



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y
AMBIENTALES

CARRERA: INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

INFORME FINAL DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN
CURRICULAR, MODALIDAD TESIS

TEMA: “OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS
MEDIANTE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL SUERO DE LECHE,
SUPLEMENTADO CON MELAZA DE CAÑA DE AZÚCAR, A ESCALA
LABORATORIO”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Agroindustrial

Línea de investigación: gestión producción, productividad, innovación y desarrollo socio económico.

Autor: Arotingo Guandinango Huaita Pacari

Director: Ing. Espín Valladares Rosario Del Carmen MSc.

Ibarra- mayo-2023



CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

Ibarra, 05 de mayo del 2023

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: **“OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL SUERO DE LECHE, SUPLEMENTADO CON MELAZA DE CAÑA DE AZÚCAR, A ESCALA LABORATORIO”**, de autoría de la señorita Arotingo Guandinango Huaita Pacari estudiante de la Carrera de Ingeniería Agroindustrial, el tribunal tutor **CERTIFICAMOS** que el/la autor/a o autores ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

TRIBUNAL TUTOR

FIRMA

Ing. Rosario Espín MSc.

DIRECTORA TRABAJO TITULACIÓN



CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

Ibarra, 5 de mayo del 2023

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: **"OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL SUERO DE LECHE, SUPLEMENTADO CON MELAZA DE CAÑA DE AZÚCAR, A ESCALA LABORATORIO"**, de autoría de la señorita Arotingo Guandinango Huaita Pacari estudiante de la Carrera de Ingeniería Agroindustrial, el tribunal tutor **CERTIFICAMOS** que el/la autor/a o autores ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

TRIBUNAL TUTOR

FIRMA

Ing. José Pais PhD.

MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN



CERTIFICACIÓN TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN

Ibarra, 5 de mayo del 2023

Para los fines consiguientes, una vez revisado el documento en formato digital el trabajo de titulación: **“OPTIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS MEDIANTE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA DEL SUERO DE LECHE, SUPLEMENTADO CON MELAZA DE CAÑA DE AZÚCAR, A ESCALA LABORATORIO”**, de autoría de la señorita Arotingo Guandinango Huaita Pacari estudiante de la Carrera de Ingeniería Agroindustrial, el tribunal tutor **CERTIFICAMOS** que el/la autor/a o autores ha procedido a incorporar en su trabajo de titulación las observaciones y sugerencia realizadas por este tribunal.

Atentamente,

TRIBUNAL TUTOR

FIRMA

Ing. Jimmy Núñez MSc.

MIEMBRO TRIBUNAL TUTOR TRABAJO DE TITULACIÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:


| DATOS DE CONTACTO | | | |
|--------------------------------|--|------------------------|------------|
| CÉDULA DE IDENTIDAD: | 1004031207 | | |
| APELLIDOS Y NOMBRES: | Arotingo Guandinango Huaita Pacari | | |
| DIRECCIÓN: | Cotacachi - Comunidad Santa Bárbara | | |
| EMAIL: | hparotingog@utn.edu.ec | | |
| TELÉFONO FIJO: | 2-915-657 | TELÉFONO MÓVIL: | 0995367306 |
| DATOS DE LA OBRA | | | |
| TÍTULO: | Optimización de la producción de biogás mediante la digestión anaeróbica del suero de leche, suplementado con melaza de caña de azúcar, a escala laboratorio | | |
| AUTOR (A): | Huaita Arotingo | | |
| FECHA: DD/MM/AAAA | 15/05/2023 | | |
| SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO | | | |
| PROGRAMA: | <input checked="" type="checkbox"/> PREGRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO | | |
| TITULO POR EL QUE OPTA: | Ingeniera Agroindustrial | | |
| ASESOR /DIRECTOR: | Ing. Rosario Espín MSc. | | |

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 11 días del mes de mayo de 2023.

EL AUTOR:

Firma: 

Nombre: Arotingo Guandinango Huaita Pacari



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
ACREDITADA RESOLUCIÓN N°. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES
CARRERA DE AGROINDUSTRIA



Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta. Arotingo Guandinango
Huaita Pacari, con cédula de ciudadanía N° 100403120-7 bajo mi supervisión.

Ing. Rosario Espín MSc.
DIRECTORA DE TESIS

RESUMEN

Para la producción de biogás se utilizó lodos residuales obtenidos de la empresa Floralp en la ciudad de Ibarra, que se adaptaron con melaza de caña de azúcar y suero de leche. Se caracterizó las materias primas (suero, melaza y lodos residuales), para determinar en términos de composición físico química, seguidamente se estableció el diseño estadístico mediante el programa *Design-Expert* con relación de 0,5 DQO total / g SV para determinar los volúmenes de las diferentes concentraciones de suero/melaza (S:M 0:100, S:M 25:75, S:M 50:50, S:M 75:25, S:M 100:0), la fermentación anaeróbica se realizó con un total de 13 tratamientos a una temperatura constante de 37 °C y un pH inicial de 7,5.

Es así que la presente investigación tuvo como objetivo determinar los volúmenes de producción de biogás, evaluando el volumen de metano producido mediante el método de desplazamiento de fluidos que está compuesta por una trampa de CO_2 .

Finalmente se obtuvo el mejor resultado que fue la concentración de 50% suero y 50% melaza de caña de azúcar con una productividad de 0,77 ml/h, demostrando que la mezcla de suero de leche y melaza de caña de azúcar son un buen sustrato para la producción de biogás.

Palabras Clave:

Biogás, fermentación anaeróbica, DQO Demanda Química de Oxígeno, *Desing-Expert*.

ABSTRACT

For biogas production, residual sludge obtained from the Floralp company in Ibarra city was used. It was adapted with sugar cane molasses and milk whey. The raw materials (milk whey, molasses and residual sludge) were characterized to determine their physical and chemical composition, and then the statistical design was established using the *Design-Expert* program with a ratio of 0.5 total COD / g SV to determine the volumes of the different concentrations of milk whey/molasses (W: M 0:100, W:M 25:75, W:M 50:50, W:M 75:25, W:M 100:0), anaerobic fermentation was carried out with a total of 13 treatments at a constant temperature of 37 °C and an initial pH of 7.5.

Thus, the present research aimed to determine the volumes of biogas production, evaluating the volume of methane produced using the fluid displacement method which is composed of a CO₂ trap.

Finally, the best result was obtained that had concentration of 50% whey and 50% sugarcane molasses with a productivity of 0.77 ml/h, demonstrating that the mixture of whey and sugarcane molasses are a good substrate for biogas production.

Key words:

Biogas, anaerobic fermentation, COD Chemical Oxygen Demand, *Desing-Expert*.

Índice

| | |
|---|---------------|
| Capítulo I | - 16 - |
| Introducción | - 16 - |
| 1.1 Problema | - 17 - |
| 1.2 Justificación | - 18 - |
| 1.3 Objetivos | - 19 - |
| 1.3.1 Objetivo General | - 19 - |
| 1.3.2 Objetivos Específicos..... | - 19 - |
| 1.4 Hipótesis | - 19 - |
| 1.4.1 Hipótesis Nula (Ho)..... | - 19 - |
| 1.4.2 Hipótesis Alternativa (Ha) | - 19 - |
| Capítulo II | - 20 - |
| Marco Teórico | - 20 - |
| 2.2 Factores determinantes en el proceso metanogénico | - 20 - |
| 2.2.1 Materia prima..... | - 20 - |
| 2.2.2 Temperatura | - 22 - |
| 2.2.3 Rango de pH | - 23 - |
| 2.2.4 Agitación..... | - 23 - |
| 2.2.5 Sólidos volátiles..... | - 24 - |
| 2.2.6 Sólidos Totales..... | - 24 - |
| 2.3 Actividad metanogénica específica (AME) | - 24 - |
| 2.4 Biogás | - 26 - |
| 2.4.1 Aplicaciones del biogás | - 26 - |

| | |
|---|---------------|
| 2.5 Tipos de digestores | - 27 - |
| 2.5.1 Chino..... | - 27 - |
| 2.5.2 Horizontales | - 27 - |
| 2.5.3 Batch (por Lote)..... | - 27 - |
| 2.5.4 De balón plástico..... | - 28 - |
| 2.5.5 De tapón de flujo..... | - 28 - |
| 2.6 Sistema de medición volumétrico | - 28 - |
| Capítulo III | - 30 - |
| Materiales y Métodos | - 30 - |
| 3.1 Caracterización del área de estudio..... | - 30 - |
| 3.1.1 Ubicación del experimento | - 30 - |
| 3.2 Materiales y equipos | - 31 - |
| 3.2.1 Materia prima e insumos..... | - 31 - |
| 3.2.2 Reactivos de laboratorio | - 31 - |
| 3.2.3 Equipos de laboratorio | - 31 - |
| 3.2.4 Materiales..... | - 31 - |
| 3.3 Metodología | - 32 - |
| 3.3.1 Caracterización fisicoquímica de las materias primas | - 32 - |
| 3.3.2 Evaluación de los efectos de la fermentación entre las concentraciones de suero de leche y melaza de caña de azúcar en la producción de biogás en un biodigestor anaeróbico | - 34 - |
| 3.3.3 Determinación de los volúmenes de producción de biogás de acuerdo con las condiciones de carga de suero de leche y melaza de caña de azúcar. . | - 36 - |

| | |
|--|---------------|
| Capítulo IV | - 44 - |
| Resultados y Discusión | - 44 - |
| 4.1 Caracterización mediante análisis físico químico el suero de leche, melaza de caña de azúcar y lodos residuales. | - 44 - |
| 4.2 Evaluación de los efectos de la fermentación entre las concentraciones de suero de leche y melaza de caña de azúcar en la producción de biogás en un biodigestor anaeróbico..... | - 45 - |
| 4.3 Determinación de los volúmenes de producción de biogás de acuerdo con las condiciones de carga de suero de leche y melaza de caña de azúcar. | - 52 - |
| Capítulo V | - 53 - |
| Conclusiones y Recomendaciones | - 53 - |
| 5.1 Conclusiones | - 53 - |
| 5.2 Recomendaciones | - 54 - |
| Bibliografía | - 55 - |

Índice de Tablas

| | |
|---|--------|
| <i>Tabla 1 Producción y composición teórica de biogás en diversos compuestos orgánicos.</i> | - 2 |
| 0 - | |
| <i>Tabla 2 Componentes fisicoquímicos del suero de leche.</i> | - 21 - |
| <i>Tabla 3 Propiedades fisicoquímicas de la melaza.</i> | - 21 - |
| <i>Tabla 4 Propiedades fisicoquímicas de lodos residuales.</i> | - 22 - |
| <i>Tabla 5 Composición del biogás.</i> | - 26 - |
| <i>Tabla 6 Datos climatográficos de Ibarra.</i> | - 30 - |
| <i>Tabla 7 Métodos para la caracterización de la materia prima.</i> | - 32 - |
| <i>Tabla 8 Diseño de mezcla DesingExpert.</i> | - 34 - |
| <i>Tabla 9 Niveles del factor en estudio.</i> | - 35 - |
| <i>Tabla 10 Resultados del análisis físico químico de la materia prima.</i> | - 44 - |
| <i>Tabla 11 Resultados de las unidades experimentales.</i> | - 46 - |
| <i>Tabla 12 Productividad.</i> | - 52 - |

Índice de Figuras

| | |
|---|--------|
| <i>Figura 1 Esquema general para la medición del volumen de biogás.</i> | - 29 - |
| <i>Figura 2 Diagrama de construcción del sistema volumétrico.</i> | - 36 - |
| <i>Figura 3 Sistema volumétrico.</i> | - 37 - |
| <i>Figura 4 Trampa de CO₂.</i> | - 38 - |
| <i>Figura 5 Conexiones de las mangueras.</i> | - 38 - |
| <i>Figura 6 Diagrama de flujo.</i> | - 39 - |
| <i>Figura 7 Adaptación del inóculo.</i> | - 40 - |
| <i>Figura 8 Mezcla de componentes.</i> | - 40 - |
| <i>Figura 9 Medición de pH.</i> | - 41 - |
| <i>Figura 10 Conexión de las mangueras.</i> | - 42 - |
| <i>Figura 11 Digestión anaeróbica.</i> | - 42 - |
| <i>Figura 12 Volumen de metano producido.</i> | - 43 - |
| <i>Figura 13 Gráfico de volumen de metano producido en nivel 1.</i> | - 47 - |
| <i>Figura 14 Gráfico de volumen de metano producido en nivel 2.</i> | - 48 - |
| <i>Figura 15 Gráfico de volumen de metano producido en nivel 3.</i> | - 49 - |
| <i>Figura 16 Gráfico de volumen de metano producido en nivel 4.</i> | - 50 - |
| <i>Figura 17 Gráfico de volumen de metano producido en nivel 5.</i> | - 51 - |

DEDICATORIA

A Dios por su gran bondad, sabiduría, salud brindada a lo largo de todo este proceso formativo, a mi hija quién fue el motor principal para la culminación de mi proyecto.

A mi familia que confió en mí y quienes fueron mi principal apoyo para cumplir mis sueños y la construcción de mi vida profesional por el apoyo incondicional y perseverancia para conseguir mis objetivos.

A mi amigo y compañero de vida, Alex Izama por su paciencia y amor durante mi trayectoria universitaria, por su apoyo incondicional en cada desafío y por su colaboración en el desarrollo de mi trabajo de grado.

Huaita Arotingo

AGRADECIMIENTO

A mi tutora, la Ing. Rosario Espín por su apoyo incondicional durante el desarrollo de esta investigación.

A mis asesores, el Ing José Pais y el Ing Jimmy Núñez por su colaboración constante.

A mis compañeras Michelle, Tamara y Elsa que han sido parte de la formación de mi vida profesional, ya que sin esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos, alegrías y sueños.

Y a todas las personas que me apoyaron para que mi sueño se haga realidad.

Huaita Arotingo

Capítulo I

Introducción

La población del país, como en el resto del mundo continúa creciendo año tras año, lo que implica una mayor producción de alimentos para poder abastecerlo. La producción de queso genera suero de leche como residuo que contiene material rico en proteínas de alto valor alimenticio (Sandoval et., 2021). Aproximadamente el 50% de suero producido en el mundo no recibe tratamiento para su recuperación, principalmente porque los pequeños y medianos productores no pueden adquirir alguna tecnología para aportar valor añadido a este residuo (Malcata, 2021).

El biogás es una fuente de energía renovable que resulta de la degradación de la materia orgánica, que ha ido ganando importancia como combustible, este puede ser aprovechado para el calentamiento y/o la producción de electricidad o puede emplearse como un aditivo para mejorar el combustible para vehículos. Es así que, la presente investigación tiene como objetivo la producción de biogás mediante la digestión anaeróbica del suero de leche suplementado con melaza de caña de azúcar, para lo cual se realizó un diseño de mezclas en el programa *Design-Expert* reflejando 13 unidades experimentales con 2 repeticiones.

Se estudió el efecto de evaluar 5 concentraciones diferentes de suero y melaza (S:M 0:100, S:M 25:75, S:M 50:50, S:M 75:25, S:M 100:0): Para la fermentación anaeróbica se utilizó un equipo de baño maría a una temperatura constante de 37 °C propuesta por varios autores. Se pudo confirmar que el mejor tratamiento fue suero/mezcla S:M 50:50 con una productividad de 0,77 ml/h, así como en la investigación de (Gordón, 2011) 50 % de suero y 50 % estiércol para un mejor rendimiento de metano.

1.1 Problema

La tendencia mundial es el notable crecimiento en la generación de residuos agroindustriales, derivados del incremento en la generación de productos comercializables. El problema a los que se enfrentan los residuos agroindustriales es que existe una baja conciencia ambiental para su manejo (Saval, 2012). Con la revolución industrial a mediados del siglo (XVIII), se inició el proceso de transformación económica, social y tecnológica, donde la producción agrícola y la industrial se multiplicó, y así, el tiempo de producción iría disminuyendo.

Toda la etapa de evolución industrial generó grandes impactos ambientales como; la explotación de combustibles fósiles y recursos minerales de la tierra, agotamiento de recursos minerales y biológicos, contaminación de la atmósfera y los suelos, calentamiento global y acumulación de residuos como consecuencia de descargas de residuos industriales (Ibarra, 2017). Las primeras máquinas utilizaban la energía del carbón y fueron evolucionando hasta ocupar otros combustibles como el petróleo y el gas.

Pais et al. (2017) ha afirmado lo siguiente:

El suero de leche es la mayor fuente de contaminación en la zona 1 del país debido a que en Imbabura y Carchi se procesan el 7.4 % la producción de leche a nivel nacional, esto es más de 407 m^3 diarios y un tercio de dicha producción está dirigida a la producción de quesos que da como resultado un promedio de 122 litros de suero de leche diarios.

El suero de leche es utilizado para la alimentación animal o en muchos casos enviado directamente al suelo lo que hace que exista una salinización de este debido al alto contenido de sal que tiene este residuo.

Los desechos resultantes de los procesos de producción de las empresas industriales y agroindustriales tienen un efecto dentro de la contaminación ambiental si no son tratados.

1.2 Justificación

El biogás es una fuente de energía renovable procedente de la descomposición de la materia orgánica por parte de las bacterias metanogénicas. Algunos estudios han demostrado que la elaboración de biogás puede tener un impacto significativo para reducir con el potencial del calentamiento global. Así mismo es de gran importancia tener un control sobre los desechos orgánicos para de esta manera prevenir problemas de salud y contaminación, como también es posible obtener, como subproducto, fertilizantes orgánicos que puede ser utilizado para el mejoramiento de los suelos agrícolas (Wasajja, 2020, pág. 68).

Diversas investigaciones se han realizado para obtener biogás a partir de suero de leche, utilizando una mezcla de estiércol de ave y suero de leche superior al 50 % en fracción, dando como resultado un aumento del 40 % en la producción del biogás (de 1,5 L a 2,2 L de biogás) debido al incremento de la biodegradabilidad de los carbohidratos del suero en comparación de los lípidos del estiércol menciona (Gelegenis et al., 2007).

En la actualidad, algunas empresas han tomado conciencia de los residuos que sus actividades productivas generan y se han realizado estudios para ser aprovechados los subproductos y desechos y de esa manera poder disminuir el impacto ambiental que las industrias ocasionan. En este sentido, la elaboración de biogás es una alternativa sustentable para disminuir los volúmenes de suero de leche generados por las empresas lácteas, y adicionalmente generar ciertos niveles de energía que contribuyen a la disminución de los costos de producción de las empresas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Optimizar la producción de biogás mediante la digestión anaeróbica de suero de leche, suplementado con melaza de caña de azúcar, a escala laboratorio.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar con análisis físico químico el suero de leche, melaza de caña de azúcar y lodos residuales.
- Evaluar los efectos de la fermentación entre las concentraciones de suero de leche y melaza de caña de azúcar en la producción de biogás en un biodigestor anaeróbico.
- Determinar los volúmenes de producción de biogás de acuerdo con las condiciones de carga de suero de leche y melaza de caña de azúcar.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis Nula (H₀)

La fermentación anaeróbica de la mezcla de suero de leche y melaza no maximiza el proceso de producción de biogás.

1.4.2 Hipótesis Alternativa (H_a)

La fermentación anaeróbica de la mezcla de suero de leche y melaza maximiza el proceso de producción de biogás.

Capítulo II

Marco Teórico

2.2 Factores determinantes en el proceso metanogénico

2.2.1 Materia prima

La digestión anaeróbica se puede llevar a cabo con uno o más residuos orgánicos que contengan material fermentable, que tengan una composición y concentración relativamente estable. En la Tabla 1 se pueden observar los gases que se producen por las diferentes materias orgánicas.

Tabla 1

Producción y composición teórica de biogás en diversos compuestos orgánicos.

| Compuesto Orgánico | Formula Química | Biogás | CH ₄ |
|-----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| | | $\frac{m^3}{kg SV}$ | $\frac{m^3}{kg ST}$ |
| Carbohidratos | $C_6H_{10}O_5$ | 0,75 | 0,37 |
| Lípidos | $C_{16}H_{32}O_2$ | 1,44 | 1,44 |
| Proteínas | $C_{16}H_{24}O_5N_4$ | 0,98 | 0,49 |

Fuente: (FAO, 2011)

Por lo tanto, dependiendo de la composición bioquímica de cada materia prima, se tendrá una diferente producción de biogás.

2.2.1.1 Suero de leche o lactosuero

El suero de leche es un desecho orgánico, proveniente de la industria láctea, que puede ser utilizado como fuente de energía (González, y otros, 2018). En la tabla 2 se describe las propiedades fisicoquímicas del suero de leche dulce y ácido.

Tabla 2*Componentes fisicoquímicos del suero de leche.*

| Parámetro | Lactosuero dulce (g/L) | Lactosuero Ácido (g/L) |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Sólidos | 63 – 70 | 63 – 70 |
| Lactosa | 46 – 52 | 44 – 46 |
| Proteína | 6 – 10 | 6 – 8 |
| Calcio | 0,4 – 0,6 | 1,2 – 1,6 |
| Fosfato | 1 – 3 | 2 – 4,5 |
| Cloruros | 1,1 | 1,1 |

Fuente: (Araujo, Monsalve, & Quintero, 2013)

2.2.1.2 Melaza de caña de azúcar

Es un producto líquido derivado de la caña de azúcar. Su aspecto es similar al de la miel, aunque de color parduzco muy oscuro, prácticamente negro. El sabor es dulce, ligeramente similar al del regaliz. Rico en hidratos de carbono, vitaminas del grupo B y abundantes minerales, entre los que destacan el hierro, cobre y magnesio, su contenido de agua es bajo (López, 2019). En la tabla 3 se muestra las características fisicoquímicas de la melaza.

Tabla 3*Propiedades fisicoquímicas de la melaza.*

| Componente | Composición % |
|-------------------|----------------------|
| Carbohidratos | 4,1 |
| Proteínas | 3 |
| Lípidos | 0,4 |
| Sacarosa | 60-63 |

| | |
|-------------------------|-----|
| Minerales | 3 |
| Compuestos nitrogenados | 4,5 |

Fuente: (Fajardo & Sarmiento, 2007)

2.2.1.3 Lodos residuales de empresa láctea

La mayor parte del agua que se utiliza en las empresas lácteas acaba finalmente como efluente, ya que no existe aporte de agua al producto final. En general, entre el 80-95% del agua total consumida forma parte del efluente final, salvo mínimas excepciones de fabricación como leche en polvo, etc (Oscar Arango., 2009).

Los lodos residuales de las empresas son aquellas que se desechan sin ningún tratamiento previo y es por esta razón que contienen un sin número de bacterias y microorganismos presentes en el sustrato. En la tabla 4 se presenta las características fisicoquímicas de los lodos residuales.

Tabla 4

Propiedades fisicoquímicas de lodos residuales.

| Componente | Composición [%] |
|-------------------|-----------------|
| Solidos volátiles | 10,96 |
| Solidos totales | 30,24 |
| Cenizas | 65,81 |
| Humedad | 69,76 |
| pH | 6,9 |

Fuente: (Marco Sarabia et al., 2017)

2.2.2 Temperatura

La temperatura es un factor sumamente importante en los procesos biológicos, por tal razón los procesos anaeróbicos son dependientes de la temperatura

“Las bacterias metanogénicas en el proceso anaeróbico se desarrollan en un ambiente mesofílico en un rango de temperatura de 20-42 °C siendo 37 °C la óptima para el proceso de dicha fermentación” (Parra et al., 2014).

La temperatura en una digestión anaeróbica descrita por (Marin, 2016) y que sugiere una temperatura mesófila entre 35-40 °C siendo óptima después de varios ensayos aquella de 37 °C.

En el proceso de digestión anaeróbica la etapa más importante es la metanogénica ya que es donde la materia orgánica es transformada en metano.

2.2.3 Rango de pH

El pH se encuentra en función de la concentración de CO_2 en el gas, de la concentración de ácidos volátiles y de la propia alcalinidad de la materia prima (Rojas et al., 2016). Los diferentes grupos bacterianos en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. En la etapa acidogénica el pH óptimo es entre 5.5 y 6.5 y entre 7.8 y 8.2 para metanogénicos (FAO, 2011). Las bacterias responsables del mecanismo de producción de biogás son altamente sensibles a cambios bruscos en el pH, éstas se encuentran oscilando entre 6 y 8, pero es deseable un valor de 7 y 7,5 (Rojas et al., 2016).

2.2.4 Agitación

La agitación es un promotor en la metanogénesis, ya que ayuda en la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, mezclando del sustrato fresco con la población bacteriana, evita la formación de costra que se forma dentro del digester, uniforma la densidad bacteriana y previene la formación de espumas (Rojas et al., 2016). Asimismo, (FAO, 2011) menciona, que con la agitación se debe considerar que el proceso anaeróbico involucra un equilibrio simbiótico entre varios tipos de bacterias, en donde, la ruptura de ese equilibrio en el

que el metabolito de un grupo específico sirve de alimento para el siguiente implica una posible disminución en la actividad biológica y por ende una reducción en la producción de biogás. La fermentación anaeróbica debe ser controlada mediante la agitación tres veces al día durante 1 min antes de cada medición de CH_4 .

2.2.5 Sólidos volátiles

Los análisis de sólidos volátiles de la materia prima para la producción de biogás son de alta importancia debido a que teóricamente el material orgánico es aquel que se convierte en metano (FAO, 2011).

2.2.6 Sólidos Totales

La fracción relevante para el estudio son los sólidos volátiles que representa la población microbiana, y la materia orgánica biodegradable en general. La disminución de este valor está relacionada con la fase de muerte o declive de los microorganismos y de la estabilidad del proceso (Carmona, 2007). En un proceso transcurrido de manera correcta, un 60 % de SSV debe ser reducido (Fabelo, 2007).

Los residuos que presentan un alto contenido en relación sólidos volátiles sobre sólidos totales SV/ST están en el rango 0,51 y 0,98 (Marin, 2016).

2.3 Actividad metanogénica específica (AME)

Una prueba de actividad metanogénica específica (AME) da conocer la capacidad de los microorganismos metanogénicos, que se encuentran en la biomasa para producir metano y CO_2 a partir de ácidos grasos volátiles (Rojas et al., 2016). La AME permite cuantificar la máxima capacidad de producción de metano por el grupo de microorganismos presente en lodos anaerobios, además de ser usada para el monitoreo de la calidad del lodo en reactores anaerobios, es una herramienta que evalúa el comportamiento de la biomasa contaminada y determina la carga

orgánica máxima que puede aplicarse a un sistema, con el fin de examinar la degradabilidad de los sustratos y la posibilidad de selección de inóculos (Rojas et al., 2016).

La AME se expresa generalmente en gramos de DQO por gramos de sólidos volátiles por día (g DQOCH₄/g SV.d) y se calcula (Rojas et al., 2016) de la siguiente manera:

$$AME = \frac{24}{SV * V_s * f_1} * \frac{d(VCH_4)}{dt}$$

Donde:

SV = Masa de los sólidos volátiles en la muestra por litro de agua en el reactor (g/l).

VR = Volumen líquido efectivo en el reactor (l).

f₁ = Factor de conversión para gramos de DQO removida por unidad de volumen de metano (ml CH₄/g DQO).

D (VCH₄) /dt = tasa máxima de producción de metano (ml CH₄/d).

La tasa máxima de producción de metano se obtiene a partir de la pendiente máxima de la curva de producción del gas durante el período de incubación de la muestra y que corresponda al consumo mínimo de 50 % del sustrato añadido. El factor de conversión hace referencia a la oxidación estequiométrica de metano que permite determinar la equivalencia de 0,35 L CH₄ por gramo de DQO removida. Asimismo, para cuantificar la producción de metano, existen métodos sofisticados con medición manométrica o cromatográfica o tan simples como el uso de mediciones volumétricas, en donde en la presente investigación, se desarrolló la actividad metanogénica mediante el método volumétrico, este se basa en la cuantificación del volumen de metano producido mediante el uso de una sustancia deslizante, como el NaOH en un rango de 15 -20 g/L, por su propiedad de reaccionar con el CO₂ presente en el biogás, permitiendo una medición más aproximada del volumen de metano producido. Se recomienda chequear que el pH del NaOH sea superior a 12 unidades para garantizar que éste secuestre el CO₂ producido (Rojas et al., 2016).

2.4 Biogás

El biogás es el producto gaseoso que se obtiene de la descomposición de la materia orgánica mediante la acción microbiana o de combustión en condiciones anaeróbicas. Está compuesto por metano CH_4 principalmente (50 % - 70 %), dióxido de carbono CO_2 (30 % - 50 %), ácido sulfúrico H_2S (0,1 % - 1 %), trazas de hidrogeno H_2 y nitrógeno N_2 (0,5 % – 3 %). Tiene una densidad de $0,94 \frac{kg}{m^3}$ y una temperatura inflamable de $700\text{ }^\circ\text{C}$ (Chiriboga, 2010). En la tabla 5 se establece las composiciones del biogás:

Tabla 5

Composición del biogás.

| | |
|-----------------------------|-------------------|
| Metano CH_4 | 40 - 70 % Volumen |
| Dióxido de carbono CO_2 | 30 - 60 % Volumen |
| Sulfuro de hidrógeno H_2S | 0 – 3 % Volumen |
| Hidrógeno H_2 | 0 – 1 % Volumen |

Fuente: (Magaña et al., 2006)

2.4.1 Aplicaciones del biogás

Existen diversas aplicaciones para el biogás, pero dentro de estas están la producción de calor o vapor, generación de electricidad y combustible de vehículos.

2.4.1.1 Producción de calor o vapor

Es el uso más simple del biogás para la obtención de energía térmica. El biogás puede ser utilizado para cocinar o calentar agua. Y los sistemas de pequeña escala también se pueden utilizar para iluminación. El requerimiento de gas para quemadores es bajo, debido a que se necesita una presión de 8 a 25 mbar y mantener niveles de H_2S inferiores a 100 ppm para conseguir un punto de rocío de $150\text{ }^\circ\text{C}$ (FAO, 2011).

2.4.1.2 Generación de electricidad o combinación de calor y electricidad

Las turbinas de gas (microturbinas, desde 25 hasta 100 kW y turbinas grandes, > 100 kW) se pueden utilizar para la producción de calor y energía, con una eficiencia comparable a los motores de encendido por chispa y con un bajo mantenimiento. Sin embargo, los motores de combustión interna son los usados más comúnmente en este tipo de aplicaciones. El uso de biogás en estos sistemas requiere la remoción de H_2S (bajo 100 ppm) y vapor de agua (Chiriboga, 2010).

2.4.1.3 Combustible para vehículos

Para este uso, el biogás debe tener una calidad similar a la del gas natural. También el biogás puede utilizarse para motores de combustión interna tanto a gasolina como a diésel (Fabelo, 2007).

2.5 Tipos de digestores

2.5.1 Chino

En este tipo de biodigestores la alimentación de la biomasa se efectúa en intervalos regulares; por razones prácticas, estos digestores son alimentados intermitentemente, esto se logra aprovechando la gravedad para la alimentación. Ejemplos de este tipo de digestores son el “Digestor Hindú” y el “Digestor Chino” (FAO, 2011).

2.5.2 Horizontales

Se construye en forma de canal horizontal con concreto reforzado en el que se depositan los residuos con alto contenido de sólidos. Cuenta con agitadores, que trabajan varias veces al día (Magaña et al., 2006).

2.5.3 Batch (por Lote)

Este tipo de digestor consiste en un depósito hermético (digestor) con una salida de gas conectada, con un gasómetro flotante en donde se almacena el biogás. La alimentación de la

materia prima es discontinuamente y la carga de los residuos estabilizantes se realiza una vez que se haya finalizado la producción de biogás (FAO, 2011).

2.5.4 De balón plástico

Está compuesto de una bolsa de plástico, caucho, polietileno o geomembrana de PVC, completamente sellada. La parte inferior de la bolsa (75 % de volumen) se rellena con la carga, mientras que la parte superior de la bolsa (25 %) se deja como espacio para captar el biogás que se produce, el que posteriormente es enviado a un almacén de gas fabricado también con alguno de los materiales mencionados (Magaña et al., 2006).

2.5.5 De tapón de flujo

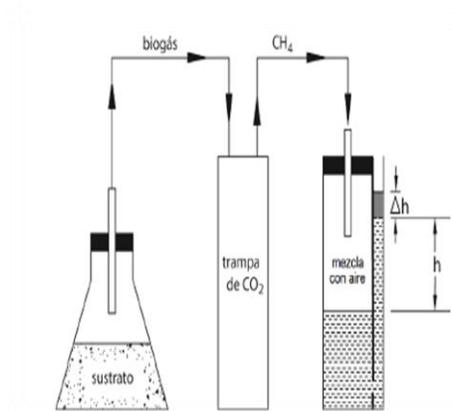
Consiste en una zanja construida con concreto o con una membrana impermeable. El digestor se cubre con una cubierta flexible anclada al suelo, al concreto o al acero galvanizado. Estos tanques especiales son rectangulares y tratan residuos que contengan de 11 % a 13 % total de sólidos. A nivel laboratorio o de planta piloto se han desarrollado biodigestores pequeños que permiten a investigadores analizar y evaluar con precisión el comportamiento de gran cantidad de variables involucradas en el proceso de biodigestión (FAO, 2011).

2.6 Sistema de medición volumétrico

Se emplea la técnica de columnas de desplazamiento como método indirecto en la medición de volumen, ya que los medidores comerciales están fuera de rango por el bajo caudal producido. Antes de proceder a la medición, el dióxido de carbono del biogás es separado mediante burbujeo en una solución acuosa de hidróxido de sodio tal como muestra en (Hilbert, 2019). El biogás pasa posteriormente a la columna para determinar su volumen por desplazamiento. La medición se lleva a cabo midiendo la altura h de la columna, que inicialmente es cero, pero aumenta poco a poco conforme el metano escapa de la trampa tal como se describe en la Figura 1.

Figura 1

Esquema general para la medición del volumen de biogás.



Capítulo III

Materiales y Métodos

3.1 Caracterización del área de estudio

3.1.1 Ubicación del experimento

La actual investigación se llevó a cabo en la provincia de Imbabura, cantón Ibarra, el desarrollo experimental se realizará en las instalaciones del laboratorio de Análisis físico químico y microbiológico de la carrera de Ingeniería Agroindustrial que corresponde a la Facultad de Ingeniería de Ciencias Agropecuarias y Ambientales (FICAYA), ubicadas en la calle Juan Montalvo entre Juan de Velazco y Cristóbal Colón. La tabla 6 indica las características del lugar de acuerdo con el departamento de meteorología de la ciudad de Ibarra.

Tabla 6

Datos climatográficos de Ibarra.

| Provincia | Imbabura |
|---------------|----------------|
| Cantón | Ibarra |
| Ciudad | Ibarra |
| Altitud | 2.225 msnm |
| HR. Promedio | 73% |
| Temperatura | 18°C – 24°C |
| Clima | Seco – nublado |
| Precipitación | 503 mm/año |

Fuente: (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal San Miguel de Ibarra, 2019)

3.2 Materiales y equipos

3.2.1 Materia prima e insumos

- Lactosuero
- Melaza
- Lodos activados

3.2.2 Reactivos de laboratorio

- Hidróxido de sodio (NaOH)
- Agua destilada
- Fenolftaleína (indicador de pH)

3.2.3 Equipos de laboratorio

- Medidor de pH (Potenciómetro)
- Equipo de baño María
- Sistema de medición volumétrico
- Balanza

3.2.4 Materiales

- Frascos Boeco 500 ml
- Frascos Boeco 250 ml
- Probetas
- Mangueras
- Vaso de precipitación

3.3 Metodología

3.3.1 Caracterización fisicoquímica de las materias primas

Antes de iniciar con el proceso de digestión anaeróbica, se realizaron pruebas previas para determinar las condiciones de fermentación que permitan obtener el mayor rendimiento durante el proceso de producción de biogás, por esta razón, mediante bibliografía y experimentación se evaluó sólidos volátiles, sólidos totales, demanda química de oxígeno (DQO), densidad y pH inicial.

Tabla 7

Métodos para la caracterización de la materia prima.

| Análisis | Normativa | Método |
|-------------------|------------------|-----------------------|
| Sólidos volátiles | NTE INEN 2 153 | APHA 2540 E |
| Sólidos totales | NTE INEN 014 | APHA 2540 B |
| DQO | NTE INEN 1203 | APHA 5520 D |
| Densidad | NTE- INEN- 1009 | - |
| pH | NTE- INEN 526 | Potenciómetro digital |

3.3.1.1 Sólidos volátiles

Los sólidos volátiles de cada sustrato se realizaron mediante la metodología APHA 2540 E que se encuentra descrita en la normativa NTE INEN 2 153 para determinación de la materia volátil.

3.3.1.2 Sólidos totales

Los sólidos totales de cada sustrato se realizaron mediante la metodología APHA 2540 B que se encuentra descrita en la normativa NTE INEN 014 para determinación de sólidos totales y

cenizas.

3.3.1.3 Demanda química de oxígeno (DQO)

El análisis de DQO se realizó con el método APHA 5520 D que se encuentra descrita en la normativa NTE INEN 1203 para análisis del agua demanda química de oxígeno (DQO).

3.3.1.4 Densidad

Para la determinación de la densidad se utilizó una balanza digital, una probeta de 100 ml. Para este análisis se procedió a encender la balanza, colocar la probeta sobre la balanza y enseguida se pulsó el botón “cero” o “tare” para eliminar el peso del recipiente, después se midió exactamente 50 ml de la muestra y se tomó la lectura correspondiente de la balanza. Para el cálculo de la densidad se utilizó la siguiente fórmula física:

$$\delta = \frac{m}{v}$$

Donde:

δ = Densidad (g/ml)

m = Masa (g)

v = Volumen ml

3.3.1.5 pH

Este parámetro se realizó con la utilización de un potenciómetro digital, que consistió en introducir el electrodo por pocos segundos en el sustrato a evaluar hasta que la lectura se estabilice. Se realizaron 3 repeticiones por sustrato para tener un dato más certero.

3.3.2 Evaluación de los efectos de la fermentación entre las concentraciones de suero de leche y melaza de caña de azúcar en la producción de biogás en un biodigestor anaeróbico

3.3.2.1 Diseño experimental

El experimento se llevó a cabo con un diseño de mezclas.

3.3.2.2 Características de la Unidad experimental

Cada unidad experimental tendrá un volumen fijo de 200 ml para cada tratamiento. En donde el contenido se explica en la tabla 8.

Tabla 8

Diseño de mezcla DesingExpert.

| Corrida | Suero (SL) | Melaza (MEL) | Vinóculo | V_SL | V_MEL | V_Agua |
|---------|------------|--------------|----------|--------|-------|--------|
| 1 | 0 | 1 | 50 | 0,00 | 11,87 | 138 |
| 2 | 0,5 | 0,5 | 50 | 74,33 | 5,94 | 70 |
| 3 | 0,5 | 0,5 | 50 | 74,33 | 5,94 | 70 |
| 4 | 1 | 0 | 50 | 148,65 | 0,00 | 1 |
| 5 | 1 | 0 | 50 | 148,65 | 0,00 | 1 |
| 6 | 0,25 | 0,75 | 50 | 37,16 | 8,90 | 104 |
| 7 | 1 | 0 | 50 | 148,65 | 0,00 | 1 |
| 8 | 1 | 0 | 50 | 148,65 | 0,00 | 1 |
| 9 | 0,25 | 0,75 | 50 | 37,16 | 8,90 | 104 |
| 10 | 0 | 1 | 50 | 0,00 | 11,87 | 138 |
| 11 | 0 | 1 | 50 | 0,00 | 11,87 | 138 |
| 12 | 0,75 | 0,25 | 50 | 111,49 | 2,97 | 36 |
| 13 | 0,75 | 0,25 | 50 | 111,49 | 2,97 | 36 |

La tabla 8 refleja el programa *Design-Expert* en el que se ingresó las concentraciones

mínimas y máximas de suero y melaza para la producción de metano, tomando en cuenta la relación 0,5 g DQO/ gSV y de esta manera el programa refleja las mejores mezclas para la producción de biogás. Por tal razón en la tabla 8. se puede visualizar 3 tratamientos S:M 0:100, 2 tratamientos S:M 25:75, 2 tratamientos S:M 50:50, 2 tratamientos S:M 75:25 y finalmente 4 tratamientos S:M 100:0. Cada tratamiento contiene la cantidad exacta de suero y melaza cumpliendo con las condiciones de carga 0,19 g de sólidos volátiles en toda la mezcla y 0,097 g de DQO.

Todas las unidades experimentales contienen 50 ml de inóculo que fue anteriormente adaptado con suero de leche y melaza de caña de azúcar para una óptima fermentación.

3.3.2.3 Factor en estudio

Se estudiará el efecto de aplicar cinco niveles de concentraciones de suero de leche y melaza de caña de azúcar que se muestra en la tabla 9.

Tabla 9

Niveles del factor en estudio.

| Factor A | Niveles |
|-----------------|----------------|
| S:M | 0:100 |
| S:M | 25:75 |
| S:M | 50:50 |
| S:M | 75:25 |
| S:M | 100:0 |

En la tabla se presenta el factor A que son las concentraciones de Suero: Melaza S:M expresadas en porcentajes de 0, 25, 50 y 100 %. En donde:

1. S:M suero 0 % y melaza 100%.
2. S:M suero 25 % y melaza 75%.
3. S:M suero 50 % y melaza 50 %.
4. S:M suero 75 % y melaza 25 %.
5. S:M suero 100 % y melaza 0%.

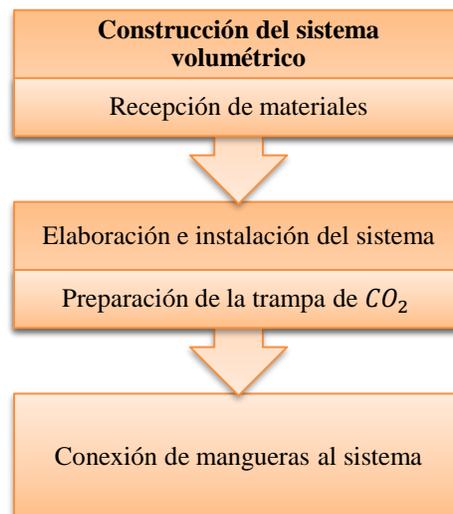
3.3.2.4 Variables de respuesta a evaluar

Para cuantificar el volumen de biogás generado en el proceso de digestión anaeróbica de acuerdo con las diferentes mezclas de suero de leche y melaza de caña de azúcar se utilizó el sistema de desplazamiento de fluidos.

3.3.3 Determinación de los volúmenes de producción de biogás de acuerdo con las condiciones de carga de suero de leche y melaza de caña de azúcar.

Figura 2

Diagrama de construcción del sistema volumétrico.



3.3.3.1 Elaboración e instalación del sistema

Para la construcción del sistema volumétrico se utilizó probetas invertidas sobre un recipiente de vidrio, un soporte de metal que hace la función de sujetar las probetas, mismas que

son rellenas con hidróxido de sodio al 15 % y fenolftaleína que según (Surichaqui, 2015) en estas condiciones se crear una trampa de CO_2 durante todo el recorrido del biogás.

Figura 3

Sistema volumétrico.



3.3.3.3 Preparación de la trampa de CO_2 (Purificación)

Para aumentar el poder calorífico del biogás y cumplir con requerimientos de aplicaciones es importante someter a este gas a un acondicionamiento. De esta manera, se procedió a realizar la trampa de CO_2 utilizando NaOH para su purificación, que contiene NaOH 15 g/L agua y fenolftaleína y se procede a verificar que el pH sea superior a 12 unidades para garantizar que éste secuestre el CO_2 producido (Fabelo, 2007).

Figura 4

Trampa de CO₂.



3.3.3.4 Conexión de mangueras al sistema

Las mangueras fueron conectadas con el biodigestor y la trampa de CO₂, una manguera va directamente del biodigestor a la trampa, mientras que la otra manguera va desde la trampa hacia las probetas invertidas y así atrapar CO₂ durante todo el recorrido.

Figura 5

Conexiones de las mangueras.

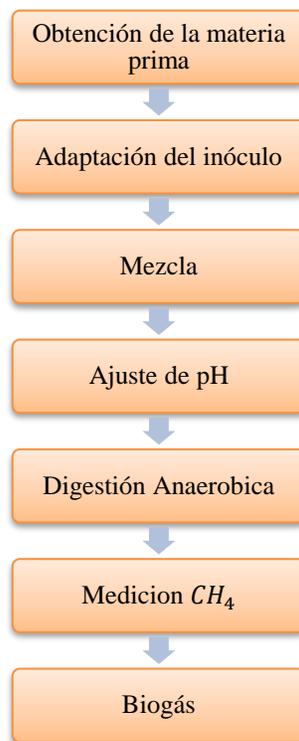


3.3.3.5 Manejo del experimento

Se estudia la producción de biogás mediante la digestión anaeróbica del suero de leche, suplementado con melaza, a escala laboratorio. Se controla el pH inicial y la temperatura constante de la digestión anaeróbica para optimizar el proceso de producción de biogás, realizando un sistema de medición volumétrica para la medición de metano generado.

Figura 6

Diagrama de flujo.



3.3.3.6 Adaptación del inóculo

Antes de iniciar con el proceso de digestión anaeróbica se procedió a adaptar el inóculo con el suero de leche y melaza de caña de azúcar, en este proceso se colocaron 50 ml de suero de leche y 50 ml de caña de azúcar para que los microorganismos presentes en el inóculo vayan asimilando la alimentación que se proporcionaría.

Figura 7

Adaptación del inóculo.



3.3.3.7 Preparación de la mezcla (suero de leche con melaza y agua)

Los digestores anaeróbicos a nivel de laboratorio se realizaron en frascos Boecos de vidrio con volúmenes de 200 ml. En los frascos se colocó las cinco diferentes concentraciones de suero de leche y melaza de caña de azúcar. Posteriormente se añadió 50 ml de inóculo (lodos residuales) y se agregó la muestra (concentración de suero y melaza). Finalmente se llenó el matraz hasta una solución de 200 ml con agua.

Figura 8

Mezcla de componentes.



3.3.3.8 Ajuste de pH

La actividad de las bacterias metanogénicas depende del pH y es por esta razón que es fundamental controlar este factor. El pH no debe ser inferior a 6 ni superior a 8 y es así que de acuerdo a bibliografía consultada se procedió a ajustar el pH inicial de todas las mezclas a 7,5.

Figura 9

Medición de pH.



Se procede a sellar los frascos herméticamente y a conectar las mangueras para facilitar el flujo de biogás (Fabelo, 2007).

3.3.3.9 Conexión de las mangueras

Las mangueras fueron conectadas con el biodigestor y la trampa de CO₂, una manguera va directamente del biodigestor a la trampa, mientras que la otra manguera va desde la trampa hacia las probetas invertidas para de esta manera atrapar CO₂ el durante todo el recorrido.

Figura 10

Conexión de las mangueras.



3.3.3.10 Digestión Anaeróbica

El sistema consistió en tener el biodigestor cerrado durante todo el proceso de fermentación anaeróbica que es un a fermentación en ausencia de oxígeno, el biodigestor estuvo conectado directamente con la trampa de CO_2 en donde se capturó este gas y se liberó solo gas metano CH_4 hacia las probetas invertidas, por la presión y el espacio que ocupa el gas, el agua cae de las probetas para dar espacio al biogás generado.

Figura 11

Digestión anaeróbica.

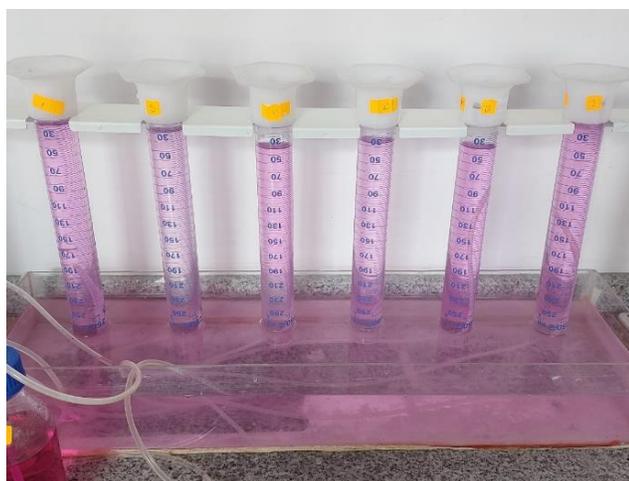


3.3.3.8 Medición de Metano CH_4

El metano CH_4 ingresa a la siguiente columna o trampa que contiene agua destilada y fenolftaleína. El biogás formado se mide mediante el método de desplazamiento de líquido, utilizado por algunos autores, las trampas se conectaron entre sí con mangueras para una mayor seguridad y para evitar presiones negativas (Rojas et al., 2016).

Figura 12

Volumen de metano producido.



Capítulo IV

Resultados y Discusión

4.1 Caracterización mediante análisis físico químico el suero de leche, melaza de caña de azúcar y lodos residuales.

Antes de iniciar con el proceso de digestión anaeróbica se realizaron pruebas previas para determinar las condiciones de fermentación que permitan obtener el mayor rendimiento durante el proceso de producción de biogás, por esta razón, mediante bibliografía y experimentación se evaluó sólidos volátiles, sólidos totales, demanda química de oxígeno (DQO), densidad y pH inicial.

Tabla 10

Resultados del análisis físico químico de la materia prima.

| Parámetro | Unidad | Suero | Melaza | Lodos Floralp |
|-------------------|---------------|--------------|---------------|----------------------|
| Sólidos volátiles | g/L | 164,24 | 726,94 | 7,73 |
| Sólidos totales | g/L | 237,70 | 824,70 | 12,96 |
| DQO | g/L | 0,64 | 8,14 | 1,56 |
| Densidad | g/ml | 0,98 | 1,2 | 0,98 |
| pH | | 6,9 | 5,6 | 3,9 |

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis físico químico de la materia prima, se puede indicar que los mismos se encuentran similares a los que se presentan en el estudio denominado evaluación de la producción de biogás a partir del suero lácteo a escala laboratorio que pertenece al autor Ramírez et al. (2014) en el que menciona que los análisis de las materias primas tanto como en sólidos volátiles, sólidos totales, pH y DQO intervienen en el proceso de

digestión anaeróbica. Por tal razón los análisis de suero de leche de la microempresa artesanal en Cotacachi presentaron 164,24 g/L sólidos volátiles que de acuerdo a la investigación realizada por (Arranz et al. 2014) está dentro del rango 50 – 250 g/L que ocasionan estabilidad al proceso de digestión anaeróbica, ya que un valor debajo de este rango produciría desestabilización y de esta manera disminución en la producción de biogás. Los sólidos totales para el suero reflejan un valor de 237,70 g/L que implica la existencia de materia orgánica para la degradación en la fermentación anaeróbica. De acuerdo con (Arranz et al., 2014) la Demanda Química de Oxígeno de suero de leche esta en un rango de 0,6 – 0,8 g/L es así que el suero utilizado es apto para la fermentación anaeróbica ya que presentó 0,64 g/L de DQO.

Por otra parte, la melaza reflejó un valor alto de sólidos volátiles de 726,94 g/L que se encuentra similar a la investigación sobre la producción de biogás a partir de la biodegradación anaeróbica de la vinaza generada por las destilerías de alcohol y su aprovechamiento energético como combustible de calderas bajo gases invernadero por el autor (López, 2019) en donde menciona que teóricamente la materia orgánica debe ser convertida a metano.

Es importante mencionar que tanto el resultado de sólidos totales y demanda química de oxígeno son valores que se encuentran en los rangos establecidos para la fermentación anaeróbica.

4.2 Evaluación de los efectos de la fermentación entre las concentraciones de suero de leche y melaza de caña de azúcar en la producción de biogás en un biodigestor anaeróbico.

Para dar respuesta a este objetivo se utilizó el diseño de mezclas en el programa *DesingExpert*, se estableció el factor A como la variable en estudio que representa las concentraciones de suero y melaza, colocando como variables constantes la temperatura de 37 °C y pH de 7,5. La fermentación anaeróbica se realizó en el equipo de baño maría controlando la temperatura del equipo. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 11.

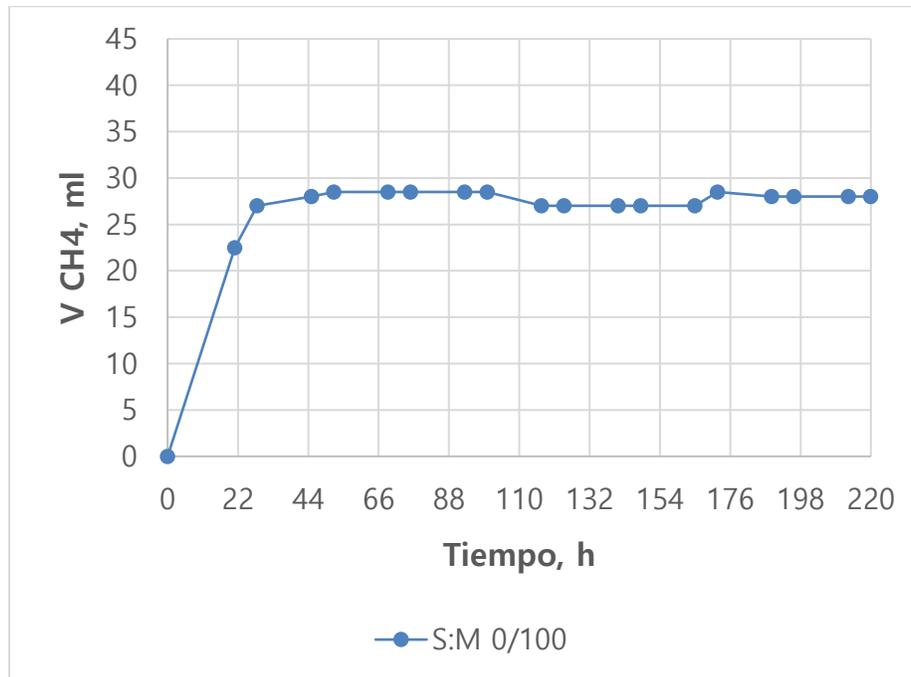
Tabla 11*Resultados de las unidades experimentales.*

| Corrida | Suero | Melaza | Vol. CH₄ (ml) |
|----------------|--------------|---------------|---------------------------------|
| 1 | 0 | 1 | 28 |
| 2 | 0,5 | 0,5 | 30 |
| 3 | 0,5 | 0,5 | 35 |
| 4 | 1 | 0 | 28 |
| 5 | 1 | 0 | 26 |
| 6 | 0,25 | 0,75 | 30 |
| 7 | 1 | 0 | 3 |
| 8 | 1 | 0 | 22 |
| 9 | 0,25 | 0,75 | 32 |
| 10 | 0 | 1 | 32 |
| 11 | 0 | 1 | 34 |
| 12 | 0,75 | 0,25 | 32 |
| 13 | 0,75 | 0,25 | 26 |

De los siguientes resultados se estableció los promedios de acuerdo a los niveles de concentración y de esta forma se logra escoger el mejor resultado de cada uno de las concentraciones que se detallan a continuación.

Figura 13

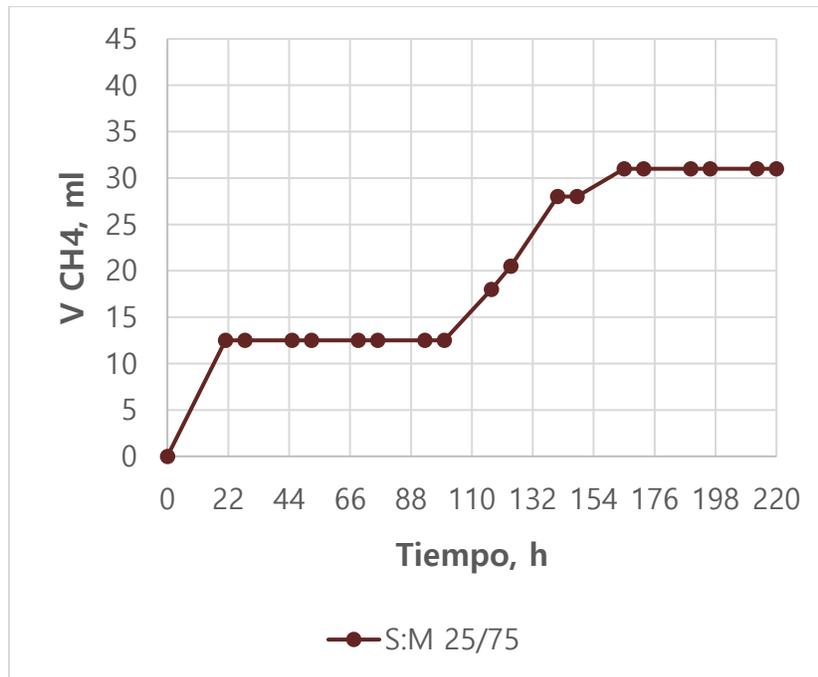
Gráfico de volumen de metano producido en nivel 1.



Según los resultados obtenidos en la fermentación anaeróbica de 0% suero de leche y 100% melaza de caña de azúcar, se puede indicar que los mismos se encuentran similares a los que presentan en el estudio denominado; la digestión anaeróbica aspectos teóricos de los autores (Lorenzo & Obaya, 2005) en el que menciona que los microorganismos degradan la materia orgánica suministrada, por lo tanto es importante que los lodos sean aclimatados para la degradación siendo así en la presente investigación se consiguió un incremento en la producción de biogás a las 22 horas, reflejando un efecto sinérgico ya que las bacterias metanogénicas presentes en la mezcla consumen los azúcares de la melaza que producen metano a partir del sustrato adaptado por el inóculo.

Figura 14

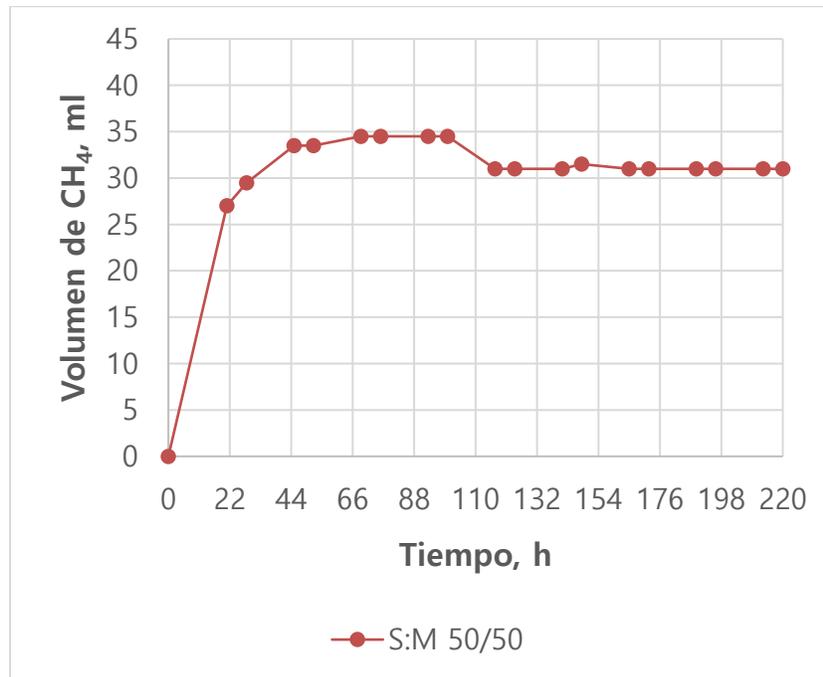
Gráfico de volumen de metano producido en nivel 2.



Con respecto a los resultados obtenidos en la fermentación anaeróbica de 25% suero de leche y 75% melaza de caña de azúcar, se puede demostrar que los mismos se encuentran similares a los que se presentan en el estudio denominado; cuantificador de metano para la estimulación del potencial energético de un sustrato celulósico escrito por los autores (Rojas et al., 2016) en el que menciona el efecto producido en el periodo de 22 a 100 horas representa una diauxia que ocurre debido a una caída importante en el nivel de pH causando la detención del proceso, eso quiere decir que en ese lapso de tiempo solo se ha consumido un tipo de sustrato porque después de ese lapso las bacterias metanogénicas continúan consumiendo la materia orgánica del segundo sustrato y de esta manera produciendo metano hasta conseguir un 30 ml de este gas.

Figura 15

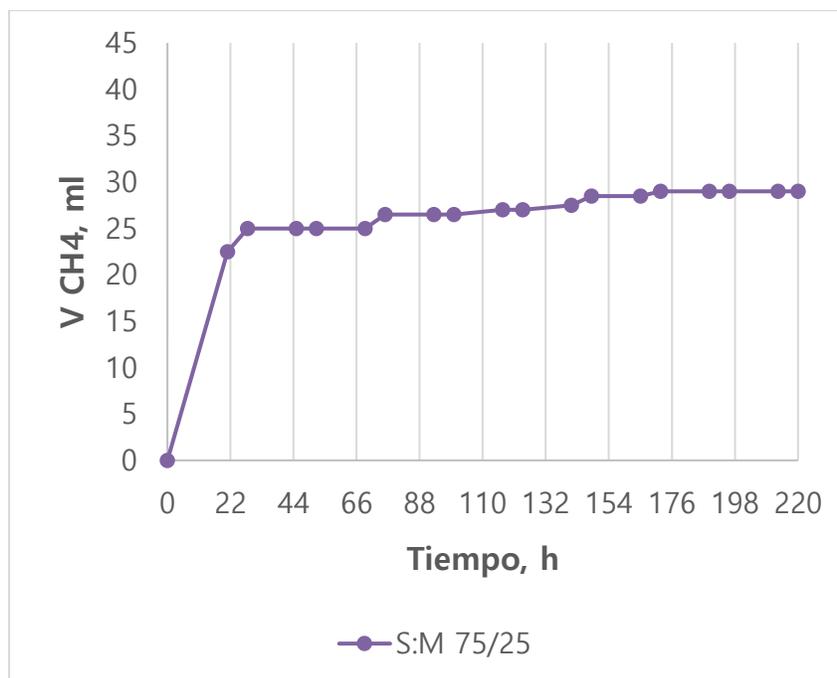
Gráfico de volumen de metano producido en nivel 3.



En cuanto a los resultados obtenidos en la fermentación anaeróbica de 50% de suero de leche y 50 % de melaza de caña de azúcar se puede demostrar que los mismos se encuentran similares a los que se presentan en el estudio denominado; evaluación de la co-digestion anaerobia de una mezcla terciaria compuesta por gallinaza de jaula, melaza de caña y lactosuero en un reactor de tanque agitado del autor (Archila, 2016) que menciona que la mezcla ternaria permitió realizar una mejor gestión de energía y rendimiento de biogás ya que estas mezclas tienen una mejor distribución de macro y micronutrientes contribuyendo con el proceso digestivo, de tal manera que en la presente investigación se refleja claramente un incremento en el proceso de producción de biogás, en este proceso ocurre una simbiosis obligatoria donde los microorganismos presentes en el inóculo interactuaron entre sí para consumir al mismo tiempo el suero de leche y melaza de caña de azúcar y producir una máxima producción de 35 ml de metano.

Figura 16

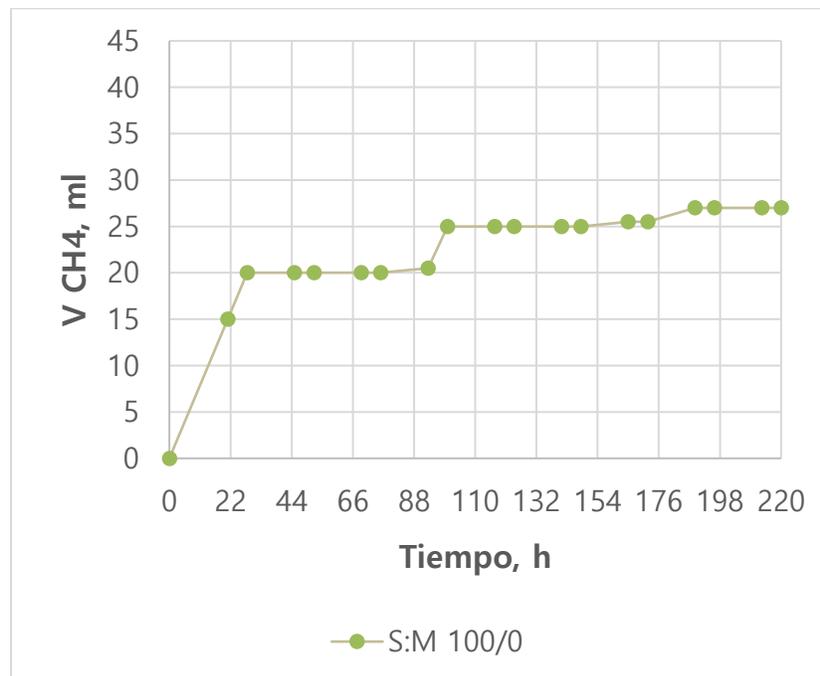
Gráfico de volumen de metano producido en nivel 4.



De acuerdo a los resultados obtenidos en la fermentación anaeróbica de 75% de suero de leche y 25% melaza de caña de azúcar, se puede demostrar que los mismos se encuentran similares a los que se presentan en el estudio denominado; evaluación de la co-digestión anaerobia de una mezcla terciaria compuesta por gallinaza de jaula, melaza de caña y lactosuero en un reactor de tanque agitado del autor (Archila, 2016) que menciona que en el proceso de digestión anaeróbica actúa un conjunto de residuos en un mismo biodigestor y que este proceso puede incrementar la producción de biogás dependiendo las condiciones de operación del proceso y características de los sustratos, en la presente investigación refleja un incremento en la producción de biogás durante todo el periodo, esto ocurre por la presencia de un sustrato en mayor cantidad que y debido a que las mezclas ternarias presentan un efecto sinérgico mayor en comparación a las mezclas binarias por tal motivo se visualiza una producción de 30 ml de metano.

Figura 17

Gráfico de volumen de metano producido en nivel 5.



Según los resultados obtenidos en la fermentación anaeróbica de 100% suero de leche y 0% melaza de caña de azúcar, se puede indicar que los mismos se encuentran similares a los que presentan en el estudio denominado; evaluación de la co-digestión anaerobia de una mezcla terciaria compuesta por gallinaza de jaula melaza de caña y lactosuero en un reactor de tanque agitado que pertenece al autor (Castro, 2016) en el que menciona que la inestabilidades durante el proceso biodegradativo es causado por los cambios bruscos de pH, por esta razón en la presente investigación se trabajó con un pH inicial de la mezcla de 7,5 pero aun así el proceso sufrió alteraciones en el proceso pues durante el lapso de 22 a 88 horas la producción de biogás es estática pero las bacterias asimilan el único sustrato presente y continúan consumiéndolo hasta llegar un volumen de 27 ml de metano.

4.3 Determinación de los volúmenes de producción de biogás de acuerdo con las condiciones de carga de suero de leche y melaza de caña de azúcar.

Se analizó la productividad de cada una de las concentraciones y los resultados reflejan que la mejor productividad es la de S:M 50:50 para la producción de metano.

Tabla 12

Productividad.

| | CH4 (ml) | T (h) | Productividad |
|------------------|-----------------|--------------|----------------------|
| S:M 0:100 | 25 | 92 | 0,27 |
| S:M 25:75 | 28 | 140 | 0,20 |
| S:M 50:50 | 34 | 44 | 0,77 |
| S:M 75:25 | 27 | 70 | 0,38 |
| S:M 100:0 | 25 | 96 | 0,26 |

Para el análisis de la productividad de metano se tomó en cuenta el mayor rendimiento de biogás de cada tratamiento y se verifico el tiempo en el que llega al máximo volumen. Observando de esa forma que el tratamiento S:M 50:50 suero 50% y melaza 50% expresan un mejor rendimiento con un valor de 0,77 ml/h.

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Finalizada la fase experimental se llegó a las siguientes conclusiones:

- Para establecer condiciones favorables de fermentación anaeróbica en la producción de biogás a partir de suero de leche, melaza de caña de azúcar y lodos residuales fue necesario parametrizar condiciones iniciales de pH, sólidos volátiles, sólidos totales, DQO y densidad.
- Bajo condiciones constantes de temperatura 37 °C y pH 7,5 se pudo determinar que influyen significativamente las concentraciones de las mezclas de suero y melaza, para la obtención de gas metano, siendo un aspecto favorable la agitación de los sustratos al menos una vez al día para evitar efectos antagónicos.
- El volumen de metano producido en los biorreactores es directamente proporcional a la alimentación suministrada al inicio del proceso, misma que es consumida por los microorganismos en el interior del biodigestor tipo *batch*.
- Se acepta la hipótesis alternativa puesto que la fermentación anaeróbica de la mezcla de suero de leche y melaza maximiza el proceso de producción de biogás tomando en cuenta que las mezclas ternarias contribuyen a un mayor rendimiento que claramente se refleja en el resultado del tratamiento S:M 50:50.

5.2 Recomendaciones

- Evaluar un tipo de residuo sólido para realizar comparaciones en el rendimiento de la producción de biogás a escala laboratorio.
- Utilizar biodigestores que controlen automáticamente el pH durante el proceso de digestión anaeróbica para de esta manera lograr un mayor rendimiento en la producción de biogás y así evitar efectos antagónicos.

Bibliografía

- Arango, O. (2009). *Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo uasb*. Obtenido de Scielo: <https://n9.cl/ujbso>.
- Araujo, Á., Monsalve, L., & Quintero, A. (2013). *Aprovechamiento del lactosuero como fuente de energía nutricional para minimizar el problema de contaminación ambiental*. Obtenido de DIALNET: <https://n9.cl/hob9d>.
- Arranz Ramírez, J., Zamora Calero, J., & Zelaya Lanuza, D. S. (2014). *Evaluación de la producción de biogás a partir de suero lácteo a escala de laboratorio*. Obtenido de RIBUNI: <https://n9.cl/txps0>.
- Bennardi, D. (2021). *Digestión anaeróbica: Obtención de biogás*. Obtenido de: <https://n9.cl/kn2ls>.
- Carmona, J. (2007). *El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo*. Obtenido de SCIELO: <https://n9.cl/perbu>.
- Castro, L. (2016). *Evaluación de la co-digestión anaerobia de una mezcla terciaria compuesta por gallinaza de jaula melaza de caña y lactosuero en un reactor de tanque agitado*. Obtenido de ResearchGate: <https://n9.cl/goz5q>.
- Chiriboga, O. (2010). *Desarrollo del Proceso de Producción de Biogás y Fertilizante Orgánico a partir de Mezclas de Desechos de Procesadoras de Frutas*. Obtenido de Repositorio Digital USFQ: <https://n9.cl/181ax>.
- Fabelo, J. (2005). *Diseño de una planta de producción de biogás*. Obtenido de DocPlayer: <https://n9.cl/0uz9k>.
- Fajardo, E., & Sarmiento, S. (2007). *Evaluación de melaza de caña como sustrato para la producción de Saccharomyces cerevisiae*. Obtenido de Repositorio Javeriana:

<https://n9.cl/87huv>.

FAO. (2011). *Manual de Biogás*. Obtenido de FAO: <https://n9.cl/f1h2u>.

GAD Municipal San Miguel de Ibarra (2019). *Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal San Miguel de Ibarra*. Obtenido de GAD Municipal San Miguel de Ibarra: <https://n9.cl/9zifj>.

Gelegenis et al. (2007). *Optimización de la producción de biogás mediante la codigestión de suero con estiércol de ave diluido*. Obtenido de ScienceDirect: <https://n9.cl/5so8i>.

González, O., Sandoval, F., Hernández, R., Hidalgo, J., Gómez, F., & Ávalos, D. (01 de Octubre de 2018). *Potencial de aprovechamiento del suero de queso en México*. Obtenido de Revista Agroproductividad: <https://n9.cl/skog4>.

Gordón, V. (2011). *Utilización de suero de leche para la elaboración de abono orgánico (biol)*. Obtenido de Repositorio Digital UPEC: <https://n9.cl/01r2h>.

Hilbert, J. (2019). *Manual Biogás*. Obtenido de INTA: <https://n9.cl/rmpy4>.

López, M. (2019). *Producción de biogás a partir de la biodegradación anaeróbica de la "vinaza" generada por las destilerías de alcohol y su aprovechamiento energético como combustible de calderas bajar los gases invernadero*. Obtenido de Repositorio Digital UPS.: <https://n9.cl/1f8rh>.

Magaña et al. (2006). *Producción de Biogás a Nivel Laboratorio Utilizando Estiércol de Cabras*. Obtenido de Redalyc: <https://n9.cl/s7twkt>.

Malcata, T. y. (2021). *Alternativas tecnológicas para uso del lactosuero: valorización económica de residuos*. Obtenido de Scielo: <https://n9.cl/bpx5d>.

Marin, J. (2016). *Efectos sinérgicos en la codigestión anaeróbica de gallinaza de jaula con residuos industriales*. Obtenido de ResearchGate: <https://n9.cl/37htp>.

- Martinez et al. (2016). *Aplicación de las metodologías EPA, mexicano e IPCC para la estimación de biogás, caso de estudio relleno sanitario Doña Juana, Bogotá - Colombia*. Obtenido de Scielo: <https://n9.cl/vhrx4>.
- Nicolae Scarlat et al. (2018). *Biogás: Desarrollos y perspectivas en Europa*. Obtenido de ELSEVIER: <https://n9.cl/0c16v>.
- Pais, J., Nuñez, J., Lara, M., Leonor, R., Trujillo, L., & Cuaran, M. (2017). *Valorización del suero de leche: Una visión desde la biotecnología*. Obtenido de Revista Bionatura: <https://n9.cl/5nm9tg>.
- Parra et al. (2014). *Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal*. Obtenido de Scielo: <https://n9.cl/lwqwmz>.
- Rodríguez, C. (2019). *Mediciones de metano y bióxido de carbono usando la técnica de covarianza de vórtices en ganado lechero semiestabulado en Sonora, México*. Obtenido de Scielo: <https://n9.cl/83rhn>.
- Rojas et al. (2016). *Cuantificador automático de metano para la estimación del potencial energético de un sustrato celulósico*. Obtenido de Repositorio TEC: <https://n9.cl/3jgdik>.
- Sandoval et al. (2021). *Producción de bioetanol a partir de suero de leche*. Obtenido de Aldeser: <https://n9.cl/1vf98>.
- Sarabia, M. et al. (2017). *Producción de biogás mediante co-digestión anaerobia de excretas de borrego y rumen adicionadas con lodos procedentes de una planta de aguas residuales*. Obtenido de Scielo: <https://n9.cl/x7f0p>.
- Surichaqui, F. (2015). *Producción de biogás en un prototipo de biodigestor a condiciones ambientales de Huancavelica*. Obtenido de Revista de Educación Quintaesencia: <https://n9.cl/a2zfo>.

Vera et al. (2018). *Determinar la calidad y producción de metano de abonos foliares ; elaborados en base a fermentaciones anaeróbicas de guano de diferentes rumiantes*. Obtenido de ResearchGate: <https://n9.cl/yzvrq>.

Wasajja. (2020). *Revisión técnico-económica de las tecnologías de limpieza de biogás para aplicaciones de celdas de combustible de óxido sólido fuera de la red a pequeña escala*. Obtenido de ScienceDirect: <https://n9.cl/n4q1a>.

Yambay et al. (2014). *Utilización de suero de leche en abono orgánico*. Obtenido de Repositorio UPEC: <https://n9.cl/g28m4>.