7 ± 0.3 %	62.3 ± 0.3 %	61.8 ± 0.3 %
Oxígeno (O ₂)	2.9 ± 1.0 %	1.0 ± 1.0 %	3.2 ± 1.0 %
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	3357 ± 67 ppm	5647 ± 113 ppm	3448 ± 69 ppm
Gas de Balance	35.8 ± 2.3 %	36.0 ± 2.3 %	34.4 ± 2.3 %

Nota: Los resultados preliminares se tomaron luego de dos semanas de digestión

Cuadro 15: Resultados finales mezcla 1

Compuesto	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Biodigestor 3
Metano (CH ₄)	1.7 ± 0.3 %	2.1 ± 0.3 %	2.0 ± 0.3 %
Dióxido de carbono (CO ₂)	24.9 ± 0.3 %	29.0 ± 0.3 %	28.5 ± 0.3 %
Oxígeno (O ₂)	10.5 ± 1.0 %	15.9 ± 1.0 %	15.2 ± 1.0 %
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	424 ± 8 ppm	589 ± 12 ppm	530 ± 11 ppm
Gas de Balance	62.9 ± 2.3 %	53.0 ± 2.3 %	54.3 ± 2.3 %

Cuadro 16: Resultados finales mezcla 2

Compuesto	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Biodigestor 3
Metano (CH ₄)	4.7 ± 0.3 %	4.6 ± 0.3 %	4.7 ± 0.3 %
Dióxido de carbono (CO ₂)	35.8 ± 0.3 %	31.3 ± 0.3 %	34.6 ± 0.3 %
Oxígeno (O ₂)	0.2 ± 1.0 %	0.3 ± 1.0 %	1.9 ± 1.0 %
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	471 ± 9 ppm	460 ± 9 ppm	508 ± 10 ppm
Gas de Balance	59.3 ± 2.3 %	63.8 ± 2.3 %	58.8 ± 2.3 %

Cuadro 17: Resultados finales mezcla 3

Compuesto	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Biodigestor 3
Metano (CH ₄)	0.8 ± 0.3 %	0.8 ± 0.3%	0.8 ± 0.3 %
Dióxido de carbono (CO ₂)	53.4 ± 0.3 %	59.1 ± 0.3 %	54.7 ± 0.3 %
Oxígeno (O ₂)	4.0 ± 1.0 %	2.8 ± 1.0 %	4.8 ± 1.0 %
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	8019 ± 160 ppm	5014 ± 100 ppm	5540 ± 111 ppm
Gas de Balance	41.8 ± 2.3 %	37.3 ± 2.3 %	39.7 ± 2.3 %

Cuadro 18: DQO Mezcla 1

Muestra	Valor DQO (mg/L)
Antes de la digestión	4259 ± 150
Biodigestor 1	3558 ± 150
Biodigestor 2	3498 ± 150
Biodigestor 3	3505 ± 150

Nota: En el cuadro se puede observar el DQO de la mezcla anterior a la digestión y el DQO de los tres digestores posterior a la digestión.

Cuadro 19: DQO Mezcla 2

Muestra	Valor DQO (mg/L)
Antes de la digestión	5513 ± 150
Biodigestor 1	4478 ± 150
Biodigestor 2	4502 ± 150
Biodigestor 3	4424 ± 150

Nota: En el cuadro se puede observar el DQO de la mezcla anterior a la digestión y el DQO de los tres digestores posterior a la digestión.

Cuadro 20: DQO Mezcla 3

Muestra	Valor DQO (mg/L)
Antes de la digestión	7098 ± 150
Biodigestor 1	5237 ± 150
Biodigestor 2	5698 ± 150
Biodigestor 3	5530 ± 150

Nota: En el cuadro se puede observar el DQO de la mezcla anterior a la digestión y el DQO de los tres digestores posterior a la digestión.

Cuadro 21: pH antes y después de la digestión anaerobia

Mezcla	Biodigestor	pH antes de digestión	pH después de digestión
1	1	7-8	6-7
	2	7-8	6-7
	3	7-8	6-7
2	1	7-8	6-7
	2	7-8	6-7
	3	7-8	6-7
3	1	7-8	6-7
	2	7-8	6-7
	3	7-8	6-7

Nota: El pH se presenta en rangos ya que se utilizaron tiras indicadoras de pH.

Cuadro 22: Composición de lactosa del suero de leche utilizado

Componente	Cantidad (% p/v)
Lactosa	3.53

12.2 Datos Calculados

Cuadro 23: Promedio y desviación de resultados preliminares y finales (mezcla 1)

Compuesto	Promedio de resultado preliminar	Desviación estándar	Promedio de resultado final	Desviación estándar
Metano (CH ₄)	0.9%	0.6%	1.9%	0.2%
Dióxido de carbono (CO ₂)	23.8%	1.6%	27.5%	2.2%
Oxígeno (O ₂)	15.0%	3.5%	13.9%	2.9%
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	1470 ppm	317 ppm	514 ppm	83.6 ppm
Gas de Balance	60.3%	4.0%	56.7%	5.4%

Cuadro 24: Promedio y desviación de resultados preliminares y finales (mezcla 2)

Compuesto	Promedio de resultado preliminar	Desviación estándar	Promedio de resultado final	Desviación estándar
Metano (CH ₄)	0.8%	0.1%	4.7%	0.1%
Dióxido de carbono (CO ₂)	59.7%	3.3%	33.9%	2.3%
Oxígeno (O ₂)	2.4%	1.9%	0.8%	1.0%
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	3687 ppm	304 ppm	480 ppm	25 ppm
Gas de Balance	37.2%	2.4%	60.6%	2.8%

Cuadro 25: Promedio y desviación de resultados preliminares y finales (mezcla 3)

Compuesto	Promedio de resultado preliminar	Desviación estándar	Promedio de resultado final	Desviación estándar
Metano (CH ₄)	0.6 %	0.1%	0.8%	0.0%
Dióxido de carbono (CO ₂)	61.6 %	0.8%	55.7%	3.0%
Oxígeno (O ₂)	2.4%	1.2%	3.9%	1.0%
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	4151 ppm	1297 ppm	6191 ppm	1605 ppm
Gas de Balance	35.4%	0.9%	39.6%	2.3%

Cuadro 26: Porcentaje de reducción de DQO mezcla 1

Muestra	Valor DQO (%)
Biodigestor 1	16.5
Biodigestor 2	17.9
Biodigestor 3	17.7

Cuadro 27: Porcentaje de reducción de DQO mezcla 2

Muestra	Valor DQO (%)
Biodigestor 1	18.8
Biodigestor 2	18.3
Biodigestor 3	19.8

Cuadro 28: Porcentaje de reducción de DQO mezcla 3

Muestra	Valor DQO (%)
Biodigestor 1	26.2
Biodigestor 2	19.7
Biodigestor 3	22.1

Cuadro 29: Promedio y desviación estándar del DQO

Mezcla	Promedio (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)
1	3520	33
2	4468	40
3	5488	233

Cuadro 30: Promedio y desviación estándar del porcentaje de reducción del DQO

Mezcla	Promedio (%)	Desviación estándar (%)
1	17.3	0.8
2	19.0	0.7
3	22.7	3.3

12.3 Cálculos de muestra

Cálculo 1: Promedio de composición de metano

$$\mu = \frac{1.7 \pm 0.3\% + 2.1 \pm 0.3\% + 2.0 \pm 0.3\%}{3} = 1.9 \pm 0.2\%$$

Nota: Este cálculo se hizo para obtener el promedio del porcentaje de metano presente en los 3 biodigestores de cada mezcla.

Cálculo 2: Desviación estándar de composición de metano

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(1.7\% - 1.9\%)^2 + (2.1\% - 1.9\%)^2 + (2.0\% - 1.9\%)^2}{3}} = 0.2\%$$

Nota: Este cálculo se hizo para obtener la desviación estándar del porcentaje de metano presente en los 3 biodigestores de cada mezcla.

12.4 Datos de Placa

Cuadro 31: Datos de placa de Analizador de Biogás

Modelo	5000
Marca	Geotech
Método de análisis	Sensores infrarrojos y electroquímicos
Gases de medición	Metano (%), dióxido de carbono (%), oxígeno (%), sulfuro de hidrógeno (ppm)
Rango de temperatura de uso	-10°C - 50°C

Cuadro 32: Datos de placa de Reactor de DQO

Marca	Hanna Instruments
Modelo	HI839800
Capacidad	25 tubos de ensayo
Tiempo de digestión	1 – 180 minutos
Exactitud	± 2 °C
Estabilidad de temperatura	± 0.5 °C

Cuadro 33: Datos de placa de Fotómetro para DQO

Marca	Hanna Instruments
Modelo	HI83099
Rango	0 – 15000 mg/L
Exactitud	± 150 mg/L o $\pm 3\%$ del valor @ 25 °C
Fuente de Luz	Lámpara de tungsteno @ 610 nm

12.5 Figuras Adicionales

Figura 5: Recipiente de detergente utilizado como biodigestor



Nota: El biodigestor tiene la entrada con una tapadera de rosca en donde se agregaron todos los componentes de la mezcla (izquierda) y la válvula dispensadora con el botón rojo para liberar el gas de una manera controlada al analizarlo (derecha)

Figura 6: Muestra de digestato (al final de la digestión)



Figura 7: Extracto del manual del Analizador de biogás 5000: Preparar el equipo para la medición

8.9 Taking gas and flow measurement

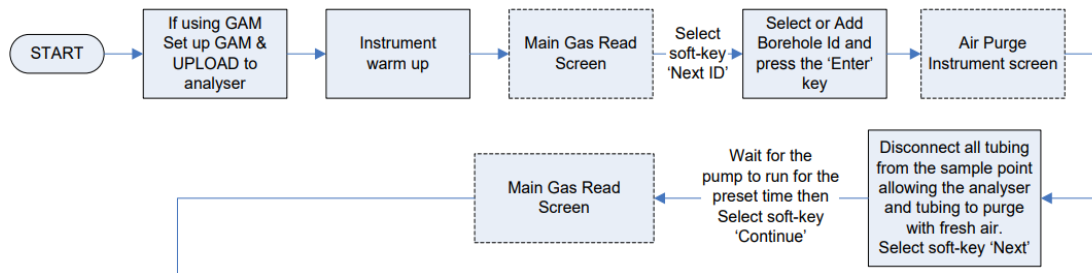


Figura 8: Extracto del manual del Analizador de Biogás 5000: Medir la composición del biogás

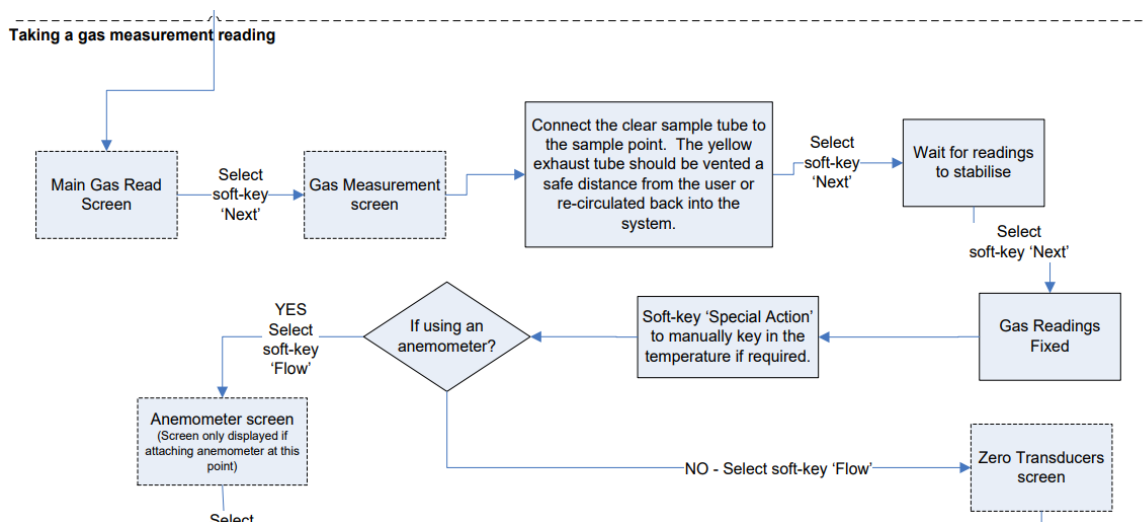


Figura 9: Análisis de biogás



Nota: En esta figura se puede ver la manera en la que se analizó el biogás. A la válvula dispensadora del digester se le adaptó una pieza de PVC para que el gas pudiera entrar por allí a la manguera y así ser succionado por el detector. A la mitad de la manguera se puede ver un filtro de líquidos para evitar daños al equipo.

Figura 10: Equipos utilizados para medir el DQO



Nota: En esta figura se pueden ver los equipos utilizados para el análisis de DQO. A la izquierda se puede ver el reactor y a la derecha el fotómetro para el análisis de cada muestra.

Figura 11: Reactivo utilizado para análisis de DQO



Nota: El reactivo utilizado para el análisis de DQO fue el de alto rango, el cual tiene un rango de 0 a 15000 mg/L

Figura 12: Curva de HPLC de análisis de lactosa del suero de leche

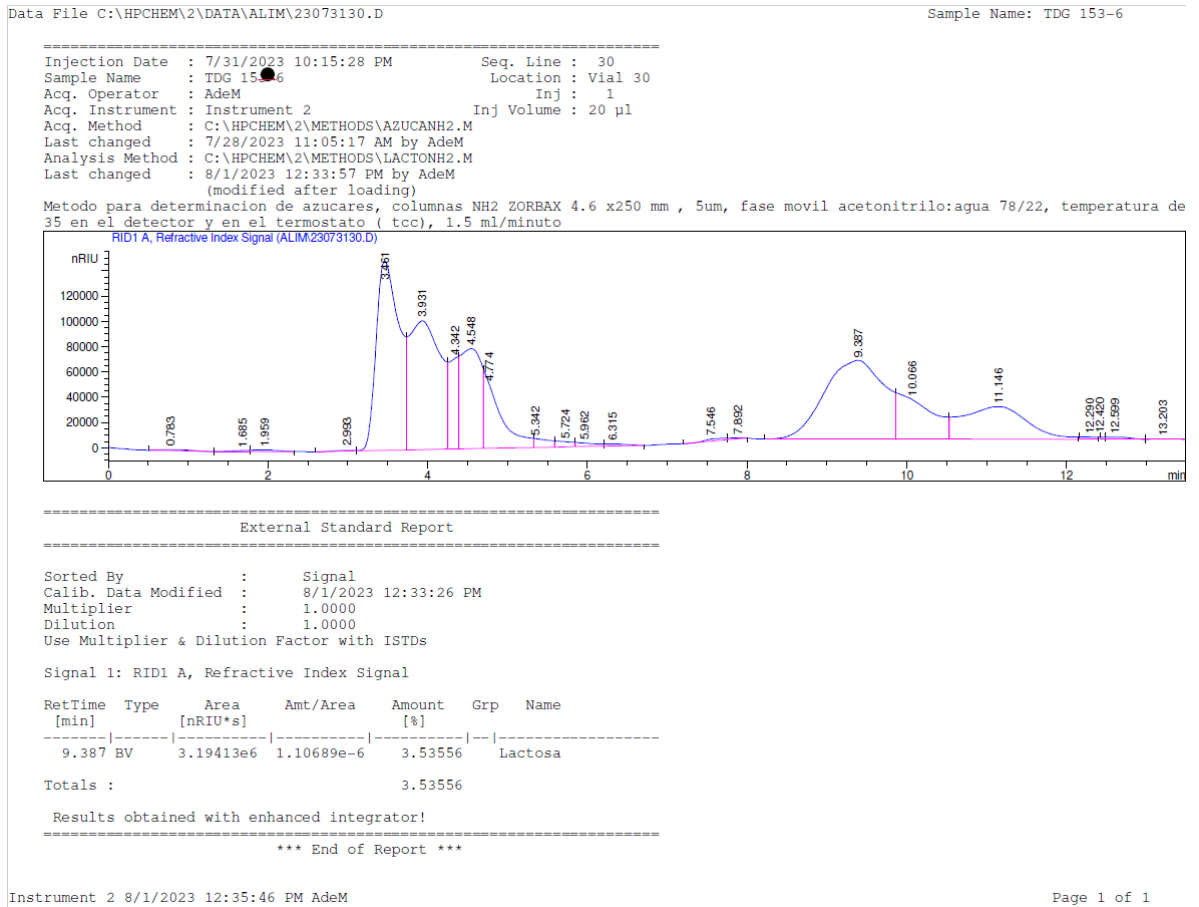


Figura 13: Curva de calibración para análisis de HPLC de lactosa (1)

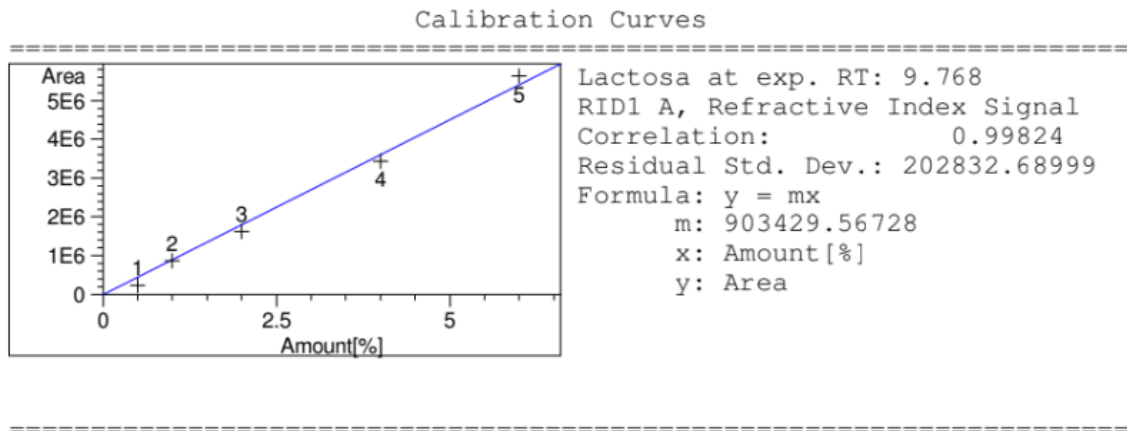
RetTime [min]	Lvl Sig	Amount [%]	Area	Amt/Area	Ref Grp Name
9.768	1	5.00000e-1	2.29702e5	2.17674e-6	Lactosa
	2	1.00000	8.57922e5	1.16561e-6	
	3	2.00000	1.62296e6	1.23232e-6	
	4	4.00000	3.42756e6	1.16701e-6	
	5	6.00000	5.63207e6	1.06533e-6	

More compound-specific settings:

Compound: Lactosa
 Time Window : From 9.131 min To 10.331 min

=====
 Peak Sum Table

Figura 14: Curva de calibración para análisis de HPLC de lactosa (2)



12.6 Análisis de Error

Cálculo 3: Incertidumbre de sumas y restas

$$S_y = \sqrt{S_a^2 + S_b^2 + \dots + S_n^2}$$

$$S_y = \sqrt{0.003^2 + 0.003^2 + 0.01^2 + 0.02^2}$$

$$S_y = 0.023 = 2.3\%$$

Nota: Este cálculo se hizo para calcular la incertidumbre del gas de balance proporcionado por el analizador de biogás.

12.7 Glosario

- **Capacidad calorífica:** la cantidad de energía que se debe suministrar a un objeto para producir un incremento de la temperatura de 1°C.
- **Capacidad amortiguadora:** la cantidad de ácido o base que una solución puede soportar antes de producir un cambio en el pH.
- **Digestato:** la biomasa líquida/sólida que queda luego de que se lleve a cabo la digestión anaerobia.
- **Digestión anaerobia:** un proceso llevado a cabo sin presencia de oxígeno en donde los microorganismos descomponen los compuestos del sustrato y producen principalmente metano y dióxido de carbono.
- **Proceso batch o por lotes:** un proceso en el que no se alimenta ni sale producto continuamente. Este proceso tiene un tiempo definido en el cual termina.
- **Proceso continuo:** un proceso en el que sí se alimenta y sale producto continuamente. Este proceso no tiene un tiempo definido de funcionamiento ya que mientras se alimente puede seguir funcionando indefinidamente.
- **Polietileno de alta densidad:** un tipo de polímero que está hecho del monómero etileno y se usa en muchas aplicaciones como envasado de alimentos y productos de limpieza.
- **Scrubber:** equipo que se puede utilizar para remover impurezas y/o partículas de gases.
- **Tasa de carga orgánica (TCO):** la cantidad de materia orgánica alimentada por unidad de tiempo y unidad de volumen del reactor.