

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE UN BIODIGESTOR PARA EL APROVECHAMIENTO
ENERGÉTICO DEL LACTOSUERO PROVENIENTE DE LA EMPRESA LA PASTORA, UBICADA
EN BELÉN, BOYACÁ, COLOMBIA**

LUISA FERNANDA VARGAS BOADA

GINA SOFIA CASAS RODRÍGUEZ



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, TUNJA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
INGENIERIA AMBIENTAL**

2024

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE UN BIODIGESTOR PARA EL APROVECHAMIENTO
ENERGÉTICO DEL LACTOSUERO PROVENIENTE DE LA EMPRESA LA PASTORA, UBICADA
EN BELÉN, BOYACÁ**

LUISA FERNANDA VARGAS BOADA

GINA SOFIA CASAS RODRÍGUEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA AMBIENTAL

DIRECTOR

YUDDY ALEJANDRA CASTRO ORTEGÓN

CO- DIRECTOR

SANDRA CONSUELO DÍAZ BELLO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, TUNJA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

INGENIERIA AMBIENTAL

2024

TABLA DE CONTENIDO

1.	Resumen	8
2.	Abstract.....	9
3.	Introducción.....	10
4.	Objetivos.....	14
4.1.	Objetivo general.....	14
4.2.	Objetivos específicos	14
5.	Antecedentes.....	15
6.	Marco teórico.....	26
6.1.	Lácteos en Colombia	27
6.2.	Lactosuero y sus características	29
6.3.	Biodigestores	29
6.4.	Tipo de biodigestores.....	30
6.4.1.	Biodigestor de tipo UASB	31
6.4.2.	Biodigestor de tipo CSTR	33
6.4.3.	Biodigestor de tipo UAF	34
6.5.	Digestión anaerobia del lactosuero	35

6.6.	Parámetros a tener en cuenta en la digestión anaeróbica	37
6.7.	Evaluación ambiental.....	40
6.7.1.	Identificación de impactos	40
6.7.2.	Evaluación de impactos.....	41
6.7.3.	Combinación de metodologías	43
6.7.4.	Cálculo de importancia.	45
7.	Metodología.....	47
8.	Análisis y discusión de resultados	50
8.1.	Fase 1 Evaluar la cantidad, propiedades químicas, físicas y potencial energético del lactosuero en la empresa de lácteos La pastora en Belén Boyacá.	50
8.1.1.	Cantidad de Lactosuero Producido.....	50
8.1.2.	Propiedades químicas y físicas del lactosuero.....	53
8.1.3.	Evaluación del Consumo Energético	55
8.1.4.	Potencial energético del lactosuero	57
8.2.	Fase 2 Identificar el biodigestor adecuado por medio de un análisis comparativo de diferentes tipos de biodigestores mediante un análisis multicriterio.	59
8.3.	Fase 3 Realizar un estudio de prefactibilidad técnico-económico para evaluar la viabilidad financiera del proyecto.	61

8.3.1. Evaluación de impactos ambientales.....	62
8.3.2. Estudio de prefactibilidad	65
9. Impacto Social y Humanístico del Proyecto.....	81
10. Conclusiones.....	83
11. Recomendaciones	85
12. Referencias	86

INDICE DE TABLAS

TABLA 1.	Producción de leche.....	28
TABLA 2.	Parámetros de digestión anaeróbica.....	38
TABLA 3.	Categorías de clasificación del impacto.....	41
TABLA 4.	Criterios de evaluación de la metodología CONESA.....	42
TABLA 5.	Categorías de clasificación del impacto.....	42
TABLA 6.	Criterios de valoración.....	43
TABLA 7.	Categorías de clasificación del impacto.....	46
TABLA 8.	Proceso productivo de la empresa de lácteos La pastora.....	50
TABLA 9.	Producción de lactosuero.....	52
TABLA 10.	Resumen de producción.....	53
TABLA 11.	Propiedades químicas y físicas.....	54
TABLA 12.	Consumo energético de La Pastora.....	56
TABLA 13.	Evaluación energética.....	58
TABLA 14.	Análisis multicriterio de biodigestores.....	60
TABLA 15.	Matriz de evaluación de impactos.....	63
TABLA 16.	Destinación de Biogás.....	66

TABLA 17. Empresas lácteas del sector y producción diaria.....	67
TABLA 18. Matriz FODA.....	70
TABLA 19. Flujo de caja.....	75
TABLA 20. Datos formulados.....	79

1. Resumen

La industria láctea constituye una parte significativa de la economía de la región de Boyacá, destacándose por la producción de leche de alta calidad, así como de una amplia variedad de productos y subproductos derivados de los lácteos. Entre estos subproductos, el lactosuero es notablemente generado durante procesos como la fabricación de queso.

La tecnología de la digestión anaeróbica se presenta como una alternativa prometedora para el aprovechamiento de este subproducto, ofreciendo la posibilidad de producir energía renovable de manera simultánea. El objetivo de este estudio es llevar a cabo un análisis de prefactibilidad para la implementación de un biodigestor que permita aprovechar energéticamente el lactosuero generado por la empresa La Pastora, ubicada en Belén, Boyacá. Para alcanzar este objetivo, se procede a evaluar la cantidad de lactosuero disponible, así como sus propiedades fisicoquímicas y su potencial energético en la empresa La Pastora. Posteriormente, se lleva a cabo un análisis comparativo de diferentes tipos de biodigestores con el fin de identificar cuál de ellos es el más adecuado para las condiciones específicas de la empresa, de este análisis se concluyó que el biodigestor óptimo es el CSTR.

En este contexto, se recopilaron tanto datos cualitativos como cuantitativos provenientes de bases de datos relevantes. Esta recopilación permitió efectuar un diagnóstico detallado de los aspectos de interés. De esta manera, se logró cumplir con el estudio de prefactibilidad técnico-económico, el cual incluye la determinación de los impactos ambientales, un estudio de mercado y un análisis económico-financiero. Este último evalúa la viabilidad financiera del proyecto, asegurando que la implementación del biodigestor es una inversión sostenible y rentable para La Pastora.

***PALABRAS CLAVE:* LACTOSUERO, DIGESTIÓN ANAEROBIA, PREFACTIBILIDAD**

2. Abstract

The dairy industry constitutes a significant part of the economy of the Boyacá region, standing out for the production of high-quality milk, as well as a wide variety of products and by-products derived from dairy. Among these by-products, whey is notably generated during processes such as cheese making.

Anaerobic digestion technology is presented as a promising alternative for the use of this by-product, offering the possibility of producing renewable energy simultaneously. The objective of this study is to carry out a pre-feasibility analysis for the implementation of a biodigester that allows the energy use of the whey generated by the company La Pastora, located in Belén, Boyacá. To achieve this objective, the amount of whey available, as well as its physicochemical properties and its energy potential in the company La Pastora, is evaluated. Subsequently, a comparative analysis of different types of biodigesters is carried out in order to identify which of them is the most suitable for the specific conditions of the company, from this analysis it was concluded that the optimal biodigester is the CSTR.

In this context, both qualitative and quantitative data from relevant databases were collected. This compilation made it possible to make a detailed diagnosis of the aspects of interest. In this way, it was possible to comply with the technical-economic pre-feasibility study, which includes the determination of environmental impacts, a market study and an economic-financial analysis. The latter evaluates the financial viability of the project, ensuring that the implementation of the biodigester is a sustainable and profitable investment for La Pastora.

key words: whey, anaerobic digestion, prefeasibility

3. Introducción

La industria alimentaria es uno de los sectores más contaminantes a nivel mundial, con una contribución significativa de la industria láctea. La elaboración de productos lácteos y subproductos, como el lactosuero, en particular, se considera uno de los subproductos más perjudiciales para el medio ambiente. El vertimiento directo por parte de las empresas lácteas impacta negativamente sobre los recursos hídricos, alterando la composición fisicoquímica de los cuerpos de agua. Esto se debe a su contenido de lactosa, proteínas y minerales, lo que da como resultado un pH alrededor de 5,6 (Botero, N, 2020), además, genera una Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) que varía entre 30.000 a 60.000 mg/L y contiene gran cantidad de ácido láctico (Parra, R, 2010).

La energía es fundamental para el bienestar y el progreso de la sociedad; en su forma más básica, la energía es indispensable para actividades esenciales como la preparación de alimentos y la provisión de calor, lo cual mejora significativamente la calidad de vida. Más allá de estas necesidades primarias, el desarrollo tecnológico ha ampliado enormemente las aplicaciones de la energía, haciéndola un recurso vital para una multitud de procesos industriales, comerciales y domésticos (Cerón, 2022).

Ahora bien, la creciente demanda de energía en la sociedad moderna ha llevado a que su disponibilidad y gestión sean temas de gran importancia. En este contexto, la búsqueda de fuentes alternativas de energía se ha vuelto crucial; la ciencia y la tecnología contemporáneas están enfocadas en incrementar el uso de energías renovables no solo para la generación de electricidad, sino también para satisfacer otras necesidades energéticas de una manera sostenible y eficiente (De Souza et al., 2023). Este cambio hacia fuentes alternativas responde a la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, mitigar los impactos ambientales negativos y asegurar un suministro energético confiable para futuras generaciones.

En este sentido, Fernández, (2014); Rosales, (2014) estudiaron una alternativa relacionada con el suministro energético, en donde el recurso principal fue el lactosuero. Según los autores, el lactosuero, rico en

lactosa y materia orgánica, se destaca como un sustrato valioso para la generación de energía a través de procesos biológicos (p. 23). Una de las principales razones es su capacidad para ser transformado mediante diferentes fases de fermentación, en la fermentación, la lactosa presente en el lactosuero se convierte en etanol, un biocombustible útil en diversas aplicaciones energéticas.

Asimismo, el lactosuero puede someterse a digestión anaerobia, un proceso en el cual los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás, este biogás, compuesto principalmente de metano, puede ser utilizado como una fuente renovable de energía para generar electricidad y calor (Cerón, 2022). Otra alternativa es la fermentación oscura, donde ciertos microorganismos producen hidrógeno a partir de la materia orgánica del lactosuero en condiciones específicas; el hidrógeno es un combustible limpio con un alto potencial energético, lo que lo convierte en una opción atractiva para aplicaciones futuras.

Además, la combinación de digestión anaerobia y fermentación oscura puede optimizar la producción simultánea de hidrógeno y biogás, aprovechando al máximo el potencial energético del lactosuero. Estos procesos no solo proporcionan soluciones sostenibles para la gestión de residuos de la industria láctea, sino que también contribuyen significativamente a la diversificación y sostenibilidad del suministro energético.

De acuerdo con Muñoz y Vallejo, (2023) la producción de biogás a partir del suero lácteo es notablemente eficiente. Teóricamente, se puede estimar que se generan aproximadamente $0,35 \text{ m}^3$ de metano (CH_4) por cada kilogramo de demanda química de oxígeno (DQO) destruido dentro de un biodigestor. Con base en esta estimación, 1.000 litros de suero lácteo podrían producir alrededor de 36 m^3 de biogás, con un contenido de metano del 65%. Esta cantidad de biogás es equivalente a aproximadamente 22 litros de gasolina en términos energéticos.

Este proceso no solo representa una solución efectiva para la gestión de residuos de la industria láctea, sino que también proporciona una fuente significativa de energía renovable. La alta eficiencia de conversión

del suero lácteo en biogás subraya su potencial como recurso energético, contribuyendo a la sostenibilidad y a la diversificación de las fuentes de energía disponibles (Muñoz y Vallejo, 2023).

En un estudio de Rosales et al., (2006) reportaron que la producción de biogás a partir de suero lácteo utilizando digestores de flujo ascendente oscila entre 20 y 35 m³ por cada 1.000 litros de suero. Esta eficiencia convierte al suero lácteo en una valiosa fuente de energía renovable. La creciente demanda de energía y la necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles han llevado a muchos países a implementar políticas públicas que fomentan la búsqueda y desarrollo de nuevas tecnologías energéticas. Estas políticas suelen incluir incentivos tributarios para los sectores industriales, lo que puede resultar atractivo para la industria láctea.

Considerando el procesamiento de 200.000 litros de leche, que implica tratar 50.000 litros para la producción de quesos, se generan aproximadamente 43.500 litros de suero lácteo, dado que este subproducto representa cerca del 90% del volumen de la leche procesada. Teniendo en cuenta que la generación de energía es de 2 kWh/m³ de biogás con un contenido de metano del 70%, la cantidad de energía producida a partir de este suero puede ser significativa (Gómez y Sánchez, 2022).

Estos datos subrayan el potencial del suero lácteo no solo como un subproducto que requiere gestión, sino como una fuente de energía valiosa que puede contribuir a la sostenibilidad y eficiencia energética de la industria láctea. Los incentivos gubernamentales y las políticas favorables pueden impulsar a las empresas a adoptar estas tecnologías, promoviendo un uso más eficiente y responsable de los recursos disponibles.

En este contexto, Lácteos La Pastora, una empresa con más de tres décadas de experiencia en la producción de productos lácteos de alta calidad, se ha comprometido a mejorar su desempeño ambiental y productivo, integrando prácticas sostenibles y eficientes en su cadena de producción. La empresa, ubicada en Belén, Boyacá, se dedica a la producción de queso doble crema y ha identificado en el suero lácteo una oportunidad para avanzar hacia una producción más sostenible. En este documento se explora el estudio de

prefactibilidad de un biodigestor para el aprovechamiento energético del lactosuero proveniente de la empresa La Pastora.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Establecer una alternativa sostenible para el aprovechamiento energético del lactosuero proveniente de la empresa La Pastora, del municipio de Belén, Boyacá.

4.2. Objetivos específicos

- Diagnosticar la cantidad disponible, las propiedades químicas, físicas y el potencial energético del lactosuero en la empresa La pastora en Belén Boyacá.
- Determinar el diseño del biodigestor por medio de un análisis comparativo multicriterio ajustado a las condiciones propias de la empresa.
- Realizar un estudio de prefactibilidad técnico-económico a fin de evaluar la viabilidad financiera del proyecto.

5. Antecedentes

Para realizar una revisión bibliográfica centrada en estudios que han utilizado lactosuero exclusivamente en la producción de biogás, se llevaron a cabo diversas búsquedas en bases de datos como Scopus, SciELO, ScienceDirect y Google Académico. El objetivo fue explorar alternativas de aprovechamiento energético mediante biodigestores alimentados por lactosuero.

El aprovechamiento del lactosuero para la producción de biogás es una estrategia prometedora para la gestión sostenible de residuos y la generación de energía renovable. A lo largo de los años, diversos estudios han explorado esta alternativa con resultados alentadores, destacando la importancia del lactosuero como un recurso valioso en la industria energética.

Angulo Arias. R.F. (2019) presenta un estudio detallado sobre la implementación de una planta de biogás en la empresa APRODEMAG, enfocándose en el aprovechamiento del suero lácteo, un subproducto de la industria láctea. El proyecto se propone como una solución sostenible para la gestión de residuos y la generación de energía renovable. El suero lácteo, debido a su alto contenido orgánico, es una materia prima adecuada para la producción de biogás a través de la digestión anaerobia. El estudio abarca desde la caracterización del suero lácteo y su potencial energético, hasta el diseño técnico de la planta, incluyendo la selección de los equipos, dimensionamiento de los biodigestores, y el sistema de recolección y tratamiento del biogás. Además, el artículo aborda los aspectos económicos y ambientales del proyecto, demostrando que la implementación de esta planta reduce los costos asociados al manejo de residuos y la compra de energía, y contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La investigación incluye una evaluación de la viabilidad técnica y económica, así como un análisis del impacto ambiental positivo derivado del uso de esta tecnología. En conclusión, el artículo demuestra que la planta de biogás no solo es una alternativa viable y rentable para la empresa APRODEMAG, sino que también representa un avance importante hacia la sostenibilidad y la eficiencia energética en la industria láctea.

Arranz et al., (2014) aborda una investigación exhaustiva sobre el potencial de generación de biogás utilizando suero lácteo como materia prima, realizada en un entorno controlado de laboratorio. Este estudio se

centra en determinar la eficiencia y viabilidad del proceso de digestión anaerobia del suero lácteo, un subproducto de la industria láctea con alto contenido de materia orgánica. El artículo describe los experimentos realizados, que incluyen la preparación y caracterización del suero lácteo, el diseño de los reactores anaeróbicos a escala de laboratorio y la optimización de las condiciones operativas, como la temperatura, el pH, y la carga orgánica. Los resultados obtenidos muestran las tasas de producción de biogás, la composición del gas (con especial atención al contenido de metano), y la eficiencia de conversión de la materia orgánica en biogás. Además, se analizan los parámetros que influyen en la estabilidad y rendimiento del proceso, como la proporción de suero lácteo en la mezcla de alimentación y la retención del tiempo hidráulico. El artículo destaca también los desafíos técnicos encontrados durante los experimentos y las soluciones propuestas para superarlos. Los resultados de este estudio no solo confirman el potencial del suero lácteo como un sustrato viable para la producción de biogás, sino que también proporcionan información valiosa para el escalado del proceso a nivel piloto o industrial. En conclusión, esta investigación aporta datos cruciales para la implementación de tecnologías de biogás en la industria láctea, promoviendo una gestión más sostenible de los residuos y la producción de energía renovable.

Mendoza y García, (2021) presenta una investigación comparativa sobre la eficiencia en la producción de biogás utilizando dos tipos de sustratos: estiércol animal y suero lácteo, en biodigestores domésticos de la marca Home Biogás. El estudio tiene como objetivo principal evaluar y contrastar la cantidad y calidad del biogás generado por estos biodigestores cuando se alimentan con diferentes proporciones de estiércol y suero lácteo. La investigación se lleva a cabo en un entorno controlado y analiza diversos parámetros operativos como la carga orgánica, la retención del tiempo hidráulico, la temperatura, y el pH, para determinar las condiciones óptimas de funcionamiento. Se detallan los procedimientos experimentales, incluyendo la preparación de las mezclas de sustratos, la monitorización del proceso de digestión anaerobia, y la medición de la producción de biogás.

Los resultados muestran variaciones significativas en la productividad de biogás dependiendo del sustrato utilizado. El artículo destaca que el suero lácteo, debido a su alto contenido en nutrientes y materia orgánica, puede potencialmente incrementar la producción de biogás cuando se mezcla con estiércol,

optimizando así el rendimiento del biodigestor. Además, se discuten los beneficios y limitaciones de cada tipo de sustrato en términos de estabilidad del proceso y calidad del biogás producido, incluyendo el porcentaje de metano y otros componentes del biogás. La investigación concluye que los biodigestores Home Biogás son una tecnología viable y eficiente para la gestión de residuos orgánicos y la producción de energía renovable a pequeña escala, recomendando el uso combinado de estiércol y suero lácteo para maximizar la producción de biogás.

Yildiz, (2022) explora un estudio aplicado en la comunidad rural de Santa Rosa de Quives, enfocado en la generación de biogás mediante la co-digestión anaerobia de dos tipos de residuos orgánicos: el suero salado de queserías y el estiércol de cuy (un pequeño roedor andino similar al conejillo de indias). La investigación busca proporcionar una solución sostenible y económicamente viable para el manejo de residuos y la producción de energía en zonas rurales con acceso limitado a recursos energéticos convencionales. El estudio inicia con una detallada caracterización de los residuos utilizados, describiendo sus propiedades físicas y químicas, y su potencial energético. Luego, se diseñan y operan biodigestores a escala de laboratorio, ajustando parámetros clave como la relación de mezcla entre el suero salado y el estiércol, la temperatura, el pH, y el tiempo de retención hidráulico. A través de estos experimentos, se mide la producción y la composición del biogás generado, con especial atención al contenido de metano, que es el componente principal y más valioso del biogás.

Los resultados obtenidos demuestran que la combinación de suero salado y estiércol de cuy es altamente efectiva para la producción de biogás, mostrando una sinergia que mejora la eficiencia del proceso en comparación con el uso de cada sustrato por separado. El estudio revela que la adición de suero salado incrementa significativamente la producción de biogás y la estabilidad del proceso, debido a su alto contenido en nutrientes y materia orgánica. Asimismo, se destaca que el estiércol de cuy aporta una carga bacteriana que facilita la digestión anaerobia.

Barrena et al., (2017) se centra en un estudio detallado para maximizar la producción de biogás mediante la co-digestión anaerobia de tres tipos de residuos orgánicos: estiércol de bovino, lactosuero y totora.

La investigación se lleva a cabo en un entorno controlado de laboratorio y emplea un diseño experimental riguroso, utilizando el método de diseño estadístico de Box-Behnken para evaluar la interacción y los efectos de diferentes proporciones de estos sustratos en la generación de biogás. El estudio comienza con la caracterización individual de cada sustrato, destacando sus propiedades fisicoquímicas y su potencial para producir biogás. A continuación, se diseñan varios experimentos donde se mezclan los sustratos en distintas proporciones, ajustando variables críticas como la relación estiércol y el porcentaje de lactosuero. El análisis de estos experimentos se centra en identificar las combinaciones óptimas que maximicen la producción de biogás, así como en evaluar la estabilidad y eficiencia del proceso de digestión anaerobia.

Los resultados muestran que la proporción de estiércol de bovino y agua, junto con el porcentaje de lactosuero en la mezcla, son factores determinantes para lograr una producción óptima de biogás. Se observa que el lactosuero, debido a su alta concentración de nutrientes y materia orgánica, puede incrementar significativamente la producción de biogás cuando se combina adecuadamente con el estiércol de bovino. Por otro lado, el uso de totora (*Scirpus californicus*), una planta acuática común en humedales aporta fibra y estructura a la mezcla, mejorando la estabilidad del proceso anaerobio sin causar diferencias estadísticamente significativas en la producción de biogás cuando se compara con otras combinaciones.

Quispe et al., (2019) explora una solución sostenible para la gestión del lactosuero, un subproducto abundante y contaminante de la industria quesera, mediante su tratamiento en un reactor batch para la generación de biogás y biol. La investigación se lleva a cabo en una planta quesera, donde se instala un reactor batch diseñado específicamente para procesar lactosuero, con el objetivo de convertir este residuo en productos valiosos como biogás, una fuente de energía renovable, y biol, un biofertilizante líquido. El estudio comienza con una caracterización exhaustiva del lactosuero, detallando su composición química y su potencial energético. Posteriormente, se describe el diseño y operación del reactor batch, incluyendo parámetros críticos como la carga orgánica, la temperatura, el tiempo de retención y el control del pH. El proceso de digestión anaerobia en el reactor batch es monitoreado meticulosamente para evaluar la producción de biogás, midiendo su volumen y composición, con un enfoque particular en el contenido de metano, que es el componente más valioso del biogás.

Además del biogás, el artículo presta atención a la producción de biol, resaltando su valor como fertilizante orgánico rico en nutrientes, que puede ser utilizado para mejorar la calidad del suelo y reducir la dependencia de fertilizantes químicos. Los resultados del estudio muestran que el tratamiento del lactosuero en el reactor batch es altamente efectivo, no solo en la reducción de la carga contaminante del lactosuero, sino también en la generación de biogás y biol de calidad. La eficiencia del proceso se optimiza mediante ajustes en las condiciones operativas, demostrando que el reactor batch puede adaptarse a las fluctuaciones en la composición del lactosuero y mantener una producción constante de biogás y biol.

Fernández et al., (2016) investiga diversas metodologías biotecnológicas para el tratamiento del lactosuero, un subproducto de la industria láctea con alto contenido orgánico, enfocándose en la producción simultánea de biogás e hidrógeno como fuentes de energía renovable. La investigación aborda la problemática ambiental y económica asociada con la disposición del lactosuero, proponiendo soluciones basadas en la digestión anaerobia y la fermentación oscura. En primer lugar, se presenta una caracterización detallada del lactosuero, destacando su composición rica en nutrientes que lo hace un sustrato atractivo para procesos biológicos de conversión energética.

El estudio describe el diseño experimental de varios sistemas de tratamiento, incluyendo reactores anaerobios y biorreactores específicos para la producción de hidrógeno. Se analizan los parámetros operativos críticos, como la temperatura, el pH, la carga orgánica y el tiempo de retención, para optimizar la eficiencia de los procesos. La digestión anaerobia es evaluada por su capacidad para producir biogás, principalmente compuesto por metano, mientras que la fermentación oscura es investigada por su potencial para generar hidrógeno, un vector energético limpio y de alta demanda.

Los resultados del estudio revelan que, bajo condiciones controladas, es posible maximizar la producción de biogás e hidrógeno a partir del lactosuero. El artículo destaca la importancia de seleccionar cepas microbianas adecuadas y de ajustar las condiciones de fermentación para favorecer la producción de hidrógeno, mientras que la digestión anaerobia convencional se optimiza para producir metano de manera eficiente. Se

discuten los desafíos técnicos y económicos de implementar estos procesos a escala industrial, incluyendo la necesidad de tecnologías avanzadas de separación y purificación de gases.

Jesús et al., (2016) examina la viabilidad y eficiencia de utilizar el suero de queso, un subproducto de la industria láctea, como materia prima para la producción de bioetanol, un biocombustible renovable. La investigación se realiza en la región central del estado de Veracruz, donde la industria quesera genera mucho suero, que tradicionalmente se considera un residuo problemático por su alto contenido de materia orgánica y su potencial contaminante. El estudio busca no solo ofrecer una solución ambientalmente amigable para la gestión de este subproducto, sino también explorar su potencial como una fuente sostenible de energía.

El artículo describe en detalle el proceso de conversión del suero de queso en bioetanol, comenzando con una caracterización exhaustiva del suero, destacando sus componentes clave como lactosa, proteínas y minerales, que son esenciales para el proceso de fermentación. A continuación, se presenta un diseño experimental donde se optimizan varios parámetros del proceso de fermentación, tales como la concentración de suero, el tipo de levadura empleada, la temperatura y el pH, para maximizar la producción de bioetanol. El estudio también emplea técnicas de fermentación tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas, analizando el rendimiento y la eficiencia de cada método. Los resultados muestran que el suero de queso puede ser convertido de manera efectiva en bioetanol utilizando levaduras específicas que fermentan la lactosa, con rendimientos significativos que sugieren la viabilidad económica del proceso. Además de producir bioetanol, el artículo considera la generación de subproductos valiosos, como biomasa de levadura, que puede usarse como suplemento alimenticio o en otras aplicaciones industriales.

Osorio et al., (2022) explora en profundidad el potencial del suero de queso como una materia prima viable para la producción de biocombustibles renovables, abordando tanto los aspectos técnicos como los beneficios ambientales y económicos de este enfoque. El suero de queso, un subproducto de la industria láctea contiene una alta concentración de lactosa, proteínas y otros nutrientes, que lo hacen un sustrato atractivo para procesos biotecnológicos destinados a la producción de energía. El artículo comienza con una revisión exhaustiva de la composición química del suero de queso y su disponibilidad, subrayando los desafíos actuales

asociados con su manejo y disposición, que incluyen problemas de contaminación ambiental debido a su alta demanda biológica de oxígeno (DBO).

La investigación se centra en varios métodos biotecnológicos para convertir el suero de queso en diferentes tipos de biocombustibles, como bioetanol, biogás, y biodiésel. Se describen los procesos de fermentación y digestión anaerobia en detalle, destacando las condiciones óptimas para maximizar la eficiencia y el rendimiento de cada proceso. En el caso del bioetanol, se analiza el uso de cepas específicas de levaduras capaces de fermentar la lactosa presente en el suero. Para la producción de biogás, el estudio investiga la co-digestión del suero de queso con otros residuos orgánicos para mejorar la producción de metano. Además, se explora la posibilidad de utilizar lípidos extraídos del suero para la producción de biodiésel mediante procesos de transesterificación.

El artículo también discute los avances tecnológicos recientes y las innovaciones que pueden mejorar la viabilidad comercial de estos procesos. Esto incluye el desarrollo de biorreactores más eficientes, técnicas de pretratamiento del suero para aumentar su biodegradabilidad, y la ingeniería metabólica de microorganismos para mejorar las tasas de conversión. Se presentan estudios de caso y análisis de ciclo de vida que demuestran cómo la utilización del suero de queso para la producción de biocombustibles puede reducir significativamente la huella de carbono de la industria láctea, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental.

Boura et al., (2017) investiga un enfoque innovador para la producción de biocombustibles de nueva generación a partir de suero de leche, empleando una estrategia de acidogénesis sucesiva seguida de fermentación alcohólica. El estudio se centra en el uso de cultivos microbianos inmovilizados en soportes de γ -alúmina, una técnica que mejora la estabilidad y la eficiencia de los procesos fermentativos. El suero de leche, un subproducto abundante de la industria láctea es tratado inicialmente mediante acidogénesis, un proceso en el que microorganismos descomponen los componentes orgánicos del suero en ácidos grasos volátiles. Este paso prepara el sustrato para la fermentación alcohólica posterior, donde se produce etanol. El artículo describe detalladamente la metodología experimental, incluyendo la preparación y caracterización de los soportes de γ -alúmina y la inmovilización de las culturas microbianas. La investigación se lleva a cabo en condiciones

controladas para optimizar los parámetros operativos, como la temperatura, el pH y el tiempo de retención, asegurando así la máxima conversión del suero de leche en biocombustibles. Se analizan los rendimientos de ácido acético, ácido butírico y etanol, destacando la eficacia de la estrategia de acidogénesis sucesiva para mejorar la producción de etanol en la etapa de fermentación.

Los resultados del estudio demuestran que el uso de soportes de γ -alúmina no solo mejora la productividad de etanol, sino que también permite una operación más estable y continua del sistema de fermentación. Este enfoque reduce la inhibición causada por los productos intermedios y facilita una mayor conversión de los componentes del suero. Además, la investigación destaca la importancia de seleccionar y optimizar las cepas microbianas para lograr un rendimiento eficiente y sostenible.

Espinosa et al., (2014) explora el uso del permeado de suero de leche, un subproducto de la industria láctea, como medio de cultivo para el crecimiento heterotrófico y la acumulación de lípidos en la microalga *Chlorella protothecoides* con el fin de producir biocombustibles. El permeado de suero es una fracción líquida rica en lactosa y otros nutrientes residuales después de la ultrafiltración del suero de leche, lo que lo convierte en un sustrato potencialmente útil para la biotecnología. El estudio se enfoca en aprovechar estos nutrientes para cultivar *Chlorella protothecoides*, una microalga conocida por su capacidad de acumular altos niveles de lípidos bajo condiciones heterotróficas, es decir, en ausencia de luz, utilizando compuestos orgánicos como fuente de carbono.

El artículo detalla la metodología experimental, que incluye la preparación del permeado de suero como medio de cultivo, el ajuste de las condiciones de crecimiento (como la concentración de lactosa, el pH, la temperatura y la aireación), y el seguimiento del crecimiento celular y la acumulación de lípidos. Los investigadores emplean técnicas analíticas para medir la biomasa algal y el contenido lipídico, evaluando la eficiencia de conversión del sustrato en biomasa y lípidos. Los resultados muestran que *Chlorella protothecoides* crece eficazmente en el permeado de suero y acumula una cantidad significativa de lípidos, lo que subraya el potencial de este proceso para la producción de biocombustibles.

Además de los resultados experimentales, el estudio discute las implicaciones económicas y ambientales de utilizar permeado de suero para la producción de biocombustibles. Se argumenta que este enfoque no solo ofrece una forma de valorizar un subproducto industrial que de otro modo sería un problema de gestión de residuos, sino que también contribuye a la producción sostenible de energía.

Rincón y Castiblanco, (2021) analizaron el estado actual de Colombia en términos de investigación y desarrollo de biogás. Este estudio es crucial para entender las estrategias y decisiones en el área ambiental del país.

Sibirny, (2023) aborda la ingeniería metabólica de levaduras no convencionales con el objetivo de desarrollar productores avanzados de biocombustibles y químicos de alto valor. En este contexto, la ingeniería metabólica implica la modificación genética y fisiológica de organismos para optimizar la producción de compuestos deseados. Las levaduras no convencionales, que difieren de la tradicionalmente usada *Saccharomyces cerevisiae*, presentan características únicas y ventajas inherentes, como la capacidad de tolerar condiciones extremas y de utilizar una amplia variedad de sustratos. El artículo discute las técnicas y estrategias empleadas para mejorar las rutas metabólicas de estas levaduras, incluidas las herramientas de edición genética avanzada como CRISPR-Cas9 y la evolución dirigida. Además, se exploran casos de estudio específicos donde las levaduras modificadas han demostrado un aumento en la producción de bioetanol, biobutanol, y otros productos químicos valiosos. Asimismo, se destacan los desafíos y oportunidades en este campo, como la necesidad de un mayor conocimiento de la biología de estas levaduras y la integración de enfoques multidisciplinarios para superar las limitaciones actuales y maximizar su potencial industrial.

Vales et al., (2021) se centra en la valorización del lactosuero, un subproducto de la industria láctea, a través del proceso de hidrólisis para la producción de biocombustibles. El lactosuero, que es rico en lactosa y otros nutrientes, representa un desafío ambiental debido a su volumen y potencial contaminante si no se gestiona adecuadamente. El artículo explora cómo la hidrólisis, que implica la descomposición de la lactosa en sus componentes más simples usando enzimas o ácidos, puede optimizarse para convertir estos azúcares en precursores adecuados para producir biocombustibles como el bioetanol. Se describen las metodologías

empleadas para la hidrólisis del lactosuero, comparando diferentes enzimas y condiciones de reacción para determinar la eficiencia y la viabilidad del proceso. Los resultados demuestran que la hidrólisis enzimática puede ser altamente efectiva en la descomposición de la lactosa, generando un sustrato fermentable que microorganismos específicos pueden procesar posteriormente para producir bioetanol. Además, se discuten los aspectos económicos y ambientales de este enfoque, resaltando la reducción de residuos y la producción de energía renovable como beneficios clave.

Curilla y Diego, (2022) realizaron experimentos en un biodigestor batch para determinar el efecto del lactosuero en la producción de biogás, bioabono y biol, en la investigación se empleó el diseño experimental para cuatro tratamientos, mezclados en tres repeticiones con dosis diferentes dentro de un reactor tipo batch con 3 litros de agua y 3 kg de estiércol en una relación 1:1. Los resultados de la producción de biogás muestran que las dosis crecientes de lactosuero incrementaron la producción del biogás y que, el tratamiento 4, el cual tuvo una dosis de 200 ml de lactosuero, obtuvo la mayor cantidad de biogás; Las características del bioabono que tuvieron efecto del lactosuero fueron: nitrógeno, potasio y humedad, y las características que no tuvieron efecto del lactosuero fueron: pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, fósforo, calcio, magnesio y sodio; Las características del biol que tuvieron efecto del lactosuero fue el pH y las características que no tuvieron efecto del lactosuero fueron: conductividad eléctrica, materia orgánica, sólidos totales disueltos, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y sodio.

Finalmente, un estudio realizado por la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) en alianza con la Alcaldía de Sopó en Cundinamarca, Colombia, describe el proceso bioquímico e industrial de tratamiento del lactosuero. Este proyecto propone la implementación de un sistema de cogeneración de energía térmica y eléctrica basado en biogás, destacando su viabilidad y resiliencia como alternativa sostenible.

Estas investigaciones destacan la importancia del lactosuero como un recurso valioso para la producción de biogás, enfatizando la sostenibilidad ambiental y energética. Las estrategias innovadoras, como el uso de microorganismos y técnicas de fermentación, son cruciales para optimizar este proceso. Estas

contribuciones investigativas apoyan el objetivo de este estudio de explorar alternativas sostenibles y eficientes para el aprovechamiento energético del lactosuero.

6. Marco teórico

Belén es un municipio ubicado en el departamento de Boyacá, Colombia, conocido por su gran tradición agropecuaria, especialmente en la producción lechera. La economía de Belén gira en gran medida en torno a la industria láctea, siendo uno de los principales productores de leche en la región.

Este municipio cuenta con un clima frío, ideal para la ganadería bovina de doble propósito (producción de carne y leche). Las praderas y pastizales naturales del área, junto con la dedicación de sus campesinos, han permitido que la calidad de la leche producida en Belén sea reconocida a nivel regional. La leche de Belén es utilizada principalmente para la elaboración de productos lácteos como quesos, cuajadas y yogures, que son distribuidos tanto a nivel local como en otros departamentos del país.

Además, muchas familias en Belén dependen de la producción y comercialización de leche, lo que hace de la industria láctea una fuente vital de empleo y desarrollo económico. En la actualidad, existen pequeñas y medianas empresas locales dedicadas a la transformación de la leche, lo que ha impulsado el crecimiento de la economía del municipio.

Figura 1. Mapa del municipio de Belén.



Fuentes: Autores, 2024.

El presente diseño se desarrolló para la empresa Lácteos La Pastora, una compañía dedicada a la producción de productos lácteos, fundada hace 39 años en Belén, Boyacá. El objetivo principal de este proyecto es la implementación de una alternativa para el tratamiento de residuos como el lactosuero y la transformación o aprovechamiento de este como fuente de energía renovable.

Lácteos La Pastora inició operaciones en el año 1985 en Belén, Boyacá, con la visión de contribuir al desarrollo productivo de la región y generar empleo local. Desde su fundación, la empresa ha estado comprometida con la producción de productos lácteos de alta calidad, destacándose especialmente en la elaboración de queso doble crema. Con el paso de los años, la empresa ha crecido significativamente, estableciéndose como un referente en la industria láctea de la región.

Actualmente, Lácteos La Pastora procesa alrededor de 200.000 litros de leche mensualmente, de los cuales 50.000 litros se utilizan para la producción de quesos, generando aproximadamente 43.500 litros de lactosuero. En el estado actual, una parte del lactosuero se emplea para la alimentación de animales, mientras que el resto es desechado sin tratamiento adecuado, representando una oportunidad de mejora en la gestión de residuos y aprovechamiento energético.

6.1. Lácteos en Colombia

El mercado lácteo en Colombia es uno de los sectores más dinámicos y relevantes de la economía nacional, caracterizado por su diversidad y por un crecimiento sostenido en las últimas décadas; Colombia se posiciona como uno de los principales productores de leche en América Latina, con una producción anual que supera los 7.000 millones de litros. Las regiones de Cundinamarca, Antioquia, Boyacá y Nariño concentran la mayor parte de esta producción. El consumo per cápita de productos lácteos ha aumentado, impulsado por una mayor conciencia sobre la importancia de una dieta balanceada y nutritiva.

El mercado está compuesto por pequeños productores, cooperativas y grandes empresas multinacionales, destacándose Alpina, Colanta, Alquería y Parmalat. Estas empresas dominan el mercado

gracias a su capacidad de producción, distribución y comercialización. El portafolio de productos lácteos es amplio e incluye leche fresca, leche en polvo, quesos, yogures, mantequilla y otros derivados. Aunque la leche líquida sigue siendo el producto más consumido, la demanda de productos procesados como quesos y yogures ha mostrado un crecimiento significativo, impulsada por el interés de los consumidores en productos con valor agregado, como los lácteos funcionales y orgánicos.

A pesar de su crecimiento, el mercado lácteo enfrenta varios desafíos, como la volatilidad de los precios de la leche, las condiciones climáticas adversas y la competencia con productos importados. Además, la falta de infraestructura adecuada en algunas regiones y la informalidad en la producción y comercialización representan obstáculos para el desarrollo pleno del sector. Sin embargo, existen oportunidades significativas para el crecimiento, como la implementación de tecnologías avanzadas en la producción y procesamiento de leche, lo que puede mejorar la eficiencia y calidad de los productos. El aumento en la demanda de productos lácteos saludables y sostenibles también abre nuevas oportunidades de mercado. Las políticas gubernamentales de apoyo al sector agrícola y la promoción de prácticas sostenibles pueden contribuir al fortalecimiento del mercado lácteo en el país.

Estos datos muestran la situación actual del mercado en este sector, destacando una brecha competitiva en comparación con otros países. Desafíos como los tratados de libre comercio afectan los precios, y la industria no está equipada tecnológicamente para alcanzar una alta productividad y competir a nivel global. La industria lechera colombiana, debe enfocarse en tecnificarse y mejorar su productividad de manera efectiva.

TABLA 1. Producción de leche

Departamento	Volumen de Producción (millones de litros anuales)	Porcentaje de Participación en el Mercado
Antioquia	1.500	20%
Boyacá	1.200	16%
Cundinamarca	1.100	15%
Nariño	800	11%
Cauca	500	7%
Santander	400	5%
Cesar	300	4%
Valle del Cauca	250	3%
Tolima	200	2.5%

Sucre	150	2%
Córdoba	180	2.3%
Otros departamentos	1.500	16.2%
Departamento	Volumen de Producción (millones de litros anuales)	Porcentaje de Participación en el Mercado

Fuente: Autores, 2024

6.2. Lactosuero y sus características

El lactosuero es un líquido que se obtiene durante la coagulación de la leche en el proceso de elaboración del queso. Este líquido translúcido de color verdoso se genera a partir de la precipitación de la caseína y contiene una alta concentración de nutrientes, lactosa, vitaminas, minerales y grasa. La composición del lactosuero varía según la eliminación de la caseína y el tipo de leche utilizada, así como el método empleado en la elaboración del queso (Williams y Dueñas, 2021).

Existen dos tipos principales de lactosuero, determinados por la forma en que se separa la caseína. El lactosuero dulce se produce principalmente mediante la coagulación por renina, una enzima que rompe las proteínas de la leche y facilita la formación de la cuajada. Por otro lado, el lactosuero ácido resulta de la fermentación cuando se añaden ácidos o minerales que coagulan la caseína, como en la fabricación de quesos frescos. Según Arias y Moreano, (2023), independientemente del método de producción, se estima que por cada kilogramo de queso se obtienen aproximadamente 9 kg de lactosuero, lo que representa entre el 85% y el 90% del volumen total de la leche utilizada.

6.3. Biodigestores

Los biodigestores son dispositivos cerrados que generan biogás a partir de la gestión y tratamiento de residuos orgánicos mediante procesos biológicos controlados en ausencia de oxígeno (anaerobiosis). Estos sistemas permiten la descomposición de la materia orgánica por acción de microorganismos anaerobios, produciendo así energía limpia de una fuente renovable. En los últimos tiempos, la creciente necesidad e importancia energética ha impulsado el uso del biogás. Esta práctica no solo fomenta el uso de energías renovables, sino que también ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). (FAO, MINENERGIA, PNUD, & GEF,

2011, p.78). Los principales componentes de un digestor anaeróbico incluyen el reactor, que contiene la materia prima necesaria para el proceso de digestión; un recipiente para almacenar el gas generado, y los sistemas que gestionan la salida del biogás, la entrada o carga de la materia orgánica inicial, y la descarga de la materia orgánica estabilizada.

Un biodigestor es un dispositivo hermético en el que se introducen residuos o desechos orgánicos para ser transformados por microorganismos en biogás (Vanegas et al., 2023). La hermeticidad es esencial para garantizar la ausencia de aire, lo que optimiza el funcionamiento del sistema. Durante el proceso de fermentación, el biogás se genera y se acumula en la parte superior del reactor, en una zona conocida como domo o campana, que actúa como gasómetro (Morejón et al., 2022).

Existen diferentes tipos de biodigestores según su complejidad y el propósito para el que se utilicen. Los biodigestores simples se clasifican en grupos y suelen ser de tipo discontinuo; en contraste, los biodigestores más complejos están equipados con dispositivos que permiten agitar el contenido y mantener una temperatura adecuada para el proceso (Barrera, 2020).

6.4. Tipo de biodigestores

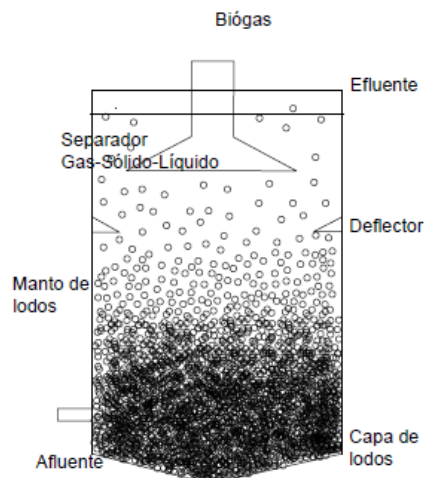
Como se ha mencionado anteriormente, existe una amplia variedad de biodigestores. Además, hay diferentes configuraciones estructurales que buscan optimizar la producción de biogás, dependiendo de las características específicas de la biomasa utilizada. Según investigaciones revisadas, es posible lograr un óptimo aprovechamiento de la biomasa mediante bioprocesos, siempre y cuando se mantengan condiciones adecuadas para el desarrollo de los microorganismos involucrados. El crecimiento de estos microorganismos está directamente relacionado con la producción de biocombustible.

A continuación, se presentan tres tecnologías utilizadas en la industria láctea para el aprovechamiento y generación de biogás.

6.4.1. Biodigestor de tipo UASB

El Digestor de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB), también denominado Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente (RAFA), opera de manera continua y está diseñado con una mayor altura que anchura, permitiendo así un flujo ascendente. El sustrato para tratar se inserta en el reactor desde la parte inferior, desplazándose hacia arriba a través del contenedor y saliendo por la parte superior después de recorrer todo su perfil longitudinal, sus dimensiones pueden recoger un volumen hasta de 200 m³ (Hernández F, 2015, p. 13, 14,15), *Figura 2*.

Figura 2. Biodigestor tipo UASB



Fuente: Autores, 2024.

En este reactor, las bacterias se agrupan en forma de gránulos, permitiendo a los microorganismos degradar la materia orgánica de manera eficiente (Hernández F, 2015, p. 13-15). El sustrato asciende por la columna, generando un flujo vertical con una velocidad regulada que debe mantenerse entre 1,0 y 1,5 m/hora. Si la velocidad es demasiado alta, toda la materia orgánica y los microorganismos podrían ser eliminados, mientras que una velocidad excesivamente baja causaría la precipitación de los sólidos en un lodo difícil de tratar. Por ello, es fundamental mantener un control adecuado de este parámetro (FAO, 2019).

Cuando se opera a una velocidad adecuada, los microorganismos empiezan a formar agrupaciones específicas en el reactor, como glomérulos y flóculos de entre 1 y 5 mm (Mosquera, A., 2021), denominados "manto de lodos," que mejoran la eficiencia de la degradación y flotan en la parte media del reactor (FAO, 2019). Las bacterias anaerobias generan burbujas de metano a través de la eliminación, las cuales ascienden y se acumulan en la parte superior del reactor, siendo capturadas por los desviadores y/o deflectores. Es crucial que el reactor cuente con un sistema de separación de fases gas-sólido en su parte superior. (Mosquera, A. 2021)

El líquido producido durante el proceso de degradación contiene sólidos residuales, generando subproductos. Esta tecnología permite una notable reducción del tiempo de retención hidráulico (TRH), reduciéndolo de días a horas, aunque generalmente se encuentra entre 10 y 30 días. Además, logra una eliminación promedio de la demanda química de oxígeno (DQO) de los sustratos del 70% al 95%, lo que facilita el tratamiento de volúmenes relativamente grandes. (FAO, 2019).

Según un estudio realizado por Mosquera, A. (2021), se monitoreó un reactor con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 20 días, en el cual se midió la producción de biogás, obteniéndose un 69,908% de metano y un 20,719% de dióxido de carbono. El Ministerio de Energía et al. (2013) estima que la producción de metano mediante esta tecnología oscila entre el 55% y el 70%.

Este tipo de reactores, al manejar eficientemente sustratos con elevadas cargas orgánicas y bajos contenidos de sólidos, se considera beneficioso para sectores industriales como el lácteo, entre otros.

Ventajas del Biodigestor tipo UASB según (M. Sergio. et, 2014)

- Se necesita una mayor eficiencia energética en el proceso de tratamiento.
- La generación de lodos es reducida, lo que facilita su
- La producción de metano es aprovechable
- El diseño de este reactor es simple y económico
- El consumo de energía es reducido, ya que el sistema prescinde de agitación mecánica.

- La retención de biomasa es excelente, por lo tanto, no se requiere reciclar el lodo.

Desventajas del Biodigestor tipo UASB según (FAO, 2019)

- Largo lapso para la creación de un buen manto de lodos
- Depende de una entrada de sustratos continua
- Después de estar en un periodo largo sin alimentarse es importante iniciar con el proceso para la formación de un buen manto de lodos.

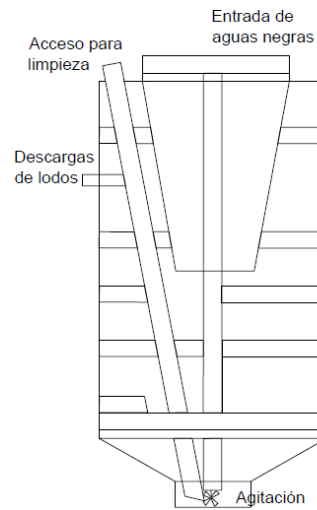
6.4.2. Biodigestor de tipo CSTR

El biodigestor de tanque agitado continuo, conocido como CSTR (Continuously Stirred Tank Reactor), utiliza un método de mezcla continua o completa. Este dispositivo tiene una configuración cilíndrica vertical equipada con agitadores o paletas que mezclan constantemente el efluente en su interior. Esta tecnología es especialmente adecuada para el tratamiento de efluentes con alto contenido de sólidos, pudiendo manejar volúmenes muy elevados de hasta 6000 m³ (Castillo et al., 2003).

El reactor CSTR es eficiente para tratar suero diluido y soluciones sintéticas del mismo. Sin embargo, debido al lento crecimiento de los microorganismos metanogénicos, este tipo de biodigestor presenta beneficios limitados en la transformación de residuos orgánicos, con tasas de conversión que pueden decrecer en rangos de 58-18%, lo que limita el tiempo de retención hidráulica (Amaral et al., 2019).

No obstante, investigaciones han demostrado que la modificación de parámetros como la temperatura y la operación en un sistema termofílico puede aumentar considerablemente la eficiencia de la transformación de la materia, estudios como el de Amaral et al., (2019); Castillo et al., (2003) indican que, bajo estas condiciones optimizadas, las conversiones pueden alcanzar valores entre 94.6% y 96.4%, mejorando significativamente el rendimiento del proceso.

Figura 3. Biodigestor de tipo CRSTR



Fuente: Autores, 2024.

6.4.3. Biodigestor de tipo UAF

El biodigestor de flujo ascendente con filtro anaerobio (UAF) es un reactor tubular diseñado para operar de manera continua. Los residuos orgánicos ingresan por la parte inferior del reactor y ascienden a través de una cama de materiales filtrantes; originalmente, se utilizaban piedras como material filtrante, pero debido a su bajo volumen de poros, que causaba obstrucciones, se han sustituido por plásticos sintéticos o cerámicas con configuraciones variadas.

Actualmente, el plástico utilizado en estos reactores posee un volumen poroso de alrededor del 95%, proporcionando una superficie óptima de hasta $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$ o más, lo que facilita el desarrollo de biopelículas y mejora la eficiencia del proceso anaeróbico.

Sin embargo, este tipo de reactor presenta desafíos relacionados con la acumulación de biomasa, que puede llevar a la formación de “zonas muertas” donde la eficiencia del proceso disminuye. Para mitigar este problema, se emplean filtros con múltiples entradas que permiten una mejor distribución de los residuos dentro del reactor, asegurando una mayor uniformidad en la alimentación y evitando la acumulación excesiva de biomasa en la parte inferior del sistema.

6.5. Digestión anaerobia del lactosuero

Actualmente, el uso de biodigestores en Colombia ha experimentado un desarrollo lento debido al escaso interés, apoyo y a la falta de políticas claras que reglamenten el uso de esta tecnología; a pesar de esto, se han llevado a cabo proyectos a gran escala en el país, especialmente en el sector del cultivo de palma (Amaral et al., 2019). El tratamiento de los efluentes líquidos generados por las máquinas extractoras de aceite de palma ha impulsado la implementación de métodos para gestionar los residuos producidos.

Según, Quille et al., (2021) la digestión anaeróbica es un proceso en el que el material orgánico se degrada y estabiliza en condiciones anaeróbicas, es decir, en ausencia de oxígeno. En este proceso, los microorganismos simbióticos descomponen una amplia variedad de sustratos y, mediante sus actividades metabólicas, convierten el material orgánico en productos finales específicos.

La digestión anaeróbica descompone la materia orgánica en ausencia de oxígeno, utilizando microorganismos que operan en distintos rangos de temperatura: termofílicas (altas), mesofílicas (moderadas) y psicrófilas (bajas, por debajo de 5°C). Este proceso presenta ventajas como la generación de lodos, el consumo eficiente de energía y la producción significativa de metano. Las cuatro etapas bioquímicas involucradas en la digestión anaeróbica como se observa en la *figura 2* del lactosuero son hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

- **Hidrólisis:** La etapa inicial de la digestión anaerobia consiste en la ruptura de los enlaces de moléculas complejas por medio de enzimas producidas por bacterias. Las grasas son transformadas en ácidos grasos y glicerina gracias a la enzima lipasa; las proteínas se descomponen en péptidos y aminoácidos a través de las enzimas proteasas; y los polisacáridos se convierten en monosacáridos (Bernal Patiño, L. E., & Suárez Ramírez, L. S., 2018). Al convertirse en moléculas más pequeñas, estas se vuelven más aptas para ser utilizadas como fuentes de energía y carbono por las células.

- **Acidogénesis.** Los ácidos grasos empiezan a disminuir su cantidad de carbonos mediante la acción de las bacterias acidogénicas e hidrolíticas, las cuales fermentan los compuestos generados en la fase

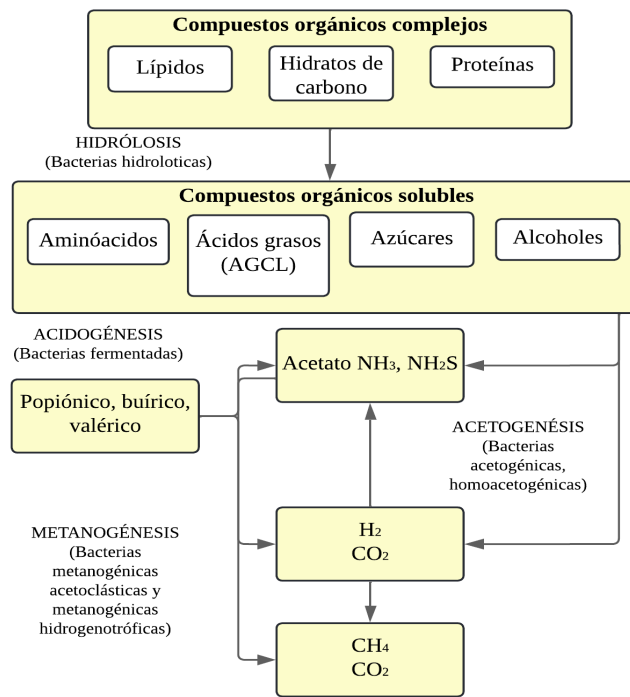
previa, resultando en la producción de ácido acético, ácido fórmico, ácido propiónico, ácido butírico, etanol, hidrógeno y dióxido de carbono. (Bernal Patiño, L. E., & Suárez Ramírez, L. S., 2018).

- Acetogenesis: En primer lugar, las bacterias acetogénicas (productoras de ácido) transforman, mediante la oxidación, los productos derivados de la etapa anterior en acetatos, hidrógeno y dióxido de carbono. Las bacterias homoacetogénicas y las metanogénicas compiten por la utilización de estos gases. (Bernal Patiño, L. E., & Suárez Ramírez, L. S., 2018).

- Metanogenesis: Esta etapa constituye el proceso final en la generación de metano, donde participan bacterias metanogénicas que son completamente anaerobias. Se identifican dos tipos principales de estas bacterias. El primer tipo, llamado hidrogenotrófico, se encarga de reducir principalmente el dióxido de carbono para transformarlo en metano, produciendo aproximadamente el 30% del total. El segundo tipo, conocido como acetoclástico, realiza la hidrólisis del acetato para convertirlo en metano, generando alrededor del 70% del total y oxidando el grupo carbonilo a dióxido de carbono. (Bernal Patiño, L. E., & Suárez Ramírez, L. S., 2018)

El ácido acético juega un papel crucial en la cadena alimenticia anaerobia, participando en la producción de dióxido de carbono y metano a partir de carbohidratos, alcoholes, ácidos carboxílicos, aldehídos y compuestos aromáticos. Cuando los azúcares se convierten en acetato, este proceso de fermentación se denomina homoacetogénesis.

Figura 4. Proceso de digestión anaerobia



Fuente: Autores,2024. Basado de (Matovelle y Matovelle, 2018)

El biogás se produce en dispositivos específicos a través de la descomposición de residuos orgánicos; sus principales componentes son el metano y el dióxido de carbono, resultando como producto final tras varias etapas de degradación. Durante este proceso, es esencial controlar parámetros fundamentales como la temperatura, el pH y los sustratos para asegurar una optimización eficaz (Kabeyi y Olanrewaju, 2022).

6.6. Parámetros a tener en cuenta en la digestión anaeróbica

La digestión anaerobia se ve afectada por una variedad de parámetros que influyen en el desarrollo y crecimiento de las bacterias, así como en la producción eficiente de biogás. Los factores principales que limitan este proceso incluyen el tiempo de retención, la temperatura, la relación C-N, los sólidos totales, la humedad y el pH. En la *Tabla 2* se muestran los rangos correspondientes a cada uno de estos parámetros.

TABLA 2. Parámetros de digestión anaeróbica

Parámetro	Rango	Autor
Tiempo de retención (días)	psicrofílicos: >100 Mesofílicos: 30 – 50 Termofílicos: 15-25	(González, 2014).
Temperatura	psicrofílicos Mínimo: 4 – 10 Óptimo: 15-18 Máximo: 20-25 Mesofílicas Mínimo: 15-20 Óptimo: 25-35 Máximo: 35-45 Termofílicas Mínimo: 15-20 Óptimo: 25-35 Máximo: 35-45	(Bautista, 2016)
Relación C-N	20:1 a 30:1	(Bautista, 2016)
Sólidos totales	7% a 12%	(Tobon, 2018)
Humedad	50% al 60%	(Bautista, 2016)
pH (según el microorganismo)	Hidrolíticos: Entre 7.2 y 7.4 Acetogénico: Entre 7 y 7.2 Metanogénico (6.5 y 7.5)	(Tobon, 2018)

Fuente: Autores, 2024.

Seguidamente, se describirá de manera detallada cada uno de los parámetros descritos en la tabla 2

- *Tiempo de retención hidráulica*: Está estrechamente relacionado con la temperatura y el período durante el cual el sustrato permanece en el biodigestor, factores influenciados por el tamaño del reactor y la cantidad diaria de carga. Este parámetro varía según el tipo de bacterias presentes, como se describe en la

tabla 2, donde se observa que el aumento de la temperatura conlleva una reducción en los períodos de retención (González, 2014). Para lograr una producción específica de biogás, es crucial tener en cuenta que los tiempos de retención en rangos psicrófilicos deben ser mayores que en rangos mesófilicos o termófilicos. Además, es fundamental determinar la tasa diaria de alimentación, típicamente realizada a diario o de manera regular, para gestionar eficazmente el volumen dentro del biodigestor. La descomposición de la materia orgánica sigue una tendencia asintótica, logrando una eliminación del sustrato generalmente en el rango del 40% al 60%, en función del tiempo de retención hidráulico correspondiente y de la producción de biogás por unidad de volumen del reactor (FAO, 2019).

- *Temperatura:* Este factor tiene un impacto significativo en el proceso de digestión anaerobia, dado el amplio rango de temperatura requerido, que varía entre 10 y 55 °C. Según los tipos de biodigestores y los procesos que se agrupan en tres categorías principales, como se indica en la tabla 2, los microorganismos en temperaturas psicrófilicos funcionan a temperaturas inferiores a 25 °C y muestran una menor eficiencia en la degradación y producción de biogás. En contraste, las bacterias en temperaturas mesófilicas, encargadas de la producción eficiente de metano, operan óptimamente a temperaturas por debajo de 45 °C, asegurando así una estabilidad adecuada en el proceso (Bautista, 2016). La gestión de este parámetro es compleja debido a la influencia de la temperatura ambiental externa, lo cual subraya la necesidad de utilizar materiales con adecuada capacidad de aislamiento (FAO, 2019).

- *Relación Carbono-Nitrógeno:* Refleja la proporción entre el carbono y el nitrógeno en un sustrato orgánico. Estos elementos son cruciales para las bacterias metanogénicas, por lo que es fundamental mantener una proporción equilibrada. El carbono sirve como fuente de energía, mientras que el nitrógeno es necesario para la regeneración y el crecimiento celular de estas bacterias, que consumen carbono a una tasa 30 veces mayor que la de nitrógeno. El rango de la relación C-N varía según el sustrato utilizado (FAO, 2019) Si la relación supera 30, habrá un exceso de carbono que se oxidará en CO₂, reduciendo la producción de metano. Por otro lado, si la relación es menor a 30 y hay un exceso de nitrógeno, el carbono se agotará antes que el nitrógeno, lo que causará la interrupción del proceso. (Bautista, 2016).

- *Sólidos totales y humedad:* Para lograr una digestión eficiente y rápida, es crucial que el nivel de sólidos totales se encuentre en el rango del 7% al 12% (Tobón, 2018). Asimismo, se sugiere mantener la humedad entre el 50% y el 60% para garantizar una producción óptima de metano. (Bautista, 2016).
- *pH:* Este parámetro está vinculado con la actividad de los iones hidrógeno y los procesos de formación y descomposición de ácidos orgánicos en el biodigestor. Esta relación es fundamental debido a la influencia del pH en la digestión anaeróbica, especialmente para los microorganismos metanogénicos (FAO, 2019) Mantener el pH en el intervalo de 6 a 8 es crucial para adaptarse a las necesidades específicas de las bacterias presentes. Exceder un pH de 8 tiene efectos adversos en la producción de metano, mientras que un pH por debajo de 6 interrumpe la generación de biogás (Tobón, 2018). Se aconseja realizar controles regulares del pH para evitar la inhibición del metabolismo de los microorganismos metanogénicos y asegurar una producción continua de biogás.
- *Velocidad de carga orgánica:* Este parámetro permite determinar la cantidad de materia orgánica introducida por unidad de volumen y tiempo, así como el tipo de sustrato a emplear, ya que esto influye en la actividad bioquímica dentro del reactor. Un incremento en este parámetro conduce a una reducción en la producción de biogás, mientras que valores bajos indican que el tiempo de retención hidráulico es elevado y/o que la concentración de sólidos volátiles (aquellos que se volatilizan a altas temperaturas) es baja (FAO, 2019).

6.7. Evaluación ambiental

6.7.1. Identificación de impactos

Para identificar impactos sociales se utilizó el diagrama de redes, una herramienta crucial para identificar impactos en proyectos o actividades. Este diagrama, también conocido como diagrama de flujo de causas y efectos, permite visualizar de manera estructurada cómo las distintas actividades de un proyecto pueden generar impactos sobre el medio ambiente. Es una representación gráfica que conecta diferentes elementos y actividades de un proyecto con sus posibles impactos ambientales. Se estructura en nodos y enlaces donde los nodos representan actividades, componentes del proyecto, o elementos del entorno que pueden ser

afectados y los enlaces conectan los nodos y representan las relaciones causa-efecto entre las actividades y los impactos ambientales (Garmendia et al, 2005).

6.7.2. Evaluación de impactos

Para la evaluación de impactos ambientales y socioeconómicos identificados se tuvo en cuenta dos metodologías mixtas, la EPM -Arboleda y la CONESA.

Metodología EPM – Arboleda

Es una metodología desarrollada por la Unidad de planeación de recursos naturales de las Empresas Públicas de Medellín en 1985. Esta metodología consiste en dividir el proyecto en actividades que requieran acciones laborales similares a la función o el desarrollo las cuales se pueden agrupar bajo una misma denominación. Con los impactos identificados se realiza la evaluación con criterios de calificación, donde proponen una expresión o índice denominado calificación ambiental (ca), Junto con 5 criterios característicos de cada impacto, los cuales son Clase, Presencia, Evolución, Magnitud, Duración, cada uno tienen un valor mínimo de 0.0 y máximo de 1.0, junto con dos factores de ponderación (a=7.0 y b=3.0), teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Calificación ambiental.

$$Ca = C(P[a * E * M + b * D])$$

El valor resultante de la calificación ambiental de impacto se clasifica en categorías que indican el nivel de significancia de este.

TABLA 3. Categorías de clasificación del impacto.

Irrelevante	1 – 20
Moderado	21 – 40
Relevante	41 – 60
Grave	61 – 80

Metodología CONESA

La Metodología Conesa es un enfoque cualitativo y semicuantitativo desarrollado por Vicente Conesa Fernández-Vítora para la evaluación de impactos. La metodología se basa en la valoración de diversos factores mediante una serie de criterios y la aplicación de una ecuación que permite obtener un índice de impacto social.

Ecuación 2. Cálculo de importancia.

$$I = Ia * E * M * P * R * S * A * Per * Re$$

La metodología usa criterios para evaluar la magnitud y significancia de los impactos ambientales, y a cada criterio se le asigna un valor que varía según la magnitud del impacto.

TABLA 4. Criterios de evaluación de la metodología CONESA.

Intensidad (Ia)	Grado de alteración provocado por la acción sobre el medio ambiente.	1 (Baja), 2 (Media), 3 (Alta)
Extensión (E)	Área geográfica afectada por la acción.	1 (Puntual), 2 (Parcial), 3 (Total)
Momento (M)	Periodo de tiempo en el que ocurre el impacto (inmediato, corto, medio o largo plazo).	1 (Inmediato), 2 (Corto plazo), 3 (Medio plazo), 4 (Largo plazo)
Persistencia (P)	Duración del impacto en el tiempo.	1(Temporal), 2(Semipermanente), 3(Permanente)
Reversibilidad (R)	Capacidad del medio de retornar a su estado original después del impacto.	1 (Reversible), 2 (Parcialmente reversible), 3 (Irreversible)
Sinergia (S)	Interacción entre impactos que puede incrementar su magnitud.	1 (Sin sinergia), 2 (Con sinergia)
Acumulación (A)	Suma de impactos a lo largo del tiempo.	1 (Sin acumulación), 2 (Con acumulación)
Periodicidad (Per)	Frecuencia con la que se produce el impacto.	1 (Ocasional), 2 (Periódica), 3 (Continua)
Recuperabilidad (Rec)	Posibilidad de restaurar las condiciones ambientales afectadas.	1 (Total), 2 (Parcial), 3 (Nula)

El valor resultante del índice de importancia de impacto se clasifica en categorías que indican el nivel de significancia de este.

TABLA 5. Categorías de clasificación del impacto.

Muy Bajo	1 – 20
Bajo	21 – 40
Moderado	41 – 60
Alto	61 – 80
Muy Alto	81 - 100

6.7.3. Combinación de metodologías

Para la evaluación de los impactos identificados se realizó la combinación de las metodologías EMP y Conesa se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

TABLA 6. Criterios de valoración.

VALORACION CUALITATIVA (Combinación EPM-CONESA)		
SIGNO (SI)		
Impacto beneficioso		+
Impacto perjudicial		-
PRESENCIA (PE)		
Cierta	Cuando la probabilidad de ocurrencia del impacto es del 100%	1
Muy probable	La probabilidad de ocurrencia del impacto es de 70 y 100 %	0.7 - 0.99
Probable	Cuando la probabilidad de ocurrencia del impacto está entre 40 y 70 %	0.4 - 0.69
Poco probable	Cuando la probabilidad que ocurra el impacto está entre 20 y 40 %	0.2 - 0.39
Muy poco probable	Cuando la probabilidad que ocurra el impacto es menor a 20 %	0.01 - 0.19
DURACIÓN (D)		
Muy larga o permanente	Cuando el impacto tiene una duración mayor a 10 años	1
Larga	Cuando el impacto tiene una duración entre 7 y 10 años	0.7 - 0.99
Media	Cuando el impacto tiene una duración entre 4 y 7 años	0.4 - 0.69
Corta	Cuando el impacto tiene una duración entre 1 y 4 años	0.2 - 0.39
Muy corta	Cuando el impacto tiene una duración menor a 1 años	0.01 - 0.19
ACUMULACIÓN (A)		
Sinérgico	Aquél que se produce cuando el efecto conjunto de la presencia simultánea de varios agentes supone una incidencia ambiental mayor que el efecto suma de las incidencias individuales contempladas aisladamente	1

Acumulativo	Aquél que al prolongarse en el tiempo la acción del agente inductor, incrementa progresivamente su gravedad	0.5 - 0.99
Simple	Aquél que se manifiesta sobre un solo componente ambiental o cuyo modo de acción es individualizado, sin consecuencias en la inducción de nuevos efectos	0.01 - 0.49
EXTENSIÓN (E)		
Critico	Área de influencia del impacto critica	1
Total	Área de influencia del impacto total	0.7 - 0.99
Extenso	Área de influencia del impacto extensa	0.4 - 0.69
Parcial	Área de influencia del impacto parcial	0.2 - 0.39
Puntual	Área de influencia del impacto puntual	0.01 - 0.19
INTENSIDAD (In)		
Total	Grado de destrucción total	1
Muy alta	Grado de destrucción muy alto	0.7 - 0.99
Alta	Grado de destrucción alto	0.4 - 0.69
Media	Grado de destrucción medio	0.2 - 0.39
Baja	Grado de destrucción Bajo	0.01 - 0.19
EVOLUCIÓN (Ev)		
Muy rápida	Cuando en menos de 1 mes el impacto logra sus máximas consecuencias	1
Rápida	Cuando entre 1 y 12 meses el impacto logra sus máximas consecuencias	0.7 - 0.99
Media	Cuando entre 12 y 18 meses el impacto logra sus máximas consecuencias	0.4 - 0.69
Lenta	Cuando entre 18 y 24 meses el impacto logra sus máximas consecuencias	0.2 - 0.39
Muy lenta	Cuando en más de 24 meses el impacto logra sus máximas consecuencias	0.01 - 0.19
MAGNITUD (M)		
Muy alta	Cuando el factor tiene una afectación mayor al 80%, donde se destruye o cambia casi totalmente	1
Alta	Cuando el factor tiene una afectación entre 60% y 80%, donde la alteración es parcial del factor analizado	0.7 - 0.99
Media	Cuando el factor tiene una afectación entre 40% y 60%, donde la afectación es media en el factor analizado	0.4 - 0.69
Baja	Cuando el factor tiene una afectación entre 20 y 40 %, donde la afectación es baja	0.2 - 0.39
Muy baja	Cuando el factor tiene unas afectaciones mínimas, menores al 20 %	0.01 - 0.19
PERSISTENCIA (PER)		
Permanente	Aquél que supone una alteración indefinida en el tiempo de factores ambientales predominantes en la estructura o en la función de los sistemas de relaciones ecológicas o ambientales presentes en el lugar	1

Temporal	Aquél que supone alteración no permanente en el tiempo, con un plazo temporal de manifestación que puede estimarse o desestimarse	0.5 - 0.99
Fugaz	Aquél que supone alteración no es permanente en el tiempo.	0.01 - 0.49
REVERSIBILIDAD (Rv)		
Irreversible	Aquél que supone la imposibilidad, o la “dificultad extrema”, de retornar, por medios naturales, a la situación anterior a la acción que lo produce.	1
Largo plazo	Aquél que supone la posibilidad a largo plazo de retornar, por medios naturales, a la situación anterior a la acción que lo produce.	0.7 - 0.99
Medio plazo	Aquél que supone la posibilidad a mediano plazo de retornar, por medios naturales, a la situación anterior a la acción que lo produce.	0.4 - 0.69
Corto plazo	Aquél que supone la posibilidad a corto plazo de retornar, por medios naturales, a la situación anterior a la acción que lo produce.	0.2 - 0.39
Inmediato	Aquél que supone la posibilidad inmediata de retornar, por medios naturales, a la situación anterior a la acción que lo produce.	0.01 - 0.19
RECUPERABILIDAD (RC)		
Irrecuperable	Aquél en que la alteración o pérdida que supone es imposible de reparar o restaurar, tanto por la acción natural como por la humana	1
Recuperable a largo plazo	Aquél en que la alteración o pérdida que se puede de reparar o restaurar, tanto por la acción natural como por la humana, a un largo plazo.	0.7 - 0.99
Mitigable	Aquél en que la alteración que supone puede mitigarse, bien por la acción humana, y, asimismo.	0.4 - 0.69
Recuperable a medio plazo	Aquél en que la alteración que supone puede eliminarse, bien por la acción natural, bien por la acción humana, y, asimismo, aquel en que la alteración que supone puede ser reemplazable, a un mediano plazo.	0.2 - 0.39
Recuperable de manera inmediata	Aquél en que la alteración que supone puede eliminarse, bien por la acción natural, bien por la acción humana, y, asimismo, aquel en que la alteración que supone puede ser reemplazable.	0.01 - 0.19

Fuente: Autores, 2024.

La metodología se basa en la valoración de diversos factores mediante una serie de criterios y la aplicación de una ecuación que permite obtener un índice de impacto social.

6.7.4. Cálculo de importancia.

$$Ca = CP7.0Ev \cdot M \cdot Ain + 3.0D \cdot E \cdot Per \cdot Rv \cdot Rc$$

El valor resultante de la calificación ambiental de impacto se clasifica en categorías que indican el nivel de significancia de este.

TABLA 7. Categorías de clasificación del impacto.

CALIFICACIÓN AMBIENTAL	IMPORTANCIA DEL IMPACTO AMBIENTAL
<= 2.5	Irrelevante
2.6 - 5.0	Moderado
5.1 - 7.4	Relevante
> 7.5	Grave

Fuente: Autores, 2024

7. Metodología

Tipo y enfoque de investigación

Este estudio se clasifica como una investigación aplicada de carácter descriptivo y evaluativo (Espinosa y Vélez, 2019). La investigación aplicada se centra en la resolución de problemas prácticos específicos, en este caso, la implementación de un biodigestor en la empresa de Lácteos La Pastora para mejorar la gestión de residuos y la producción de energía renovable.

El enfoque mixto permite combinar la solidez de los datos cuantitativos con la profundidad y el contexto proporcionados por los métodos cualitativos (Hernández, 2013). Esto asegura una evaluación integral y multidimensional del proyecto, considerando tanto los aspectos técnicos y económicos como los impactos sociales y ambientales.

Proceso metodológico

Los instrumentos que se dispusieron son las bases de datos como Scopus, scielo, science direct y google académico, de igual modo, el análisis multicriterio que se dispuso para la *fase 1 y 2*, metodología mixta para la identificación de impactos (CONESA y EPM) el cual se dispondrá para la *fase 3*.

A continuación, se detallará en *la figura 3 las fases propuestas que dispusieron el orden preventivo de la investigación del estudio*, estas fases corresponden a la ejecución de cada objetivo, en *la figura 3 se visualizará las actividades que ejecutarán en cada fase*, lo cual estas fases

FASE 1: Objetivo específico 1, evaluar la cantidad, propiedades químicas, físicas y potencial energético del lactosuero en la empresa de lácteos La pastora en Belén Boyacá.

Se revisaron las generalidades de la empresa de Lácteos La Pastora, para identificar la demanda, la necesidad energética y la cantidad de lactosuero generado. Este análisis se hizo mediante información

proporcionada por la empresa, teniendo en cuenta cálculos de masa y energía hechos en estudios previos al proyecto, y que se tuvieron en cuenta para evaluar teóricamente la cantidad de biogás que se puede producir a partir del lactosuero generado en el proceso de producción. Además, se realizó una revisión bibliográfica para evaluar los procesos de obtención del lactosuero y sus características fisicoquímicas, para determinar su composición. De igual manera, se investigaron los compuestos que facilitaron la activación de la descomposición y los factores que influyen en la composición del biogás. Todas estas temáticas permitieron comprender la viabilidad del uso del lactosuero para la producción de biogás logrando identificar las necesidades que demanda.

FASE 2: Objetivo específico 2, identificar el biodigestor adecuado por medio de un análisis comparativo de diferentes tipos de biodigestores mediante un análisis multicriterio.

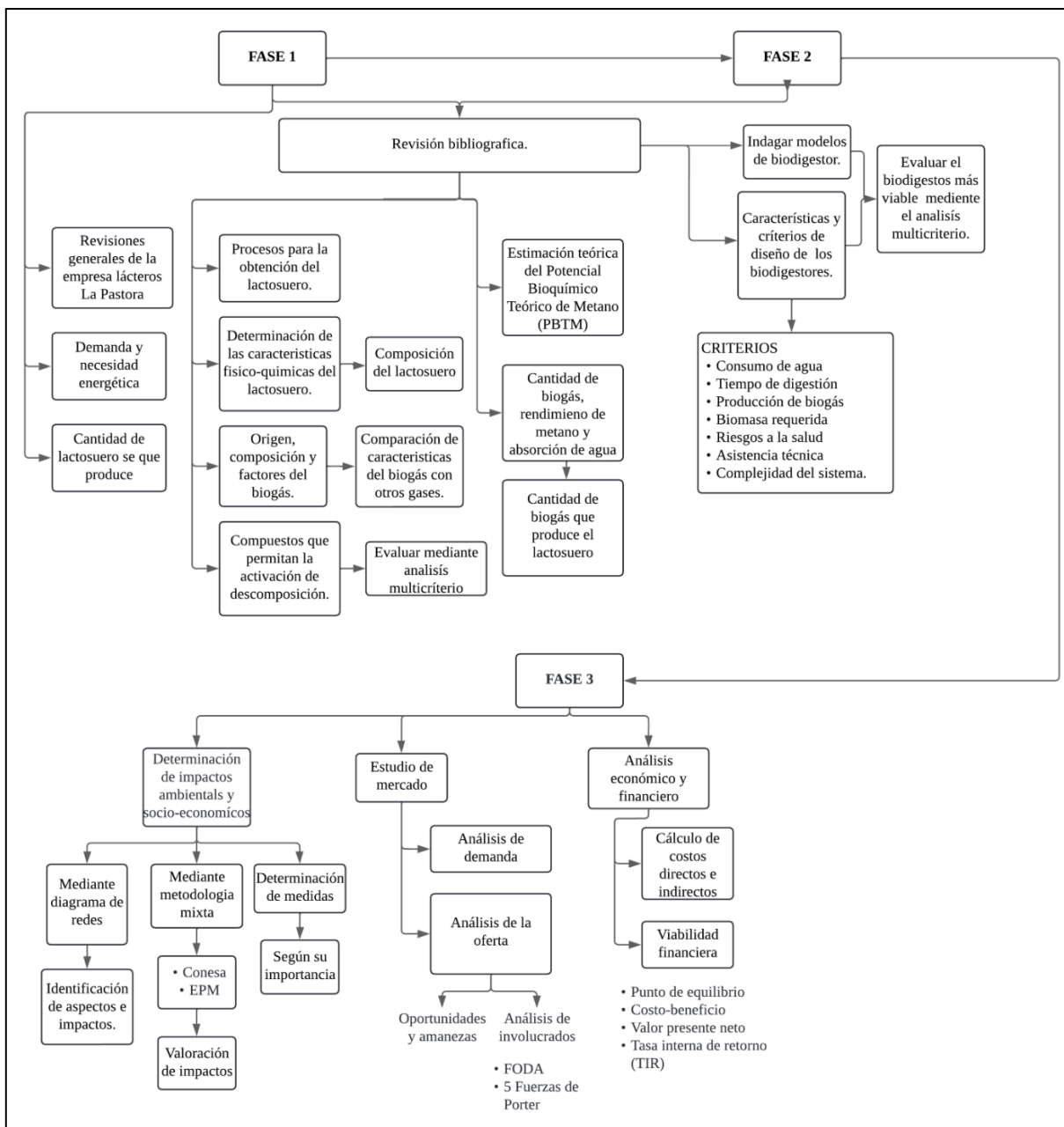
Según la información de la FASE 1, se evaluaron los tipos de biodigestores, considerando diversos criterios según sus características específicas. El objetivo de esta evaluación fue determinar, mediante un análisis multicriterio, cuál es el tipo de biodigestor óptimo para las necesidades que demanda el subproducto y la generación eficiente de biogás.

FASE 3: Objetivo específico 3, realizar un estudio de prefactibilidad técnico-económico para evaluar la viabilidad financiera del proyecto.

Inicialmente, se determinaron los impactos ambientales y socioeconómicos para evaluar los efectos que el biodigestor podría generar en el área de estudio. Este análisis se realizó con una metodología mixta (CONESA y EPM), que permitió valorar los impactos y establecer las medidas necesarias para mitigarlos. Para el estudio de prefactibilidad, se desarrolló un estudio de mercado con un análisis de la demanda y la oferta con un análisis FODA, para comprender el entorno competitivo. Finalmente, se efectuará un análisis económico y financiero, considerando el cálculo de costos directos e indirectos asociados al servicio de recolección de lactosuero, la determinación del punto de equilibrio, análisis costo-beneficio, retorno sobre la inversión (ROI),

valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR), con el objetivo de evaluar la viabilidad financiera del proyecto.

Figura 5. Diseño metodológico



Fuente: Autores, 2024.

8. Análisis y discusión de resultados

8.1. **Fase 1** Evaluar la cantidad, propiedades químicas, físicas y potencial energético del lactosuero en la empresa de lácteos La pastora en Belén Boyacá.

La Fase 1 del estudio de prefactibilidad del biodigestor para el aprovechamiento energético del lactosuero producido por la empresa de lácteos La Pastora en Belén, Boyacá, se centra en la evaluación detallada de las características y el potencial energético del lactosuero. Esta fase es crucial para comprender la viabilidad técnica y económica del proyecto, ya que proporciona los datos necesarios para dimensionar el biodigestor y estimar su rendimiento.

8.1.1. Cantidad de Lactosuero Producido

La cantidad de lactosuero producido es un parámetro fundamental para dimensionar el biodigestor y estimar su capacidad de producción de biogás. En la empresa de Lácteos La Pastora, el lactosuero queda como resultante involucrado en dos de las etapas de producción diaria: escurrido y cuarteto.

TABLA 8. Proceso productivo de la empresa de lácteos La pastora

ETAPA DE PRODUCCIÓN	INVOLUCRADOS	VALOR	UNIDADES
Recepción de leche	Leche	2400	Lt
Filtrado de leche	Leche	2400	Lt
	Natas	1,5	Kg
	Desechos	0,2	Kg
	Energía (Motobomba)	1,11855	Kw
	Emisiones (CO^2)	0,1409373	Kg
Descremado	Leche	2398,3	Lt
	Crema de leche	18	Kg
	Leche descremada	2380,3	Lt

	Energía (Descremadora)	18,26965	Kw
	Emisiones (CO^2)	2,3019759	Kg
Pre calentamiento	Leche descremada	2380,3	Kg
	Temperatura	36	°C
	Vapor	78,6446907	Kg
	Cuajo	0,018	Kg
	Energía (Caldera a gas)	59,656	Kw
	Emisiones (CO^2)	7,516656	Kg
Calentamiento	Leche descremada	2301,67331	Lt
	Temperatura	41	°C
	Vapor	99,3406619	Kg
	Cuajada	324	Kg
	Energía (Caldera a gas)	59,656	Kw
	Emisiones (CO^2)	7,516656	Kg
Cuarteo	Cuajada	324	Kg
	Suero	1880	Lt
Escurreido	Cuajada	324	Kg
	Suero	14	Lt
Hilado	Cuajada	324	Kg
	Temperatura	80	°C
	Vapor	260,769238	Kg
	Queso	269	Kg
	Energía (Hiladora)	8,9484	Kw
	Emisiones (CO^2)	1,1274984	Kg
Moldeado	Queso	269	Kg
Reposo y Enfriamiento	Queso	269	Kg
Empaque, Rotulación y almacenamiento	Queso	269	Kg
	Temperatura	4	°C
	Empaques	1,8	Kg
	Residuos Plásticos	0,1	Kg
	Energía (Cuarto frío)	7	Kw

Emisiones (CO^2)	0,677376	Kg
----------------------	----------	----

Fuente: Autores, 2024

En la etapa de “cuarteo”, la cantidad de lactosuero producida es de 1880 litros y en la etapa de “escurrido” es de 14 litros.

TABLA 9. Producción de lactosuero

Cuarteo	Suero	1880	Lt
Ecurrido	Suero	14	Lt

Fuente: Autores, 2024

Ahora bien, la cantidad de producción de lactosuero se desglosó en información diaria, semanal y mensual. Para determinar el volumen diario, se suman las cantidades que se generan en las etapas antes mencionadas:

Ecuación 3. Volumen diario de lactosuero producido

$$\text{lactosuero diario: } 1,880\text{lt} + 14\text{lt} = 1,894\text{lt diarios}$$

Para calcular el volumen semanal de lactosuero producido, se multiplica el volumen diario por el número de días de operación de la planta en una semana típica:

Ecuación 4. Volumen semanal de lactosuero producido

$$\text{lactosuero semanal: } 1,894\text{lt/día} \times 7\text{días/semana} = 13,258\text{lt/semana}$$

Para determinar el volumen mensual de lactosuero producido, se multiplica el volumen diario por el número de días laborales de operaciones, que serían 26 días sacando los domingos:

Ecuación 5. Volumen mensual de lactosuero producido

$$\text{lactosuero mensual: } 1,894\text{lt/día} \times 26\text{días/mes} = 49,244\text{lt/mes}$$

Con un volumen diario de 1894 litros, se puede planificar la capacidad del biodigestor para manejar esta cantidad de lactosuero de manera eficiente. Los volúmenes semanales y mensuales proporcionan una visión más amplia del manejo continuo y la capacidad de almacenamiento necesaria para el proceso de digestión anaerobia.

TABLA 10. Resumen de producción

Periodo	Volumen de Lactosuero (lt)
Diario	1894
Semanal	1,258
Mensual	49244

Fuente: Autores, 2024

8.1.2. Propiedades químicas y físicas del lactosuero

El lactosuero es un subproducto líquido resultante del proceso de coagulación de la leche durante la producción de queso. Este subproducto contiene una alta concentración de nutrientes y componentes orgánicos, lo que lo convierte en una fuente potencial para la producción de biogás mediante digestión anaerobia (Anahua, 2020).

Según el estudio realizado por Mejía et al., (2021) las propiedades químicas y físicas del suero como residuo lácteo, es variable según la fuente de origen de la leche; no obstante, el investigador argumentó la existencia de propiedades generales que son inherente al lactosuero independiente del origen de la leche, asimismo, mostró un derrotero de porcentaje estándar de la cantidad volúmicas presentes en el subproducto, tal como se muestra en la tabla 11.

TABLA 11. Propiedades químicas y físicas

Propiedad	Tipo	Valor Típico Teórico
pH	Química	4.5 - 6.5
Sólidos Totales (ST)	Física	6%
Sólidos Volátiles (SV)	Física	5%
Lactosa	Química	4.5%
Proteínas	Química	0.8%
Grasas	Química	0.5%

Fuente: Mejía et al., (2021)

Propiedades Químicas

1. **pH del Lactosuero:** El pH del lactosuero es un parámetro crítico que afecta la eficiencia de la digestión anaerobia. El pH generalmente se encuentra en el rango de 4.5 a 6.5. Un pH dentro de este rango es ideal para la actividad de los microorganismos metanogénicos, responsables de la producción de biogás. Un pH fuera de este rango puede inhibir la actividad microbiana y reducir la eficiencia del proceso (Mejía et al., 2021).
2. **Lactosa:** La lactosa constituye aproximadamente el 4.5% del lactosuero. Es una fuente rica en carbono y es fácilmente degradada por los microorganismos durante la digestión anaerobia, lo que contribuye significativamente a la producción de biogás (Mejía et al., 2021).
3. **Proteínas:** Las proteínas representan alrededor del 0.8% del lactosuero. Aunque son más difíciles de degradar que la lactosa, las proteínas tienen un alto contenido energético y contribuyen a la producción de biogás (Mejía et al., 2021)

4. **Grasas:** Las grasas constituyen aproximadamente el 0.5% del lactosuero. Aunque tienen un alto potencial energético, su degradación es más lenta y pueden inhibir el proceso de digestión anaerobia si no se manejan adecuadamente (Rosales, 2014)

Propiedades Físicas

1. **Sólidos Totales (ST):** Los sólidos totales en el lactosuero representan la suma de todos los sólidos presentes, tanto disueltos como suspendidos. Este parámetro es crucial para calcular la carga orgánica introducida en el biodigestor. Un contenido típico de sólidos totales es del 6%, lo que indica una alta concentración de materia orgánica favorable para la producción de biogás (López et al., 2018)
2. **Sólidos Volátiles (SV):** Los sólidos volátiles son la fracción de los sólidos totales que pueden ser degradados biológicamente. Representan la parte de los sólidos que los microorganismos metanogénicos pueden convertir en biogás. Un contenido típico de sólidos volátiles es del 5%, sugiriendo que la mayor parte de los sólidos presentes puede ser convertida en biogás (Anahua, 2020)

8.1.3. Evaluación del Consumo Energético

El proceso de producción en la empresa La Pastora implica varias etapas de producción donde es requerida la aplicación de calor lo que significa que es necesario un consumo energético, el cual, es necesario determinar el tipo de equipo, tipo de motor, potencia del motor, las horas de uso del equipo, consumo de energía eléctrica, para determinar el consumo energético de la empresa de lácteos La Pastora, las cuales se realizaron mediante las siguientes ecuaciones,

Ecuación 6. Potencia de motor (PM) en Kw

$$PM(Kw) = PM(HP) * 0,7457$$

Ecuación 7. Consumo de energía eléctrica (CEE)

$$CEE(Kw) = PM(Kw) * Cantidad\ de\ motores * horas\ de\ uso\ al\ día$$

Además de eso se realizó el cálculo de las emisiones totales que genera cada una de las etapas de producción dependiendo el consumo de energía eléctrica que necesita la empresa, teniendo en cuenta un factor de emisión de $0,126 \text{ KgCO}_2$, lo cual se calculará mediante la siguiente formula.

Ecuación 8. Emisiones totales (KgCO₂)

$$\text{Emisiones Totales(KgCO}_2) = \text{CEE(Kw)} * \text{factor de emisiones}$$

TABLA 12. Consumo energético de La Pastora.

EQUIPOS	TIPO DE MOTOR	CANTIDAD DE MOTORES	USO	TIPO DE COMBUSTIBLE	HORAS DE USO AL DIA	POTENCIA DE MOTOR (HP)	POTENCIA DEL MOTOR (KW)	CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA (KWh)	CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA (KWh/MES)	EMISIONES TOTALES (KgCO ₂ /MES)
Bomba Centrifuga	Monofásico	1	Filtrado de leche	Electricidad	3	1/2	0,3729	1,11855	33,5565	4,228119
Descremadora	Monofásico	1	Separación de natas	Electricidad	3,5	4	2,9828	10,4398	313,295	39,46244
Hiladora	Trifásico	1	Hilado	Electricidad	4	1 1/2	1,1186	4,4742	134,226	16,912476
Pasteurizadora	Trifásico	1	Pasteurización	Electricidad	1,5	1 ½	1,1186	1,677825	50,33475	6,3421785
Hidro lavadora	Trifásico	1	Lavado de equipos	Electricidad	2	1/2	0,3729	0,7457	22,371	2,818746
Cuarto frío	Trifásico	1	Preservación del producto.	Electricidad	12	1	0,2800	3	100,8	20,32128
TOTAL, DE CONSUMO DE ENERGÍA ELECTRICA (KWh/mes)									654.48	
EMISIONES TOTALES GENERADAS POR LA EMPRESA EN UN MES KgCO_2									74,84	

Fuente: Autores, 2024

8.1.4. Potencial energético del lactosuero

El potencial energético del lactosuero se refiere a la capacidad de este subproducto para generar energía, principalmente a través de la producción de biogás mediante digestión anaerobia. La producción de biogás se estima a partir de la cantidad de sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) presentes en el lactosuero; los sólidos volátiles representan la fracción de los sólidos que pueden ser degradados biológicamente para producir biogás.

Según el estudio de Mejía et al., (2021) y sus valores relacionados con ST y SV de esta forma:

Contenido de Sólidos Totales (ST): 6%

Contenido de Sólidos Volátiles (SV): 5%

Para el cálculo se utilizó los siguientes parámetros:

- **Producción específica de biogás:** 0.5 m³/kg de ST
- **Contenido de metano en el biogás:** 60%
- **Poder calorífico del metano:** 10 kWh/m³

Cálculo del potencial energético:

Determinación de los Sólidos Totales (ST)

$$ST = \text{Volumen diario de lactosuero} \times \text{Contenido de ST}$$

$$ST = 1894 \text{lt/día} \times 0.06 = 113.64 \text{lt/día}$$

Determinación de los Sólidos Volátiles (SV)

$$SV = ST \times \text{Contenido de SV}$$

$$SV = 113.64 \text{kg/día} \times 0.05 = 5.682 \text{kg/día}$$

Producción Total de Biogás

$$\text{Producción de biogás} = SV \times \text{Producción específica de biogás}$$

$$\text{Producción de biogás} = 113.64\text{kg/día} \times 0.5\text{m}^3/\text{kg} = 56.82\text{m}^3/\text{día}$$

Producción de Metano

$$\text{Producción de metano} = \text{Producción de biogás} \times \text{Contenido de metano}$$

$$\text{Producción de metano} = 56.82\text{m}^3/\text{día} \times 0.6 = 34.09\text{m}^3/\text{día}$$

Potencial Energético en kWh

$$\text{Potencial energético} = \text{Producción de metano} \times \text{Poder calorífico del metano}$$

$$\text{Potencial energético} = 34.09\text{m}^3/\text{día} \times 10\text{kWh}/\text{m}^3 = 340.92\text{kWh}/\text{día}$$

TABLA 13. Evaluación energética

Parámetro	Valor / día	Valor / mes
Volumen diario de lactosuero	1894 lt/día	49244 lt/mes
Contenido de Sólidos Totales (ST)	6%	
Sólidos Totales (ST)	113.64 kg/día	
Contenido de Sólidos Volátiles (SV)	5%	
Sólidos Volátiles (SV)	5.682 kg/día	
Producción de biogás	56.82 m ³ /día	1477 m ³ /mes
Producción de metano	34.09 m ³ /día	886,34 m ³ /mes
Potencial energético	340.92 kWh/día	8863,92 kWh/mes

Fuente: Autores, 2024

Con una producción diaria de 340.92 kWh de energía, el lactosuero se presenta como una valiosa fuente de energía renovable que no solo ayuda a reducir los costos operativos y mejorar la eficiencia de la planta, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental. Implementar un sistema de digestión anaerobia para el tratamiento del lactosuero representa una oportunidad significativa para la empresa, alineándose con sus objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética.

8.2. Fase 2 Identificar el biodigestor adecuado por medio de un análisis comparativo de diferentes tipos de biodigestores mediante un análisis multicriterio.

Para seleccionar el biodigestor adecuado para la empresa de Lácteos La Pastora, se realizó un análisis comparativo de diferentes tipos de biodigestores mediante un análisis multicriterio. Este análisis considera factores técnicos, económicos y ambientales, con el objetivo de determinar la mejor opción que se adapte a las necesidades y características específicas de la empresa

Se identificaron tres tipos de biodigestores adecuados para el tratamiento del lactosuero en las industrias lácteas. La finalidad es seleccionar la opción óptima para que la industria láctea, a través del uso de biodigestores como alternativa renovable, pueda gestionar eficazmente este subproducto, el cual tiene un impacto negativo significativo en el medio ambiente. Adicionalmente, se pretende que esta solución produzca un recurso energético para la empresa de lácteos La Pastora.

En el escenario actual de búsqueda constante de soluciones sostenibles y eficientes para atender las demandas energéticas, la evaluación de alternativas se ha vuelto un elemento crucial para la toma de decisiones. En este contexto, el uso del análisis multicriterio se reconoce como una herramienta valiosa, que permite a los responsables de la toma de decisiones comparar diversas opciones basándose en una variedad de criterios clave. Esta evaluación no sólo incluye aspectos económicos, sino que también incorpora dimensiones ambientales, sociales y técnicas, ofreciendo un marco integral para elegir la alternativa más adecuada.

Con base en la revisión bibliográfica de los tres tipos de biodigestores identificados, es factible llevar a cabo una comparación utilizando el enfoque de análisis multicriterio. Se evaluarán las opciones del biodigestor

tipo UASB, del biodigestor tipo CSTR y del biodigestor tipo UAF, considerando criterios clave y comparándolos entre sí mediante la asignación de puntajes (1, 2 o 3), con el objetivo de seleccionar la alternativa que mejor se ajuste a las necesidades de la compañía

TABLA 14. Análisis multicriterio de biodigestores

CRITERIOS	ALTERNATIVAS		
	<i>Biodigestor tipo UASB</i>	<i>Biodigestor tipo CSTR</i>	<i>Biodigestor tipo UAF</i>
Costo/beneficio	3	1	1
Tiempo de digestión (TRH),	2	3	1
Producción de biogás	2	3	2
Riesgos a la salud	2	2	2
Dificultad de implementación	1	2	1
Eficiencia energética	3	3	3
Beneficios ambientales	3	3	3
Sostenibilidad A LARGO PLAZO	3	3	3
TOTAL, DE PUNTUACIÓN	19	20	16

Fuente: Autores, 2024.

Para el primer criterio, relacionado con el costo-beneficio, el biodigestor tipo UASB suele presentar costos más asequibles y manejables debido a su estructura, la cual requiere inversiones iniciales potencialmente menores en comparación con la construcción de un biodigestor tipo CSTR. El segundo criterio evaluado es el tiempo de retención hidráulica (TRH), aunque los tres tipos de biodigestores tienen rangos similares, el biodigestor tipo UASB necesita un período prolongado para la formación de un adecuado manto de lodos, y una vez formado este manto, su TRH se acelera considerablemente.

Para el tercer criterio, relacionado con la producción de biogás, los tres tipos de biodigestores presentan porcentajes de producción similares. No obstante, según un estudio realizado por Mosquera, A. (2021), el biodigestor CSTR es más eficiente en este aspecto. Respecto al cuarto criterio, que aborda los riesgos para la salud,

todos los tipos de biodigestores presentan ciertos riesgos de seguridad, como el rango de explosividad y la propagación de estos compuestos a través del aire, entre otros. Estos riesgos dependen del porcentaje de biogás presente en el reactor; un 5% es el límite inferior de explosividad, mientras que un 30% representa un riesgo de sofocación debido a la deficiencia de oxígeno (Gobierno de Santa Fe, 2019).

En términos de complejidad en la implementación, el biodigestor CSTR presenta mayores desafíos debido a la complejidad de su estructura, tamaño y especificaciones del reactor. En relación con el sexto criterio, eficiencia energética, las tres opciones cumplen adecuadamente según la calidad de la biomasa y la tecnología empleada, lo que las posiciona como alternativas eficaces para convertir el lactosuero en energía. Específicamente, el biogás demuestra una notable eficiencia en la solución y aprovechamiento del lactosuero. Respecto al séptimo criterio, los tres tipos de biodigestores cumplen satisfactoriamente ya que los productos generados contribuyen a reducir el uso y la extracción de combustibles no renovables, aprovechando con eficacia el lactosuero, frecuentemente desechado en vertidos que ocasionan diversos impactos ambientales adversos. Por último, en términos de sostenibilidad a largo plazo, los biodigestores cumplen con este criterio al representar una tecnología que genera energía renovable mediante la utilización de residuos, lo que contribuye significativamente a la disminución de la extracción de recursos no renovables y los impactos ambientales y sociales asociados.

Con base en la información previamente analizada, el biodigestor tipo CSTR emerge como el modelo más adecuado para las condiciones especificadas. Este resultado ofrece varias ventajas respecto al otro tipo de modelo, destacándose como la opción óptima para la implementación y ofrece una alta eficiencia en la producción de biogás y flexibilidad operativa, a pesar de sus costos iniciales y de mantenimiento más altos. Su capacidad para manejar grandes volúmenes de lactosuero y su eficiencia lo hacen ideal para las necesidades de la empresa.

8.3. Fase 3 Realizar un estudio de prefactibilidad técnico-económico para evaluar la viabilidad financiera del proyecto.

El análisis financiero de un proyecto está estrechamente vinculado con la toma de decisiones de la empresa, asegurando que las decisiones sean viables al momento de realizar el proyecto, especialmente en cuanto

a la aportación financiera para su desarrollo inicial. Este análisis se divide en costos directos e indirectos, incluyendo el diseño, la ejecución y el montaje del proyecto.

Esta evaluación económica constituye la etapa final del análisis de factibilidad del proyecto de inversión. Para ello, se recopila la información generada en los estudios de los capítulos anteriores, permitiendo evaluar económicamente el valor del dinero a lo largo del tiempo. El objetivo es medir la eficiencia de la inversión y su rentabilidad durante el periodo de vida establecido del proyecto.

8.3.1. Evaluación de impactos ambientales

La combinación de ambas metodologías permite una evaluación más robusta y detallada, aprovechando la estructura y el rigor de la EMP junto con la especificidad y claridad de la valoración numérica de CONESA. Esta sinergia asegura una evaluación detallada de su magnitud y significancia, y la proposición de medidas de mitigación efectivas. A continuación, se presenta la evaluación de impactos ambientales y socioeconómicos previamente identificados, con la metodología combinada. Estos impactos se generarán al adicionar al proceso de la Empresa de La Pastora un biodigestor

TABLA 15. Matriz de evaluación de impactos

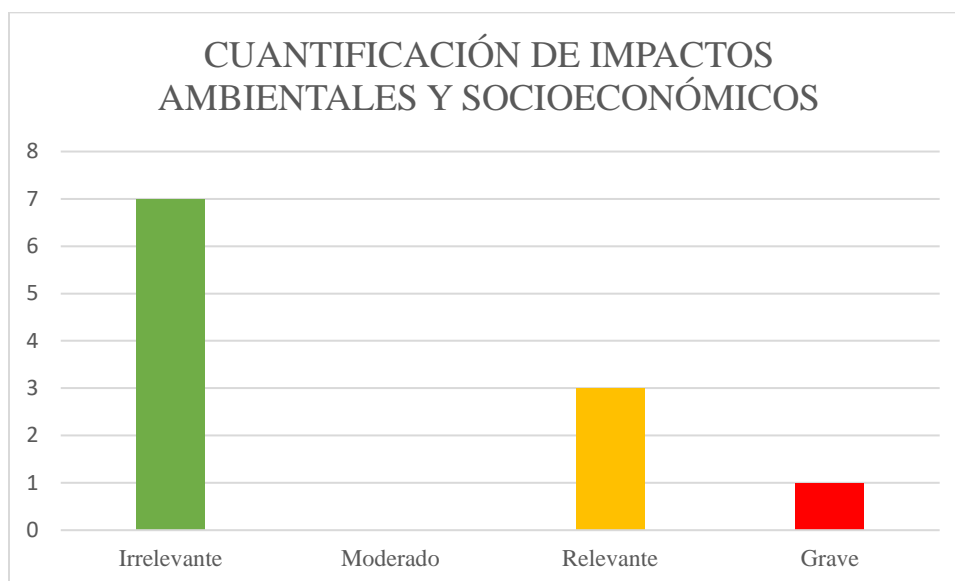
VALORACION CUALITATIVA (Combinación EPM-CONESA)														
FACTORES	IMPACTO	Signo	Presencia	Duración	Acumulación	Extensión	Intensidad	Evolución	Magnitud	Persistencia	Reversibilidad	Recuperabilidad	CALIFICACIÓN AMBIENTAL	IMPORTANCIA
Ambiental	Generación de emisiones en el proceso de construcción e implementación del biodigestor.	+	0,5	0,7	0,7	0,9	0,9	0,7	0,9	1	0,7	0,9	1,98	IRRELEVANTE
	Reducción de emisiones una vez esté en funcionamiento el biodigestor.	+	0,5	0,8	0,6	1	0,9	0,8	0,7	1	0,8	0,7	1,73	IRRELEVANTE
	Mejora en la gestión de residuos como el lactosuero.	+	0,5	0,7	0,6	0,9	0,9	0,7	0,9	1	0,8	0,9	1,87	IRRELEVANTE
	Contaminación del suelo en pruebas piloto.	-	1	0,9	1	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	5,14	RELEVANTE
	Contaminación del aire en pruebas piloto y ajustes.	-	1	0,8	0,8	0,7	0,9	1	0,8	1	0,9	0,9	5,39	RELEVANTE
	Generación de olores alrededor de la empresa durante la operación.	-	1	0,9	0,9	0,8	1	1	1	1	1	0,6	7,60	GRAVE
	Disminución de contaminación en el suelo y recursos hídricos por el buen uso al lactosuero	+	1	0,8	0,8	0,9	0,8	1	0,8	1	0,9	0,9	5,33	RELEVANTE
Socioeconómico	Mejora en la calidad de vida a los habitantes del municipio	+	0,3	0,7	0,6	0,9	0,9	0,8	0,9	1	0,8	0,7	1,13	IRRELEVANTE

Mejora a la empresa de lácteos La Pastora por la disminución de costos energéticos	+	0,5	0,7	0,6	1	0,9	0,8	0,9	1	0,8	0,5	1,78	IRRELEVANTE
Aumento en educación y capacitación sobre energías renovables	+	0,4	0,7	0,6	0,9	0,9	0,7	0,9	1	0,8	0,7	1,38	IRRELEVANTE
Aumento en el desarrollo tecnológico de la empresa	+	0,3	0,5	0,6	0,8	0,9	0,8	0,8	1	0,8	0,9	0,98	IRRELEVANTE

Fuente: Autores, 2024.

Según la aplicación de la matriz de impactos ambientales y socioeconómicos, los impactos más críticos que se evidenciaron es el de generación de olores alrededor de la empresa durante la operación del biodigestor, el cual se estableció un impacto como GRAVE y tres impactos RELEVANTE, estableciendo que la tecnología del biodigestor es una óptima solución ante la problemática que se presenta en la empresa de lácteos La Pastora. Ahora, es importante establecer un programa de seguimiento y monitoreo con el fin de mitigar los impactos identificados para que pase a un nivel de importancia de impacto inferior.

Figura 6. Cualificación de impactos ambientales y socioeconómicos



Fuente. Autores, 2024.

8.3.2. Estudio de prefactibilidad

Es la recopilación de datos lo que proporcionará la información necesaria sobre la propuesta del diseño del biodigestor, sirviendo, así como base para tomar decisiones acertadas en relación con su desarrollo y estudio para su implementación. La factibilidad se divide en tres aspectos:

8.3.2.1. Estudio de mercado

Destinación de Biogás

Mediante cálculos de reglas de tres se estima que para 650 kWh que consume la empresa mensualmente se necesitan 108 m³/mes de biogás. Según las facturas de gas que recibe La Pastora por parte de la empresa proveedora de gas natural el consumo de gas es de 550 m³/mes aproximadamente, por tanto, se destina la cantidad de biogás necesaria para cubrir ese consumo. De la misma manera se obtiene el valor del lactosuero necesario para cubrir la demanda energética necesaria en la empresa, el cual tiene un valor de 843 litros de lactosuero para producir 658 108 m³/mes de biogás.

Destinación de Biogás

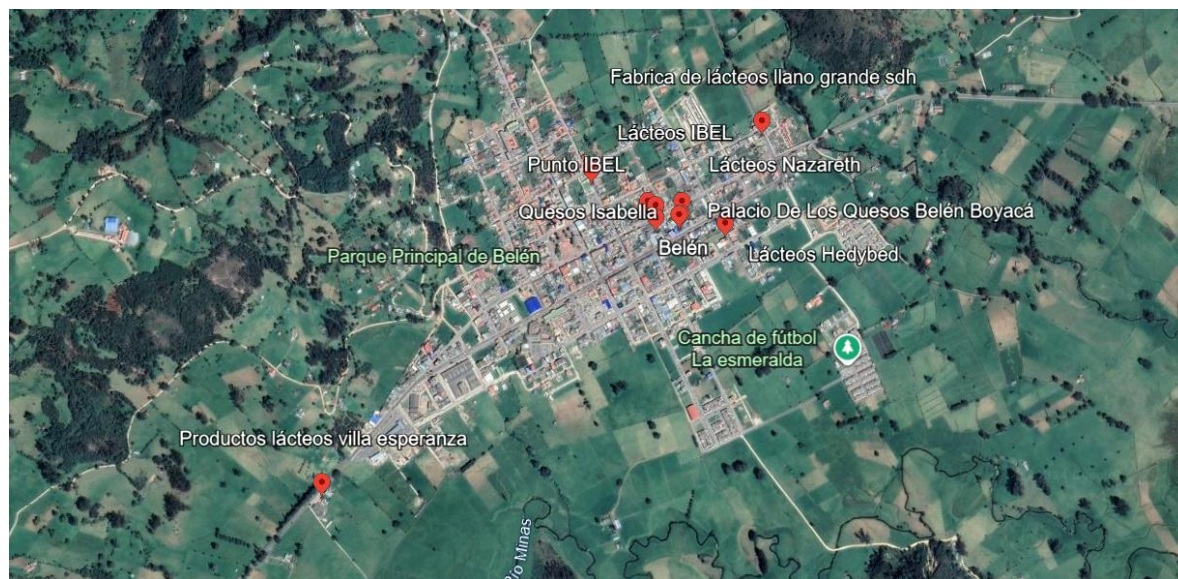
Destino	Cantidad Biogás / mes
Energía La Pastora	108 m ³ /mes
Gas La Pastora	550 m ³ /mes

Fuente. Autores, 2024.

Análisis del Sector

La gran mayoría de empresas lácteas en Belén Boyacá están ubicadas en la parte urbana hacia el centro del municipio, la alta concentración de empresas en el sector da lugar a una generosa producción de lactosuero, usado en gran parte para producir requesón o para el gremio porcícola en la alimentación de cerdos, por el momento ninguna de las empresas ha implementado estrategias para generar energías renovables a partir de lactosuero.

Figura 7. Alta influencia de empresas lácteas en Belén Boyacá



Fuente. Autores, 2024.

TABLA 16. Empresas lácteas del sector y producción diaria.

Nombre de la empresa	Litros leche/día	Litros aproximados suero/día
Lácteos Nazareth	6000	4800
Quesos los llanos	1000	800
Lácteos IBEL	4000	3200
Lácteos la Nevada	6000	4800
Lácteos Belén	3000	2400
Lácteos Hedybed	6000	4800
Quesos Isabella	8000	6400
Lácteos Llano Grande	2000	1600
Lácteos Villa esperanza	5000	4000

Fuente. Autores, 2024.

Análisis de oferta

En Colombia, la producción de biogás se encuentra en una etapa temprana, sin embargo, se han empezado a desarrollar proyectos para la implementación y el crecimiento de las energías renovables, impulsados por la necesidad de diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. El biogás, obtenido a partir de la descomposición anaeróbica de residuos orgánicos como estiércol, residuos agrícolas y desechos industriales, tiene el potencial de convertirse en una fuente clave de energía limpia en el país.

En diversas regiones de Colombia, especialmente en zonas rurales, se han iniciado programas piloto para aprovechar los residuos agroindustriales y ganaderos en la producción de biogás. Esto no solo ayuda a generar energía sostenible, sino que también contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, el manejo adecuado de residuos y la mejora de la calidad de vida en áreas rurales.

Según Velásquez et al, ((2017) en su estudio ‘Estimación del potencial de conversión a Biogás de la biomasa en Colombia’, con los datos de diferentes empresas del sector los departamentos con mayor disponibilidad de biogás son:

- Antioquia
- Cundinamarca
- Valle del Cauca
- Meta
- Santander
- Casanare
- Cesar
- Atlántico
- Bolívar
- Risaralda

- Cauca

De acuerdo con Naturgas, los sectores que impulsan el desarrollo de biogás en Colombia son:

Caña de Azúcar: Líder en bioenergía, utiliza el bagazo de caña para producir etanol y energía. Cuatro ingenios tienen plantas para tratar efluentes, con una capacidad de 7.480 toneladas/día.

Palma de Aceite: Produce biogás a partir de aguas residuales, generando 133 millones de m³/año y 60 MW de electricidad.

Porcicultura: Utiliza biodigestores para procesar residuos orgánicos, generando 600 m³/h de biogás con un 63% de metano.

Avicultura: Tiene menor implementación de biogás, pero algunas plantas generan 0,8 MW con aguas residuales avícolas.

Otras industrias como la cervecera y láctea también están aprovechando la biomasa para generar biogás. Además, se destacan iniciativas como la de Empresas Públicas de Medellín (EPM), que usa biometano para inyectarlo en redes de gas domiciliario. Naturgas destaca el potencial de Colombia en biomasa residual y la necesidad de flexibilizar regulaciones para masificar proyectos de biogás y biometano.

El departamento de Boyacá tiene un gran potencial para aprovechar las energías renovables, especialmente la producción de biogás a partir de desechos agroindustriales y orgánicos. Actualmente, Boyacá ha estado rezagado en comparación con otras regiones del país en cuanto a la adopción de tecnologías sostenibles como el biogás. Sin embargo, esto representa una **gran oportunidad** tanto económica como ambiental.

Diagnóstico de mercado

En el contexto de la implementación de un biodigestor en la empresa de Lácteos La Pastora, este análisis permitirá identificar los factores internos y externos que pueden influir en el éxito del proyecto.

El objetivo principal del análisis FODA es proporcionar una visión integral de las condiciones actuales y futuras que podrían afectar la operación y el desempeño del biodigestor. Al identificar y evaluar las fortalezas y debilidades internas, así como las oportunidades y amenazas externas, se puede desarrollar una estrategia efectiva para maximizar los beneficios y minimizar los riesgos.

En este análisis, se considerarán aspectos técnicos, económicos y ambientales, así como el entorno competitivo en el que operará el biodigestor. Se analizarán factores como la eficiencia en la producción de biogás, los costos de implementación y operación, la demanda de energía renovable, y las políticas gubernamentales relacionadas con proyectos sostenibles.

TABLA 17. Matriz FODA

Fortalezas (F)	Oportunidades (O)
Alta eficiencia en la producción de biogás.	Creciente demanda de energía renovable.
Reducción de residuos y emisiones de GEI.	Incentivos gubernamentales para proyectos sostenibles.
Contribución al desarrollo sostenible.	Potencial para expandir la capacidad de producción.
Debilidades (D)	Amenazas (A)
Costos iniciales elevados.	Fluctuaciones en el precio del biogás en caso de comercialización.
Necesidad de mantenimiento regular.	Competencia con otras fuentes de energía.
Dependencia de la estabilidad del suministro de residuos.	Cambios en las políticas ambientales y energéticas.

Fuente: Autores, 2024

Fortalezas

1. **Alta eficiencia en la producción de biogás:** La implementación del biodigestor permitirá a empresa de Lácteos La Pastora aprovechar eficientemente los residuos de la producción de queso, generando una fuente constante y sostenible de biogás.

2. **Reducción de residuos y emisiones de GEI:** El uso del biodigestor contribuirá significativamente a la reducción de residuos orgánicos y de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), mejorando la huella ambiental de la empresa.
3. **Contribución al desarrollo sostenible:** La adopción de tecnologías de energía renovable como el biodigestor alinea a la empresa de Lácteos La Pastora con prácticas sostenibles, mejorando su reputación y responsabilidad social.

Oportunidades

1. **Creciente demanda de energía renovable:** La demanda de fuentes de energía limpia y sostenible está en aumento, lo que presenta una oportunidad para que la empresa de Lácteos La Pastora comercialice el biogás producido a otras empresas y comunidades locales.
2. **Incentivos gubernamentales para proyectos sostenibles:** Existen incentivos y subsidios gubernamentales disponibles para proyectos de energía renovable, lo que puede reducir los costos iniciales de implementación del biodigestor.
3. **Potencial para expandir la capacidad de producción:** Si el proyecto inicial es exitoso, existe la posibilidad de expandir la capacidad del biodigestor, aumentando la producción de biogás y los beneficios económicos y ambientales asociados.

Debilidades

1. **Costos iniciales elevados:** La instalación del biodigestor requiere una inversión significativa en infraestructura y tecnología, lo que puede representar un desafío financiero para la empresa.
2. **Necesidad de mantenimiento regular:** El biodigestor requiere mantenimiento constante para garantizar su funcionamiento óptimo, lo que implica costos adicionales y la necesidad de personal capacitado.

3. **Dependencia de la estabilidad del suministro de residuos:** La eficiencia del biodigestor depende de un suministro constante y estable de residuos orgánicos, lo que puede verse afectado por variaciones en la producción de queso.

Amenazas

1. **Fluctuaciones en el precio del biogás:** Los precios del biogás pueden ser volátiles y afectar la rentabilidad del proyecto, especialmente si el mercado de energía renovable es competitivo, esto en caso de querer comercializar el biogás en la región.
2. **Competencia con otras fuentes de energía:** Existen otras fuentes de energía renovable y no renovable que pueden competir con el biogás, lo que podría limitar la cuota de mercado de la empresa de Lácteos La Pastora.
3. **Cambios en las políticas ambientales y energéticas:** Las políticas gubernamentales pueden cambiar y afectar los incentivos y regulaciones para proyectos de energía renovable, lo que podría impactar la viabilidad del biodigestor.

8.3.2.2. Análisis financiero

Inversión inicial

Para calcular la inversión inicial del proyecto, se lleva a cabo una estimación de materiales, considerando datos esenciales para su ejecución, como los elementos y herramientas necesarios. Los precios se obtuvieron tomando como referencia el mercado actual y las necesidades específicas de la empresa.

También se tuvo en cuenta el cultivo de activación (estiércol de bovino) rico en microorganismos que proporcionan el microbiota necesario para iniciar el proceso de digestión anaerobia.

Cálculo estimado de la cantidad de estiércol necesaria

Según Bernal et al, (2018) el punto de referencia común es una mezcla de estiércol que representa el 20% y 30% del volumen total del biodigestor para la activación. La densidad del estiércol bovino es de aproximadamente 1000 a 1050 kg/m³ lo que significa que 1 litro de estiércol pesa alrededor de 1 kg.

Se utiliza una relación equivalente a un promedio del 25% para 843 litros de lactosuero necesarios para la producción estimada de energía.

$$\text{Volumen de estiércol} = 843 \text{ litros} \times 0,25 = 210,75 \text{ litros}$$

$$\text{Masa de estiércol} = 210,75 \text{ litros} \times 1 \text{ kg/litro} = 210,75 \text{ kg}$$

TABLA 18. Inversión inicial

Ítem	Material	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	Biodigestor CSTR	Unidad	1	\$8,000,000	\$8,000,000
2	Tanque de 20000 Litros	Litros	1	\$5,200,000	\$5,200,000
3	Tanque de 16000 Litros	Litros	1	\$1,800,000	\$1,800,000
4	Plástico invernadero 8 micras	Metros	18	\$45,000	\$810,000
5	Codo de 65 mm	mm	3	\$4,000	\$12,000
6	Acople 1"	Pulg.	5	\$5,000	\$25,000
7	Acople macho 1"	Pulg.	2	\$6,000	\$12,000
8	Adaptador hembra	mm	4	\$4,000	\$16,000
9	Válvula de regulación de bola galvanizada	Pulg.	4	\$30,000	\$120,000
10	Silicona de alta resistencia (200°C)	Pieza	1	\$20,000	\$20,000
11	Estructura soporte biodigestor	Pieza	1	\$350,000	\$350,000
12	Generador eléctrico de biogás 10 kW	Pieza	1	\$2,000,000	\$2,000,000
13	Adecuación de zona instalación	Pieza	1	\$1,000,000	\$1,000,000
14	Tubo galvanizado ½	Metros	10	\$2,000	\$20,000
15	Manguera de presión	Metros	5	\$40,000	\$200,000
16	Mano de obra excavación	Días	5	\$50,000	\$250,000
17	Energía Auxiliar	kWh	136	\$1,400	\$190,400
18	Cultivo de Activación	Kg	210,75	\$100	\$21,075
19	Operación inicial	Días	15	\$180,000	\$2,700,000
TOTAL					\$22,736,475

*Nota: **Biodigestor CSTR:** Especificaciones y costos de acuerdo con las necesidades de Lácteos La Pastora. **Tanques de 20000 y 16000 Litros:** Utilizados para almacenamiento de lactosuero y otros líquidos. **Plástico**

invernadero 8 micras, codos, acoples, y adaptadores: Materiales necesarios para la instalación y funcionamiento del sistema de biodigestión. **Generador eléctrico de biogás 10 kW:** Equipo para la conversión del biogás en electricidad. **Adecuación de zona instalación:** Costos relacionados con la preparación del sitio para la instalación del biodigestor. **Mano de obra excavación:** Incluye los costos laborales necesarios para la instalación del sistema.

Estrategia de Financiamiento del Proyecto

Para la implementación del proyecto de producción de biogás a partir de lactosuero, la empresa ha decidido utilizar fondos propios como la fuente de financiamiento para la inversión inicial. Esta decisión estratégica permitirá a la empresa mantener un control total sobre el proyecto, evitando así costos adicionales asociados con intereses y comisiones de financiamiento externo. Además, utilizar recursos internos refuerza el compromiso de la empresa con la sostenibilidad y la innovación tecnológica, asegurando que los beneficios económicos y ambientales generados por el proyecto se alineen directamente con los objetivos corporativos. Esta inversión no solo impulsará la eficiencia energética, sino que también fortalecerá la competitividad y la responsabilidad ambiental de la empresa en el mercado.

Índices de Evaluación del Proyecto

Para la evaluación del proyecto, se pueden utilizar uno o varios índices, tales como el Valor Presente Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Periodo de Recuperación del Capital y la Relación Costo-Beneficio. En este estudio, se desarrollará un flujo de caja para calcular el VAN y la TIR del proyecto, lo que permitirá analizar su comportamiento a futuro.

➤ Flujo de caja

Para elaborar este flujo de caja, es fundamental analizar el desempeño de la empresa con el biodigestor en funcionamiento, considerando aspectos clave como la inversión inicial, los ingresos generados y los egresos incurridos. A partir de estos datos, se ha construido un flujo de caja que ofrece una visión clara del comportamiento financiero de la empresa, demostrando que durante los primeros cuatro años es posible recuperar la inversión inicial, lo que evidencia la viabilidad del proyecto a mediano plazo.

- Lista de requerimientos a tener en cuenta

1. Para la elaboración del flujo de caja, fue necesario considerar el IPC del país con el objetivo de proyectar los costos futuros de energía, gas, costos variables y costos fijos. Esto se realizó a través de una revisión del IPC en el Banco de la República desde 1999 hasta 2022, con el fin de estimar los valores futuros. A partir de estos datos, se construyó el flujo de caja considerando los siguientes factores.

TABLA 19. IPC estimados

Años	IPC (2022-2026)
Años 1	11,38%
Año 2	12,43%
Año 3	6,39%
Año 4	0,44%

Fuente: Autores, 2024.

2. Valor (\$) de energía en Kwh/mes: \$1.400.00
3. Valor (\$) de gas en m^3 /mes: \$ 1.518.00
4. El cultivo de activación es estiércol de bovino (230 Kg) necesario para la activación de la digestión anaeróbica
5. Energía auxiliar inicial (136 kWh/mes) requerida para el funcionamiento del biodigestor en sus primeros meses de operación. A partir del segundo mes, el biodigestor será autosuficiente en términos energéticos.
6. Operación del biodigestor: Incluye el mantenimiento, la limpieza y su funcionamiento.

TABLA 20. Flujo de caja

	Años	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4
Ingresos	Cantidad de gas ahorrado (m ³)	5657	6096	6096	6096
	Cantidad de gas ahorrado (\$)	\$9,531,931.86	\$10,364,175.36	\$10,986,025.88	\$11,469,411.02
	Cantidad de energía ahorrada (KWh)	7237,00	7800,00	7800,00	7800,00
	Cantidad de energía ahorrada (\$)	\$7,465,638.00	\$7,652,736.00	\$7,242,768.00	\$7,133,443.20
	Aporte de capital	\$22.736.475,00	0	0	0
	TOTAL, DE INGRESOS	\$16,997,569.86	\$18,016,911.36	\$18,228,793.88	\$18,602,854.22
Egresos	Costos variables				
	Energía auxiliar	\$210,900.00	0	0	0
	Cultivo de activación	\$480,000.00	\$537,600.00	\$508,800.00	\$501,120.00
	Costos fijos				
	Transporte	\$266,400.00	\$298,368.00	\$298,368.00	\$278,121.60
	Operación del biodigestor	\$7,992,000.00	\$8,951,040.00	\$8,471,520.00	\$8,844,266.88
	TOTAL, DE EGRESOS	\$8,949,300.00	\$9,787,008.00	\$9,278,688.00	\$9,623,508.48
	Flujos				
	Flujo del mes	\$8,048,269.86	\$8,229,903.36	\$8,950,105.88	\$8,979,345.74
	Flujo de efectivo neto	\$8,048,269.86	\$8,229,903.36	\$8,950,105.88	\$8,979,345.74

Fuente: Autores, 2024.

➤ **Indicadores financieros**

a) Valor Presente Neto (VPN)

El Valor Presente Neto (VPN) es un método que ayuda a evaluar la viabilidad financiera de un proyecto a largo plazo. Este indicador permite determinar si un proyecto es financieramente viable, proporcionando una idea clara sobre los posibles gastos o pérdidas asociados.

Con el VPN se puede definir la aceptación o el rechazo del proyecto basado en los siguientes criterios evaluativos:

- Si el VPN es < 0 , el proyecto no es aceptable para su ejecución.
- Si el VPN es $= 0$, el proyecto no generará ganancias ni pérdidas, siendo financieramente indiferente.
- Si el VPN es > 0 , el proyecto es aceptable y puede ser ejecutado.

¿Cómo se calcula el Valor Presente Neto?

Ecuación 9. Valor Presente Neto

$$VPN = \sum \left(\frac{F_t}{(1+r)^t} \right) - I_0$$

Donde:

- VPN es el Valor Presente Neto.
- F_t representa los flujos de caja netos en el año t .
- r es la tasa de descuento o tasa de interés (0,15).
- t es el año en el cual se produce el flujo de caja.
- I_0 es la inversión inicial del proyecto.

$$VPN = \frac{\$8.048.269}{(1+0.10)^1} + \frac{\$8.229.903}{(1+0.10)^2} + \frac{\$8.950.105}{(1+0.10)^3} + \frac{\$8.979.345}{(1+0.10)^4} - \$22.736.475$$

Dado que el VPN es $> 0 = \$4,239,065$, el proyecto es financieramente viable y puede ser ejecutado.

b) Retorno sobre la Inversión (ROI)

El Retorno sobre la Inversión (ROI) es un indicador que mide la rentabilidad del proyecto en relación con la inversión inicial. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$ROI = \frac{\text{Ganancia Neta del Proyecto}}{\text{Inversión Inicial}} \times 100$$

Para calcular el ROI, primero debemos determinar la ganancia neta del proyecto:

Ganancia Neta del Proyecto: Es la suma de los flujos de efectivo netos descontados menos la inversión inicial.

$$\text{Ganancia Neta del Proyecto} = \text{Ingresos totales} - \text{Inversión inicial}$$

Los ingresos totales son es \$34.207.624 y la inversión inicial es \$22.736.475,00

$$\text{Ganancia Neta del Proyecto} = \$34.207.624 - \$22.736.475 = 11,471.149$$

Ahora calculamos el ROI:

$$ROI = \frac{\$11,471.149}{\$22.736.475} \times 100 = 50,45\%$$

Un ROI del 50,45% indica que el proyecto generará un retorno del 50,45% sobre la inversión inicial, lo cual es altamente rentable.

c) Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es la tasa de descuento que hace que el Valor Presente Neto (VPN) del proyecto sea igual a cero. Para calcular la TIR, debemos encontrar la tasa r que satisface la siguiente ecuación:

$$VPN = \sum \left(\frac{F_t}{(1+r)^t} \right) - I_0 = 0$$

Donde:

- VPN es el Valor Presente Neto.
- F_t representa los flujos de caja netos en el año t .

- r es la tasa de descuento o tasa de interés.
- t es el año en el cual se produce el flujo de caja.
- I_0 es la inversión inicial del proyecto.

TABLA 21. Datos formulados

Concepto	Valor
f1	\$8,048,269.86
f2	\$8,229,903.36
f3	\$8,950,105.88
f4	\$8,979,345.74
n	4 años
i	10% de Tasa de interés (0.10)
I0	-\$22.736.475,00

Fuente: Autores, 2024

La TIR obtenida será aproximadamente del 19,75%

Una TIR del 19,75% significa que el proyecto de biodigestor en la empresa de Lácteos La Pastora es rentable, ya que la tasa interna de retorno es significativamente mayor que la tasa de descuento del 10% utilizada en el cálculo del VPN. Esto indica que el proyecto es financieramente viable y puede generar rendimientos sustanciales sobre la inversión inicial.

Ahora bien, es crucial destacar que este proyecto tiene la capacidad de transformar un subproducto actualmente subutilizado, como el lactosuero, en una fuente valiosa de energía, en lugar de representar un costo de disposición para la empresa, el lactosuero se convierte en biogás, un recurso energético renovable que puede ser utilizado internamente, lo que reduce significativamente los costos operativos. Esta conversión de un residuo en un activo es un factor clave que impulsa la alta rentabilidad del proyecto, reflejada en la TIR.

Aunado a lo anterior, aquí no solo se optimiza los costos al reducir la dependencia de fuentes de energía tradicionales, sino que también permite a la empresa beneficiarse de los incentivos fiscales y subsidios que el gobierno colombiano ofrece para proyectos sostenibles. Estos incentivos reducen el costo efectivo de la

inversión inicial, aumentando la rentabilidad general. Este contexto de apoyo gubernamental es un factor crucial que justifica una TIR elevada.

El proyecto también contempla la posibilidad de vender el excedente de biogás, generando un flujo de ingresos adicional que no estaba presente en las operaciones habituales de la empresa antes del proyecto. Este nuevo ingreso, junto con la reducción de costos, crea un impacto positivo en los flujos de efectivo netos, contribuyendo aún más a la alta TIR.

Es importante señalar que la tecnología de digestión anaeróbica utilizada en el biodigestor es bien establecida y altamente eficiente, lo que minimiza los riesgos operativos. La materia prima para el biodigestor, el lactosuero, es un subproducto constante y garantizado del proceso de producción de queso, lo que asegura un suministro estable y predecible, reduciendo el riesgo de fluctuaciones en la producción de biogás.

Por último, este planteamiento de biodigestor no solo es financieramente rentable, sino que también genera beneficios significativos en términos de sostenibilidad y responsabilidad social, al reducir la carga de residuos y las emisiones de gases de efecto invernadero, Lácteos La Pastora mejora su perfil de sostenibilidad, lo que puede traducirse en ventajas competitivas y reputacionales a largo plazo.

La TIR del 19,75% es un reflejo directo de la combinación de estos factores: la transformación de un residuo en un recurso valioso, la optimización de costos operativos, el aprovechamiento de incentivos fiscales, la generación de nuevos ingresos, la estabilidad del suministro de materia prima, y el impacto positivo en la sostenibilidad; aunque esta TIR es elevada, está justificada por las características únicas y los beneficios integrales del proyecto, lo que lo convierte en una oportunidad financieramente viable y altamente rentable para Lácteos La Pastora.

9. Impacto Social y Humanístico del Proyecto

La implementación del biodigestor en la empresa de Lácteos La Pastora tendrá un impacto significativo tanto en el ámbito social como en el humanístico, contribuyendo al desarrollo integral de la comunidad y al bienestar de sus habitantes.

Desde un punto de vista social, el proyecto generará nuevas oportunidades de empleo en la región, tanto durante la fase de construcción como en la operación y mantenimiento del sistema. Esto incluye trabajos directos en la planta de biogás y empleos indirectos en sectores relacionados, como la logística y el transporte. Además, la iniciativa contribuirá a mejorar la calidad de vida de los residentes locales al proporcionar una fuente de energía más limpia y económica. Este beneficio se traducirá en una reducción de los costos energéticos para las comunidades y las pequeñas empresas, facilitando el acceso a una energía sostenible y asequible.

El proyecto también fortalecerá el sentido de comunidad y cooperación entre los residentes locales y las empresas, fomentando la colaboración en iniciativas de energía renovable. Asimismo, incluirá programas de educación y capacitación para los trabajadores y la comunidad, promoviendo el conocimiento sobre las energías renovables y la gestión sostenible de residuos. Esto no solo mejorará las habilidades laborales, sino que también sensibilizará a la población sobre la importancia de las prácticas sostenibles.

Además, al transformar los residuos orgánicos en biogás, se reducirá la cantidad de desechos que se envían a los vertederos, disminuyendo así la contaminación del suelo y del agua. Este aspecto tendrá un impacto positivo en la salud pública y en el medio ambiente local, mejorando la calidad de vida de la población.

En el ámbito humanístico, el proyecto de biodigestor en la empresa de Lácteos La Pastora promueve la sostenibilidad al utilizar recursos renovables y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Esta contribución es esencial para la creación de un futuro más sostenible para las generaciones actuales y futuras. Además, fomenta valores ecológicos y de responsabilidad ambiental entre los empleados y la comunidad, inspirando a las personas a adoptar comportamientos más respetuosos con el medio ambiente en su vida diaria.

El proyecto también contribuye al bienestar general de la población al mejorar la gestión de residuos y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Un entorno más limpio y saludable puede tener efectos positivos en la salud física y mental de las personas. Asimismo, la introducción de tecnologías avanzadas para la producción de biogás puede servir como un catalizador para la innovación y el desarrollo tecnológico en la región, inspirando a otras empresas y sectores a explorar soluciones tecnológicas para problemas ambientales y energéticos.

10. Conclusiones

La implementación de un biodigestor en la empresa de Lácteos La Pastora representa una solución innovadora y sostenible para la gestión de residuos orgánicos y la producción de energía renovable. A lo largo de este estudio, se han evaluado diversos aspectos técnicos, económicos y sociales que demuestran la viabilidad y los beneficios potenciales del proyecto.

Primero, el análisis técnico ha demostrado que el biodigestor de tipo CSTR es la opción más adecuada para las necesidades de la empresa de Lácteos La Pastora. Este tipo de biodigestor ofrece alta eficiencia en la producción de biogás, flexibilidad operativa y capacidad para manejar grandes volúmenes de lactosuero. La selección de este biodigestor asegura que la empresa pueda maximizar la producción de biogás y optimizar el uso de recursos disponibles.

En términos económicos, el análisis financiero detallado, incluyendo el cálculo del Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Retorno sobre la Inversión (ROI), ha confirmado la rentabilidad del proyecto. Con un VPN positivo y una TIR significativamente superior a la tasa de descuento, el proyecto es financieramente viable y promete generar rendimientos sustanciales.

El proyecto de biodigestor propuesto está diseñado para reutilizar únicamente la cantidad de suero necesaria para cubrir la demanda energética de la empresa. Esto asegura una operación sostenible, optimizando el uso de los residuos generados sin comprometer la capacidad productiva ni crear excedentes innecesarios. Al mantener un equilibrio entre la generación de biogás y las necesidades energéticas internas, se maximiza la eficiencia operativa y se contribuye a la reducción del impacto ambiental, alineando la estrategia energética de la empresa con principios de sostenibilidad y ahorro energético.

El impacto social y humanístico del proyecto es igualmente significativo. La generación de empleo, la mejora de la calidad de vida, la educación y la capacitación, así como la reducción de la contaminación, son beneficios directos que contribuirán al desarrollo integral de la comunidad. La adopción de tecnologías sostenibles y la promoción de valores ecológicos reforzarán el compromiso de la empresa de Lácteos La Pastora

con la responsabilidad social corporativa, estableciendo un ejemplo positivo para otras empresas y comunidades.

11. Recomendaciones

Implementación Gradual: Se sugiere llevar a cabo la implementación del biodigestor de manera gradual, comenzando con una fase piloto para evaluar su funcionamiento y realizar ajustes necesarios antes de una implementación a gran escala.

Monitoreo Continuo: Es fundamental establecer un sistema de monitoreo continuo para evaluar el rendimiento del biodigestor y la calidad del biogás producido, así como para identificar y mitigar cualquier impacto ambiental negativo que pueda surgir.

Capacitación y Sensibilización: Se recomienda desarrollar programas de capacitación para el personal involucrado en la operación del biodigestor y para la comunidad local, con el fin de fomentar el conocimiento sobre el manejo de residuos y la importancia de las energías renovables.

Evaluación de Impactos: Realizar evaluaciones periódicas de los impactos ambientales y socioeconómicos generados por el proyecto, utilizando metodologías adecuadas para asegurar que se cumplan los objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética.

Búsqueda de Financiamiento: Explorar diversas fuentes de financiamiento, incluyendo subvenciones gubernamentales y asociaciones con organizaciones no gubernamentales, para asegurar la viabilidad económica del proyecto a largo plazo.

Colaboración con la Comunidad: Fomentar la colaboración con la comunidad local y otras partes interesadas para asegurar que el proyecto responda a las necesidades y expectativas de la población, promoviendo así un sentido de pertenencia y apoyo.

Adaptación a Cambios Regulatorios: Mantenerse informado sobre cambios en las políticas ambientales y energéticas que puedan afectar el proyecto, y estar preparado para adaptar las estrategias de operación y financiamiento en consecuencia.

12. Referencias

- Amaral, A. C., Candido, D., Steinmetz, R. L. R., Tapparo, D. C., & Kunz, A. (2019). Produção de biogás e energia elétrica com biodigestor de lagoa coberta e cstr a partir de dejetos suíno. *SIGERA - Simpósio de Internacional de Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais*.
- Anahua, L. C. (2020). Evaluación de estabilizantes en la elaboración de bebidas a partir de lactosuero dulce y dos ecotipos de Tarwi (*Lupinus mutabilis* Sweet). *Universidad Nacional De Juliaca*, 4(1).
- Arias Palma, G., & Moreano Terán, N. (2023). APROVECHAMIENTO DEL LACTOSUERO EN LA INDUSTRIA. @limentech, *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 19(1).
<https://doi.org/10.24054/limentech.v19i1.1409>
- Barrera, J. A. (2020). Diseño y simulación de un biodigestor automatizado para implementación en fincas pecuarias pequeñas. *Repositorio UDISTRITAL*
- Bautista. (2016). Evaluación de la generación de biogas a partir de excretas porcinas en la granja agroinpec y diseño de un biodigestor, 150. Retrieved from 32 <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/14623/1/CD-6793.pdf>
- Bernal Patiño, L. E., & Suárez Ramírez, L. S. (2018). Diseño conceptual de un biodigestor a partir de estiércol vacuno y avícola, producido en la finca El Guarumal, para la obtención de biogás (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).
- Castillo, É., Crisanchó, D. E., Arellano, V., M, É. F. C., Crisanchó, D. E., & A, V. A. (2003). digestión anaerobia de residuos sólidos urbanos A study of operational conditions for anaerobic digestion of solid urban waste. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 5(2).
- Cerón García, I. (2022). Biodigestor doméstico para comunidades rurales y urbanas. *Ciencia y Filosofía*.
<https://doi.org/10.38128/cienciayfilosofa.v7i7.44>

- De Souza Santos, H., Brasil de Araújo de Miranda, S., Francesco de Morais Dias, G., Amelia Lopes Cizenando Guedes Rocha, T., & Ost, A. (2023). Biodigestor de baixo custo na produção de biofertilizantes e de biogás. *Peer Review*, 5(13). <https://doi.org/10.53660/609.prw1711>
- Espinosa Galán, V. E., & Vélez Ramírez, A. (2019). Capítulo 9. Integridad científica y ética aplicada: perspectivas conceptuales y ofertas académicas. *Formación En Ética de La Investigación, Bioética e Integridad Científica En Colombia*.
- FAO, Min Energía, PNUD, & GEF. (2011). Manual del Biogás. Proyecto CHI/00/G32, 120. <https://doi.org/10.1073/pnas.0703993104>
- FAO. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. In *Colección De Documentos Técnicos N°12*.
- Fernández R., C. (2014). Obtención de Biogás e Hidrógeno a partir de lactosuero. *Ipicyt*.
- González, A. (2020). Analisis Prospectivo De La Cadena Lactea Bovina Colombiana. *Minagricultura*, 1(2018).
- Gómez Soto, J. A., & Sánchez Toro, Ó. J. (2022). Producción de galactooligosacáridos: alternativa para el aprovechamiento del lactosuero. Una revisión. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(01). <https://doi.org/10.14482/inde.37.1.637>
- González. (2014). Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia, 22–36. Retrieved from 35 [https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/27048/TFM González Cabrera%2C Ana María - copia.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/27048/TFM_González_Cabrera%2C_Ana_María_-_copia.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Guerra, R. G., González, S. M., Trupiano, A. P., Figueroa, M. E., Seghezzi, L., & Cuevas, C. M. (2000a). Perfiles de actividad metanogénica específica en un reactor UASB utilizado para el tratamiento de líquidos cloacales pre-sedimentados. *Laboratorio de Estudios Ambientales*.

- Guerra, R. G., González, S. M., Trupiano, A. P., Figueroa, M. E., Seghezzi, L., & Cuevas, C. M. (2000b). Perfiles de actividad metanogénica específica en un reactor UASB (reactor anaeróbico de flujo ascendente y manto de lodos) utilizado para el tratamiento de líquidos cloacales Pre-sedimentados. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 4(0329–5184).
- Hernández, R. (2013). Capítulo 17: los métodos mixtos. *Metodología de La Investigación*, 6(Mc Graw-Hill).
- Hernández, F. (2015). Biogás: 10 casos de éxito en el sector industrial: Industrias: curtiembre, láctea, cárnica, golosinas, cervecera, destilería de whisky, vitivinícola, procesamiento de verduras y frutas y papelera. <https://books.google.com.co/books?id=-1tibaaqbaj&lpg=pp1&pg=pa3#v=onepage&q&f=false>
- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2022). Technologies for biogas to electricity conversion. *Energy Reports*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.007>
- López-Barreto, R. E., Becerra-Jiménez, M. L., & Borrás-Sandoval, L. M. (2018). Caracterización físico-química y microbiológica del lactosuero del queso Paipa. *Ciencia y Agricultura*, 15(2). <https://doi.org/10.19053/01228420.v15.n2.2018.8565>
- (M. Sergio. e.t, 2014) Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA's o UASB) Antología. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/M%C3%81RQUEZ%20y%20MART%C3%8DNEZ%202014%20Reactores%20Anaerobios.pdf
- Matovelle Bustos, C. M., & Matovelle Romo, M. M. (2018). Tratamientos biológicos anaerobios de residuos orgánicos como alternativa para la sostenibilidad energética en zonas Andinas - Ecuador. *Killkana Social*, 2(3). https://doi.org/10.26871/killkana_social.v2i3.328
- Mejía Cabezas, N. T., Campoverde Santos, D. K., & Velasco Matveev, L. A. (2021). Estudio comparativo de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de tres tipos de lactosuero (ovino, bovino y caprino) para uso alimentario. *ConcienciaDigital*, 4(3.1). <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v4i3.1.1831>

- Morejón, Y., Moreno, V., & Abril, D. (2022). Energy Potential of the biodigestor Installed in the Santa Barbara Farm, Sumapaz Province, Colombia. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31(3).
- (Mosquera, A., 2021). Procesos biológicos para el tratamiento de lactosuero con producción de biogás e hidrógeno. Revisión bibliográfica. *Revista ION*, 29(1) ,47-62. issn: 0120-100x. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3420/342046466005>
- Muñoz Paredes, J. F., & Vallejo Castillo, V. E. (2023). Aprovechamiento de lactosuero para la elaboración de una bebida láctea fermentada con uchuva. *Investigación e Innovación En Ingenierías*, 11(1).
<https://doi.org/10.17081/invinno.11.1.6214>
- Quille Quille, L., Luque Vilca, O. M., & Aruhuanca Ordoñez, F. P. (2021). Potencialidades del lactosuero generado por la industria quesera y su valorización. *Revista Científica I+D Aswan Science*, 1(2).
<https://doi.org/10.51392/rcidas.v1i2.10>
- Parra, R. (2010). Digestión anaerobia de lactosuero: efecto de altas cargas puntuales. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín*, v. 63, n. 1, p. 5385-5394, June 2010.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S030428472010000100014&lng=en&nrm=iso.
Access on Apr. 2020
- Rosales Colunga, L. M., Razo Flores, E., & De Leon Rodríguez, A. (2006). OBTENCIÓN DE CEPAS DE *Escherichia coli* SOBREPDUCTORAS DE HIDRÓGENO A PARTIR DE LACTOSUERO. *Biochemical Society Transactions*.
- Rosales, L. M. (2014). Obtención De Biogás E Hidrógenon a Partir De Lactosuero. *IPICYT*.
- Solís oba, A., Teniza García, O., Solís-Oba, M. M., & Martínez-Cásares, R. M. (2023). EN PRENSA. Propuesta para el aprovechamiento industrial del lactosuero. EN PRENSA. *Revista Bio Ciencias*, 10.
<https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1392>

- Tobon. (2018). Analisis de los posibles factores que dificultan la implementación de biodigestores tipo tubular y cupula flotante en las zonas rurales y urbanas de la región norte de Colombia. *New England Journal of Medicine*, 372(2), 2499– 2508. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7556065><http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC394507><http://dx.doi.org/10.1016/j.hump>
- Vanegas-Padilla, A. P., Morales-Miranda, I. J., Vega-Ochoa, M. A., Ortega-Sinning, E. R., & Vanegas-Padilla, D. L. (2023). Evaluación de la producción de biogas, a partir de un biodigestor utilizando residuos orgánicos y aguas residuales generadas en la central de abastos de Valledupar. *Revista Politécnica*, 19(37). <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v19n37a1>
- Veiga Barbazán, M. del C. (2015). Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB). *Universidad de Coruña*.
- Williams Zambrano, M. B., & Dueñas Rivadeneira, A. A. (2021). Alternativas para el aprovechamiento del lactosuero: Antecedentes investigativos y usos tradicionales. *La Técnica: Revista de Las Agrociencias*. ISSN 2477-8982, 26. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i26.3490

