

PREFACTIBILIDAD DE UNA LÍNEA DE NEGOCIO DE BIODIGESTORES PARA
BENEFICIAR EL SECTOR AGRÍCOLA COLOMBIANO

JUAN ESTEBAN MENDOZA RODRÍGUEZ
SOFIA VILLA MEJÍA

Proyecto Integral de Grado para optar al título de
INGENIERO INDUSTRIAL

Director:
JAIME ROLDÁN PARRA
Ingeniero de Alimentos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA INDUSTRIAL
BOGOTÁ D.C.

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Nombre
Firma del Presidente Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Bogotá, D.C. octubre 2023

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. Mario Posada García- Peña.

Vicerrectora Académica y de Investigaciones.

Dra. Alexandra Mejía Guzmán.

Vicerrector Administrativo y Financiero.

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro.

Secretario General.

Dr. José Luis Macías Rodríguez.

Decana de la Facultad de Ingenierías.

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto.

Directora del Programa de Ingeniería Industrial.

Ing. Mónica Yinette Suárez Serrano.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Este trabajo también es un tributo a todas las personas que, de alguna manera, han sido parte de mi recorrido. Cada experiencia vivida, cada palabra de aliento y cada gesto de apoyo han dejado una marca en mi corazón y han contribuido a hacer de mí la persona que soy hoy.

A todos aquellos que me han inspirado, enseñado y acompañado, va mi más profundo agradecimiento. Sin ustedes, este camino habría sido más difícil de recorrer. Su presencia en mi vida ha sido un regalo invaluable.

Juan Esteban Mendoza Rodríguez

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mis padres, Paula Mejía y Jorge Villa, quienes se han esforzado para que esto sea posible y me han acompañado y apoyado en cada paso que he dado y he querido dar. Gracias por ser tan comprensivos y por confiar en mí.

A Juanes, mi compañero de tesis, universidad y vida. Gracias por convertir este último año de esta etapa en algo tan memorable y significativo.

A todos mis amigos y profesores que me acompañaron en este proceso de crecimiento profesional y personal.

Sofia Villa Mejía

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro más sincero agradecimiento al director de nuestro semillero de investigación, Gustavo Andrés Salas, y al director de nuestro proyecto de grado, Jaime Roldán. Su paciencia, dedicación y colaboración en el desarrollo de este proyecto han sido invaluable. Sus conocimientos compartidos, apoyo incondicional y papel fundamental en nuestro crecimiento profesional son dignos de reconocimiento y gratitud.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	18
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1. Proceso de producción del biogás	19
1.2. Componentes del biodigestor	19
1.2.1. Cámara de Carga	19
1.2.2. Cámara de Digestión	20
1.2.3. Conducto de Carga	20
1.2.4. Conducto de Descarga	20
1.2.5. Agitador	20
1.3. Estudio de mercado	21
1.4. Fuentes No Convencionales De Energía	22
1.5. Modelo financiero	22
1.6. Rentabilidad	23
2. ESTUDIO DE MERCADO	24
2.1. Producto	24
2.2. Demanda	24
2.2.1. Definición del mercado	24
2.3. Demanda Potencial	33
2.3.1. Demanda potencial de Biogás	33
2.3.2. Demanda potencial de biogás en Zonas No Interconectadas	35
2.3.3. Demanda potencial de estiércol	38
2.3.4. Demanda potencial de biogás en la agricultura	38
2.4. Aliados Estratégicos – Oferta	39
2.4.1. Oferta de Biogás	40

2.4.2.	<i>Oferta de Abono</i>	41
3.	ESTUDIO TÉCNICO	42
3.1.	Materia prima requerida	42
3.1.1.	<i>Materia orgánica</i>	42
3.1.2.	<i>Nutrientes</i>	42
3.1.3.	<i>Agua</i>	42
3.1.4.	<i>Materiales fibrosos</i>	43
3.2.	Productos y subproductos	43
3.2.1.	<i>Biogás</i>	43
3.2.2.	<i>Tratamiento y purificación del biogás</i>	44
3.2.3.	<i>Biosol</i>	46
3.2.4.	<i>Biol</i>	47
3.3.	Factores determinantes en el proceso de producción	47
3.3.1.	<i>Temperatura</i>	47
3.3.2.	<i>Concentración de Iones Hidronio pH</i>	48
3.3.3.	<i>Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)</i>	49
3.3.4.	<i>Sólidos Totales</i>	49
3.3.5.	<i>Relación C/N</i>	50
3.3.6.	<i>Nutrientes</i>	50
3.3.7.	<i>Humedad</i>	51
3.4.	Caracterización de los tipos de biodigestores en el mercado	51
3.4.1.	<i>Biodigestor de tapa fija o de tipo chino</i>	52
3.4.2.	<i>Biodigestor de campana flotante o de tipo hindú</i>	54
3.4.3.	<i>Biodigestor tipo Taiwanés o tubular</i>	55
3.5.	Matriz de comparación y selección de biodigestor	57
3.5.1.	<i>Estimación del volumen del biodigestor</i>	59
4.	ESTUDIO FINANCIERO	66
4.1.	Evolución de los precios al consumidor (IPC)	66

4.2.	Evolución de los precios al productor (IPP)	67
4.3.	Comportamiento de las tarifas reguladas de gas natural	67
4.4.	Estimación del CAPEX	69
4.5.	Estimación del OPEX	71
4.6.	Beneficios tributarios aplicados	72
4.7.	Flujo de Caja	73
5.	CONCLUSIONES	78
	GLOSARIO	80
	BIBLIOGRAFÍA	83
	ANEXOS	90

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Balance OFERTA VS. DEMANDA de Gas Natural en Colombia.	14
Figura 2. Red de gasoductos troncales en el país.	16
Figura 3. Distribución de la cría de cerdo en Colombia	27
Figura 4. Distribución de las empresas encargadas de la cría de cerdo en Colombia	28
Figura 5. Distribución de las principales empresas porcícolas por departamento	30
Figura 6. Participación de los comercializadores de gas natural en el mercado	32
Figura 7. Proyección demanda gas natural por zonas	33
Figura 8. Distribución de las principales empresas porcícolas por departamento	34
Figura 9. Nivel de suministro de gas natural por departamentos	36
Figura 10. Procesos de tratamiento del biogás	44
Figura 11. Eliminación del H ₂ S mediante la aplicación de carbón activado haciendo uso de un agente catalizador de yoduro de potasio	46
Figura 12. Biodigestor de tapa fija	53
Figura 13. Biodigestor de campana flotante	54
Figura 14. Biodigestor tubular	56
Figura 15. Tipos de biodigestores	58
Figura 16. Plot plan montaje de biodigestor tubular	63
Figura 17. Plot plan montaje de biodigestor de tapa fija	64
Figura 18. Plot plan montaje de biodigestor de campana flotante	65
Figura 19. Beneficios tributarios ley 1715 de 2014	73
Figura 20. Comparación del flujo de caja de los biodigestores	77

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Consumo de carne de cerdo por habitante	26
Tabla 2. Principales empresas en la cría de cerdos	29
Tabla 3. Consumos de biogás promedio para diferentes equipos	37
Tabla 4. Cantidad de abono según cultivo	39
Tabla 5. Matriz comparativa de biodigestores	58
Tabla 6. Volumen de estiércol	60
Tabla 7. Volumen de biodigestor	60
Tabla 8. Cantidad de biogás	61
Tabla 9. Cantidad de metano	61
Tabla 10. Biofertilizante líquido y seco	62
Tabla 11. Proyección de componentes de tarifas de uso térmico gas natural	68
Tabla 12. Estimación de Capex para cada biodigestor	70
Tabla 13. Costos de mantenimiento por la vida útil del biodigestor	71
Tabla 14. Beneficios tributarios por la ley 1715 de 2014 para cada Biodigestor	73
Tabla 15. Valores mínimos de rentabilidad del proyecto de biodigestor	74
Tabla 16. Flujo de caja - Biodigestor Tubular	75
Tabla 17. Flujo de caja - Biodigestor de Campana Flotante	75
Tabla 18. Flujo de caja - Biodigestor de Tapa Fija	75
Tabla 19. Comparación de indicadores financieros de los biodigestores	76

RESUMEN

El presente trabajo aborda el complejo desafío del suministro de gas natural en Colombia, que proyecta un futuro déficit de suministro en los próximos diez años debido a la declinación de los campos de gas en el país. Esta situación enfatiza la apremiante necesidad de fortalecer la oferta de este recurso energético y asegurar la sostenibilidad del sector a largo plazo. El estudio se basa en datos confiables provenientes de fuentes como el Ministerio de Minas y Energía y la UPME, y se centra en examinar el crecimiento del sector industrial. Se exploran los desafíos enfrentados en las zonas no interconectadas y se destaca la importancia de los biodigestores como una alternativa sostenible para abordar el déficit de gas natural. La estructura de la tesis se organiza en tres capítulos que profundizan en el análisis del mercado, la exploración de los biodigestores y la evaluación de la viabilidad financiera de estos proyectos, con el propósito de evidenciar el potencial de Colombia en el ámbito del desarrollo energético.

PALABRAS CLAVE: Gas Natural, Biol, Biosol, Biodigestor, Zonas no Interconectadas, Déficit de Suministro, Energía Renovable.

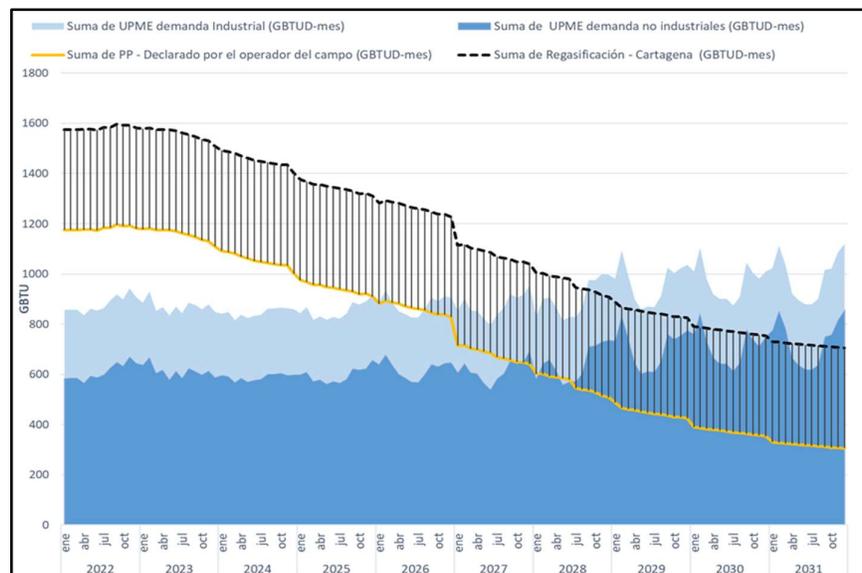
INTRODUCCIÓN

El Balance de Oferta y Demanda de Gas Natural, presentado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), pone de manifiesto un futuro déficit de suministro para los próximos diez (10) años en Colombia. Esta situación se ve agravada por la declinación de los grandes campos de gas del país, lo que resalta la urgente necesidad de incrementar la oferta de este recurso energético y asegurar la sostenibilidad a largo plazo del sector.

Los datos y gráficos que acompañan este diagnóstico fueron obtenidos de fuentes confiables como el Ministerio de Minas y Energía (MME), la UPME y XM S. A. E. P. S. Con base en esta información, se realiza un análisis para comprender la situación actual y las proyecciones futuras.

Figura 1.

Balance OFERTA VS. DEMANDA de Gas Natural en Colombia



Nota. Se ilustran el Balance de Oferta y Demanda de Gas Natural, presentado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) del 2022-2031. Tomado de: Proyecciones de demanda.

Disponible en: <https://n9.cl/qhbxq>

El análisis revela que el sector industrial experimenta un crecimiento promedio anual del 0,2% durante el período de proyección (2022-2031). Este sector muestra variaciones, con picos de demanda alcanzando los 275 GBTUD y momentos de menor demanda de alrededor de 261 GBTUD, mientras que el promedio durante el horizonte temporal es de 267 GBTUD.

El país ha implementado una solución con la presencia de una Planta de Regasificación ubicada en el Puerto de El Cayao, Cartagena de Indias. Esta planta, conocida como FSRU (Unidad Flotante de Almacenamiento y Regasificación), tiene una capacidad de 400 GBTUD y está destinada a abastecer a las plantas termoeléctricas Termobarranquilla 3 y 4, Termocandelaria 1 y 2, Termoflores 1, Termoflores 4 y TEBSA. Sin embargo, aún en estas condiciones teóricas, se proyecta que habrá un déficit de gas local en enero de 2026 [1].

Sin embargo, aún en estas condiciones teóricas, se proyecta que habrá un déficit de gas local en enero de 2026. Para afrontar esta situación, el Gobierno actual busca garantizar el abastecimiento pleno de la demanda. Sin embargo, el potencial de Producción (PP) señala que la declinación de los principales campos de producción del país (La Guajira y Cusiana), junto con la Planta de Regasificación en Cartagena de Indias de capacidad 400 GBTUD, no es suficiente para sustentar la demanda en los próximos diez (10) años.

En un esfuerzo por solucionar este problema, la UPME ha lanzado una convocatoria para licitar nuevamente el proyecto de la planta de regasificación del Pacífico [2]. De concretarse, esta planta aportaría otros 400 GBTUD a partir del año 2028. Con esta adición, se espera que los comercializadores que atienden a usuarios finales, así como los usuarios no regulados que participan directamente en el mercado, puedan contar con contratos de servicios de regasificación a partir del 1 de diciembre de cada año.

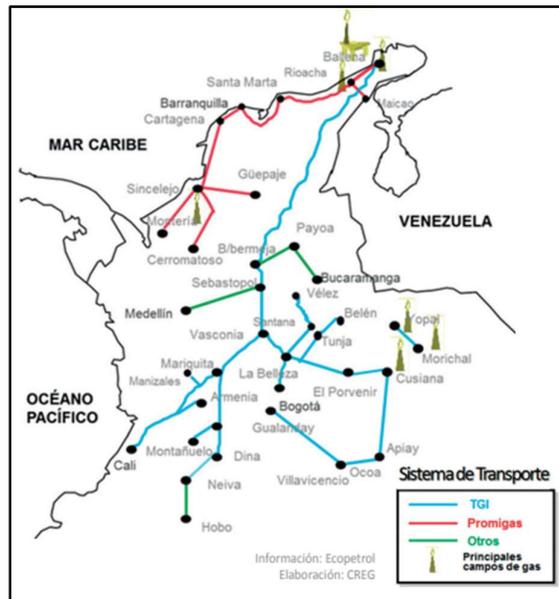
El gobierno propone otorgar tanto a los agentes como a los usuarios no regulados la libertad de elegir la fuente de suministro de gas que mejor se ajuste a sus intereses, promoviendo así la flexibilidad en el mercado [1]. De no lograrse esta flexibilidad, las consecuencias podrían ser devastadoras para la industria colombiana. El aumento de los costos de producción debido a la escasez de este recurso energético podría reducir la competitividad de las empresas en el mercado global y afectar negativamente su capacidad de producción. Además, existe el riesgo significativo de interrupción del suministro energético y la posibilidad de cierres temporales o permanentes de empresas.

Otro problema en la infraestructura del mercado energético actual en Colombia, es la división en dos categorías: zonas interconectadas (ZI) y zonas no interconectadas (ZNI) [3]. Las zonas interconectadas cuentan con acceso al servicio de gas a través de los principales gasoductos nacionales. En contraste, las zonas no interconectadas se ubican en regiones remotas y de difícil acceso, alejadas de los centros urbanos. La infraestructura física es escasa, y la falta de vías de acceso adecuadas representa un desafío adicional. Los servicios públicos son limitados y distantes entre sí, lo que dificulta el acceso a servicios básicos como energía, suministro de agua

y saneamiento. En estas áreas, las comunidades e industrias enfrentan dificultades para acceder a servicios esenciales como educación, atención médica, agua potable y comunicaciones. La Figura 2 muestra claramente todas las zonas que se encuentran distantes de la red de abastecimiento:

Figura 2.

Red de gasoductos troncales en el país



Nota. La figura muestra el sistema de distribución de gas natural de Colombia. Fuente: UPME, “Infraestructura de distribución de gas natural”, Unidad de Planeación minero energética. Tomado de: Planta de Regasificación en el Pacífico Colombiano. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/Paginas/Planta-Regasificacion-pacifico-Colombiano.aspx>.

Según los hallazgos de la Asociación Colombiana de Gas Natural (Naturgas), la falta de acceso al gas natural en Colombia se concentra en 363 municipios distribuidos en 27 departamentos del país, y la inversión requerida para llevar el suministro a estas zonas es considerablemente alta [4].

Del total de las zonas mencionadas anteriormente, el 94% se considera rural y alberga al 32% de la población, concentrándose principalmente en actividades ganaderas [5]. Lamentablemente, los desechos orgánicos de estos animales no son aprovechados debido al desconocimiento de los empresarios y pobladores, quienes no comprenden su alto potencial como fuente de energía. En este contexto, los biodigestores se presentan como una solución prometedora para abordar el déficit de gas natural en Colombia.

Los biodigestores, clasificados como una Fuente No Convencional de Energía Renovable, transforman los desechos orgánicos, como el estiércol y los residuos agrícolas, en biogás, ofreciendo una fuente de energía limpia y renovable que puede reemplazar parcialmente al gas natural en diversas aplicaciones industriales y comerciales. Esta alternativa no solo reduce la dependencia de los combustibles fósiles y disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también mejora el manejo de residuos y promueve el desarrollo económico en áreas rurales y agrícolas.

Es importante mencionar que, el estiércol utilizado para alimentar el biodigestor proviene de las fincas agropecuarias, y su gestión inadecuada representa una fuente significativa de contaminación y riesgo para la salud humana debido a la proliferación de vectores de enfermedades. Asimismo, el uso directo del estiércol fresco o seco como fertilizante no es recomendable, ya que requiere un proceso de descomposición antes de que las plantas puedan aprovechar sus nutrientes.

Enfocándose en este tipo de proyectos, el análisis de este documento se centrará únicamente en la ganadería porcina. Esto se debe a que suele llevarse a cabo en corrales organizados y limpios, con canales diseñados especialmente para la evacuación de materia fecal. En comparación, otros tipos de animales como vacas o aves suelen criarse en grandes pastizales o corrales más extensos, lo que complica el mantenimiento y control de la materia fecal. En ese sentido, se abordan tres capítulos fundamentales. En primer lugar, se realiza un estudio de mercado que identifica: las regiones del país con mayor población agrícola Porcina, las iniciativas existentes relacionadas con los biodigestores a nivel nacional, las principales empresas para proponerles el proyecto, los competidores relevantes y posibles alianzas estratégicas para entrar al mercado. En segundo lugar, se describen los biodigestores potenciales que podrían contribuir a esta solución, enfocándose en sus necesidades y características técnicas.

Finalmente, se presenta un análisis financiero general para evaluar la viabilidad de invertir en proyectos de este tipo. El objetivo es mostrar a empresas e inversionistas nacionales e internacionales el potencial de Colombia para convertirse en un referente mundial en el desarrollo energético, mediante la implementación de sistemas de biodigestión como una solución sostenible y eficiente. Estos no solo abordan la escasez de gas natural y las zonas no interconectadas, sino que también contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector agrícola.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio de prefactibilidad de una nueva línea de negocio de biodigestores, para beneficiar el sector agrícola, por medio de un estudio de mercado, técnico, legal y financiero.

OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Elaborar un estudio del mercado potencial para biodigestores, basado en información pública disponible, para determinar las capacidades actuales y potenciales del sector.
- Identificar los tipos de biodigestores más relevantes en el mercado, a través de revisión bibliográfica, para determinar cuáles harán parte de la propuesta.
- Describir los incentivos tributarios y la normativa aplicada a los proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), teniendo en cuenta la información proporcionada por las entidades encargadas, con el fin de determinar la viabilidad legal del proyecto.
- Evaluar la rentabilidad de los biodigestores, a partir de variables macroeconómicas y de esta forma identificar la viabilidad financiera del proyecto.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Proceso de producción del biogás

La metanogénesis y, por lo tanto, la producción de biogás dentro de los biodigestores se produce en muchos entornos naturales, como pantanos, marismas, sedimentos de agua, suelos húmedos y, por supuesto, en el sistema digestivo de muchos animales. La producción de biogás provoca la descomposición de la materia orgánica sin oxígeno, a una determinada temperatura, pH, humedad y tiempos de descomposición. La digestión anaeróbica se compone de cuatro fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. La hidrólisis es el primer paso para descomponer la materia orgánica de moléculas complejas como proteínas, carbohidratos y lípidos en compuestos más pequeños y simples como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos. Los compuestos solubles producidos por esta hidrólisis se metabolizan a dióxido de carbono (CO_2), hidrógeno (H_2) y otros ácidos de cadena corta (ácidos grasos volátiles) durante la acidogénesis. Estos ácidos de cadena corta se convierten en ácido acético en un tercer paso llamado acetogénesis. Finalmente, en el proceso de metanogénesis, las bacterias metanogénicas transforman el ácido acético en metano (CH_4), hidrógeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2), completando el proceso de digestión. Las bacterias que realizan cada paso descrito se organizan en el denominado consorcio bacteriano. En este consorcio, diferentes poblaciones bacterianas hacen su trabajo en diferentes momentos y bajo diferentes condiciones operativas. Los consorcios bacterianos son muy diversos y complejos y varían entre los digestores y las condiciones de operación, lo que hace que la selección de un grupo específico de bacterias no tenga sentido. En los consorcios, es importante que las bacterias en ellos se auto seleccionen y autorregulen de forma natural y dependiendo de las condiciones dentro del biodigestor, como temperatura, pH, humedad y materia orgánica entrante. condiciones de trabajo [6].

1.2. Componentes del biodigestor

1.2.1. *Cámara de Carga*

Simplifica la incorporación del material orgánico en el biodigestor al combinarlo con la cantidad de agua, que puede estar caliente si es necesario. Esta mezcla con agua también logra homogeneizar el material orgánico y reducir su concentración, facilitando su flujo hacia el interior del equipo seleccionado.[7].

1.2.2. Cámara de Digestión

Es el componente central del biodigestor anaeróbico, asegurando que el material orgánico permanezca por el tiempo requerido en una ausencia total de oxígeno. Este proceso, dependiendo del diseño y la temperatura de operación, promueve la conversión del material en biogás. Es aconsejable incluir mecanismos de agitación en esta sección para mejorar la interacción entre el sustrato que se introduce y las bacterias presentes en el interior del biodigestor [7].

1.2.3. Conducto de Carga

Comunica la cámara de carga con la de digestión, lo que permite la circulación del material ya preparado, que generalmente ingresa por acción de la gravedad, al estar ubicada la cámara de carga sobre el nivel de líquido en el digestor. En el caso de biodigestores de gran tamaño, este conducto de carga puede estar bajo presión, utilizando una bomba para introducir la mezcla en suspensión de sólidos a digerir [7].

1.2.4. Conducto de Descarga

Facilita la extracción de material estabilizado, que ha completado su tiempo de residencia en el biodigestor y se acumula en el fondo. La ubicación del extremo superior del tubo de descarga a una altura en relación con el nivel del terreno permite que el residuo salga mediante el principio de los vasos comunicantes. De esta manera, al ingresar una cantidad específica de mezcla de alimentación para la digestión, se evaluará automáticamente un volumen equivalente de mezcla de residuos ya digeridos. Para sistemas de mayor envergadura, es posible instalar una bomba centrífuga sumergible de tipo "cloacal" o "estercolero" en este conducto de descarga, lo cual habilita el bombeo de la suspensión en la cantidad diaria necesaria [7].

1.2.5. Agitador

Este dispositivo se construye mediante la instalación de un "caño camisa" en la cámara de digestión, dispuesto de forma inclinada y unido de manera que evite cualquier fuga de líquido hacia el exterior. Asimismo, debe sobresalir por encima del nivel de descarga del líquido. Dentro de este caño se coloca un "eje" en el cual se ajusta una paleta mezcladora. El impulsor puede adoptar la forma de una paleta plana que se acciona mediante un movimiento angular, o bien tener una configuración de hélice que gira sobre su propio eje. El movimiento se logra mediante una manija ubicada en el exterior, y su accionamiento es manual, ya que basta con una agitación suave para lograr su cometido; esta agitación también ayuda en la liberación de

las burbujas de biogás [7].

1.3. Estudio de mercado

La investigación de mercado implica la recopilación y análisis de información previa que ayuda a evaluar si es viable o no ofrecer un producto o servicio para satisfacer una demanda, además, es conveniente tener una noción amplia del mercado incluyendo todo el entorno que rodeará a la empresa: consumidores, usuarios, proveedores, competidores y limitaciones de tipo político, legal, económico o social [8].

La investigación de mercado abarca el estudio de algunas variables sociales y económicas que condicionan el proyecto, aunque sean ajenas a éste. Algunos de estos factores incluyen la urgencia de la necesidad y el volumen de la demanda del servicio a ser proporcionado; así como el impacto que estos elementos tienen en los precios. El propósito de este tipo de investigación es ayudar a la toma de decisiones de una empresa que desea regenerar su servicio, lanzar un nuevo servicio o visualizar el estado actual del mismo en el mercado; para su elaboración se deben seguir los siguientes pasos: definir los objetivos de la investigación, analizar la oferta y las condiciones de la competencia, determinar la demanda insatisfecha, desarrollar las estrategias de mercado, interpretar e informar los resultados [8].

En cuanto a la oferta y la demanda, son las fuerzas que hacen que las economías de mercado o capitalistas funcionen. La dinámica de la oferta y la demanda establece tanto la producción de bienes como los precios a los que deben ser comercializados. Este proceso se lleva a cabo en los diversos ámbitos sociales donde se efectúa el intercambio de bienes, servicios y factores de producción, conocidos como mercados. Aquí, compradores y vendedores negocian los precios de los bienes y servicios. Una vez acordado, se procede al intercambio, donde cantidades específicas de productos se intercambian por una suma de dinero determinada. Los precios juegan un papel crucial en la coordinación de las decisiones de los productores y consumidores en el mercado, ya que precios más bajos impulsan el consumo pero pueden desalentar la producción, mientras que precios más altos tienden a reducir el consumo pero estimulan la producción. En resumen, los precios funcionan como el mecanismo que equilibra el mercado. Fijando precios para todos los bienes, el mercado permite la coordinación de compradores y vendedores y, por tanto, asegura la viabilidad de un sistema de economía de mercado [9].

1.4. Fuentes No Convencionales De Energía

El uso de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) se ha visto impulsado, principalmente, por los países desarrollados, que son los principales emisores de gases de efecto invernadero (GEI). Esta iniciativa se vincula con otros objetivos como la disminución de la dependencia de fuentes externas, especialmente en vista de la inestabilidad geopolítica en varias regiones, y el fomento del desarrollo económico a través de la industria de equipos y servicios relacionados con las FNCE, siempre y cuando exista un potencial de demanda que lo respalde [10].

La Ley 1715 de 2014 definió las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) como aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, sin embargo, en el país, estos recursos no son ampliamente empleados o se utilizan de manera periférica, sin una difusión significativa en el mercado. Se consideran FNCER la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos (PCH), la eólica, la geotérmica, la solar y los mares. Además, la Ley de Transición Energética estableció como FNCE a otras fuentes como el hidrógeno verde y el hidrógeno azul [11].

Se establece como FNCER el contenido energético de los residuos sólidos que no sean susceptibles de reutilización y reciclaje. Es considerado como FNCER el contenido energético tanto de la fracción biodegradable, como de la fracción de combustible de los residuos de biomasa [11].

1.5. Modelo financiero

El término "modelo financiero" tuvo su génesis en la década de los años 30, como respuesta a la crisis financiera conocida como "La Gran Depresión". Esta crisis impactó significativamente a numerosos países, desencadenando un severo deterioro económico a nivel global. Aunque los países iniciaron su recuperación de manera gradual, los efectos de esta crisis perduraron hasta el inicio de la Segunda Guerra Mundial. En la década de los 60, el modelo financiero comenzó a experimentar un notable crecimiento, particularmente en países en desarrollo como Estados Unidos y el Reino Unido [12].

El propósito del modelo financiero es evaluar la empresa y analizar la rentabilidad de sus unidades de negocio con el fin de tomar decisiones que les resulten beneficiosas. También cumple con la función de verificar la fiabilidad de los resultados obtenidos. Por lo tanto, juega un papel crucial en la determinación de la viabilidad económica de un proyecto, al proporcionar

una comprensión detallada de las necesidades de financiamiento a largo plazo de la empresa. Para lograr esto, es esencial llevar a cabo un análisis exhaustivo de aspectos como precios, proveedores, cuentas por cobrar, inventarios, entre otros, que contribuyan a ofrecer un servicio de alta calidad [12].

1.6. Rentabilidad

Estos indicadores referentes a rentabilidad evalúan las utilidades obtenidas respecto a la inversión o, en otras palabras, la capacidad de generar ganancias a partir de una inversión inicial. Existen dos enfoques para medir la rentabilidad: métodos sencillos y métodos más elaborados. Los métodos simples se apoyan en los estados financieros, sin tener en cuenta el valor del dinero en el tiempo. Y los segundos sí consideran el valor del dinero en el tiempo, y tienen mayor aceptación en la iniciativa privada. Entre los métodos complejos de rentabilidad se encuentran los siguientes indicadores: Valor Actual (VA), Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRIN) [14].

2. ESTUDIO DE MERCADO

2.1. Producto

Se llevará a cabo una comparación entre tres (3) tipos de biodigestores: el biodigestor tubular de origen taiwanés, el biodigestor de campana flotante de origen hindú y el biodigestor de tapa fija de origen chino, con el objetivo de analizar exhaustivamente sus características, eficiencia y ventajas. Se busca determinar cuál de estos biodigestores es más adecuado para la generación de biogás y su aplicabilidad en el contexto de las fincas colombianas.

El biodigestor tubular, de origen taiwanés, destaca por su hermeticidad y funcionamiento anaeróbico, lo que garantiza una alta eficiencia en la producción de biogás. Su diseño compacto y fácil instalación lo convierten en una opción atractiva para su implementación en fincas porcícolas de tamaño pequeño y mediano.

Por otro lado, el biodigestor de campana flotante, de origen hindú, emplea una campana flotante para capturar y almacenar el biogás generado. Este sistema presenta características específicas que lo hacen único en su funcionamiento y podría ofrecer ventajas en ciertos contextos.

Finalmente, el biodigestor de tapa fija, de origen chino, utiliza una tapa hermética para contener el biogás producido. Su diseño y modo de operación pueden proporcionar beneficios particulares en términos de facilidad de manejo y mantenimiento.

El objetivo es exponer a empresas e inversores, tanto a nivel nacional como internacional, el destacado potencial de Colombia para posicionarse como líder global en el ámbito del desarrollo energético. Esto se enfoca especialmente en resaltar las posibilidades que ofrece la implementación de sistemas de biodigestión como soluciones sostenibles y eficientes. Estas perspectivas están respaldadas por un sólido conocimiento de los aspectos más cruciales del mercado, que sirve como base fundamental en caso de considerar inversiones en proyectos de esta naturaleza.

2.2. Demanda

2.2.1. Definición del mercado

Colombia se enfrenta a un desafío significativo en el suministro de gas natural, con proyecciones de déficit para los próximos diez años debido a la declinación de los grandes campos de gas del país. Esta situación genera preocupación en el sector industrial y pone de relieve la urgente necesidad de incrementar la oferta de energía para garantizar la sostenibilidad

a largo plazo. En este contexto, los proyectos de biodigestores y el uso de biogás se presentan como una solución prometedora para abordar la escasez de gas natural y fomentar un enfoque más sostenible y renovable en la producción de energía.

El mercado objetivo para el desarrollo de proyectos de biodigestores y biogás se enfoca principalmente en las fincas porcícolas. Estas fincas son especialmente atractivas para la implementación de biodigestores debido a la gran cantidad de desechos orgánicos que generan. Cada cerdo produce aproximadamente entre 60 y 105 kg de estiércol al mes, lo que resulta en una importante cantidad de residuos diarios en estas fincas [15].

El diseño de los corrales en los que los cerdos viven durante todas las etapas de su vida facilita la limpieza y el manejo de los desechos. Muchos de estos corrales cuentan con desagües que podrían conectarse a ductos para llevar los residuos directamente a los biodigestores. Esta ventaja no se presenta con otros tipos de animales, como las vacas o aves, cuya recolección de excremento puede ser una tarea más complicada debido a que se encuentran en pastizales o corrales más extensos y llenos de cascarilla.

La acumulación de desechos en las fincas porcícolas representa un desafío ambiental en términos de manejo adecuado y la prevención de la contaminación del suelo y las fuentes hídricas. Por lo tanto, implementar biodigestores en estas fincas permitiría una gestión más eficiente y sostenible de los residuos, transformando el estiércol en biogás y reduciendo así su impacto ambiental.

En términos más amplios, el mercado objetivo también incluye a las empresas e inversionistas interesados en invertir en proyectos de energías renovables y sostenibles. Un ejemplo relevante se encuentra en la península de Yucatán, México [16], donde la crianza excesiva de cerdos ha generado problemas de contaminación del suelo y las fuentes hídricas debido a la acumulación de desechos.

2.2.1.a. Mercado real en producción porcícola. El notable crecimiento del consumo per cápita de carne de cerdo en Colombia, registrado desde el año 2010 hasta 2022, refleja una creciente preferencia y demanda de este tipo de carne en la dieta de los colombianos.

Durante este período, el consumo ha experimentado un incremento significativo, pasando de 4.8 kg por habitante en 2010 a 13.0 kg por habitante en 2022, con un aumento más pronunciado en los últimos años, especialmente entre 2018 y 2022, donde se incrementó en 2.7 kg [17]. A pesar de la pandemia de COVID-19, el consumo per cápita de carne de cerdo se mantuvo relativamente estable durante los años 2020 y 2021, lo que destaca la resistencia de la industria porcina y la sólida demanda de este producto en el país.

A continuación, se presenta una tabla que muestra la evolución del consumo de carne de cerdo en Colombia en los últimos años:

Tabla 1.

Consumo de carne de cerdo por habitante

<i>Año</i>	<i>Kg x Hab</i>
2010	4,8
2011	5,5
2012	6,0
2013	6,8
2014	7,4
2015	7,8
2016	8,5
2017	9,2
2018	10,3
2019	11,4
2020	10,8
2021	12,2
2022	13,0

Nota. La tabla muestra el consumo por habitante en los últimos 12 años en Colombia, según lo reporta anualmente Porkcolombia. Tomado de: Consumo per cápita de carne de cerdo en Colombia. Disponible en: <https://porkcolombia.co/download/50747/?tmstv=1690241141>.

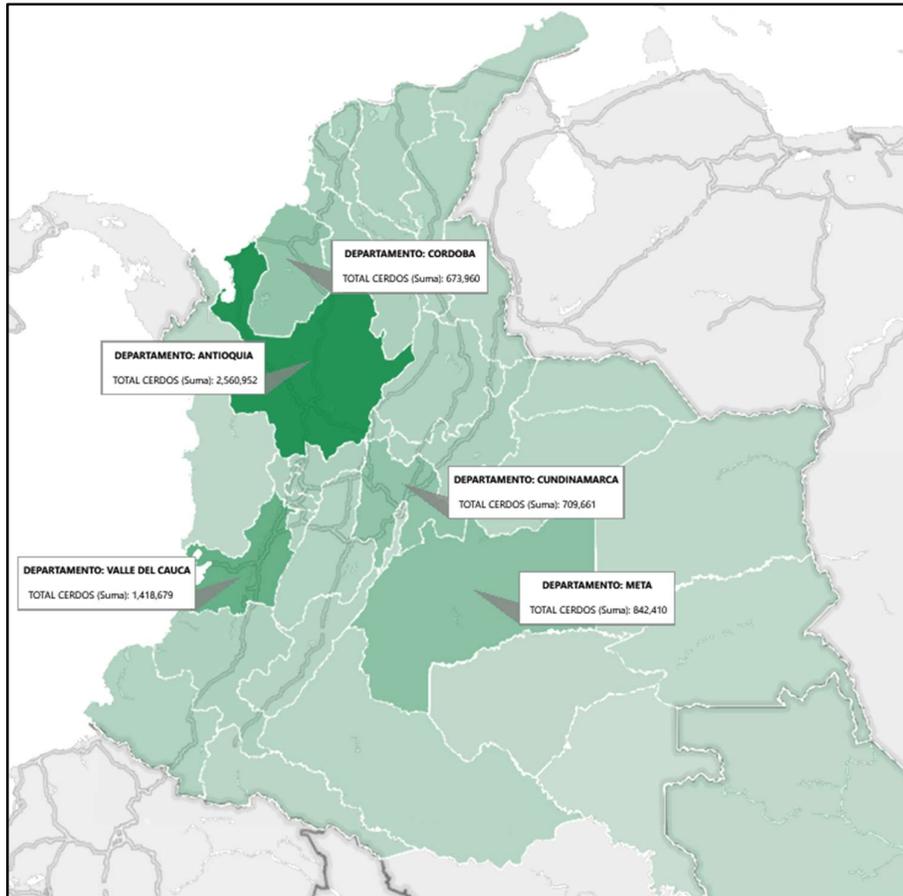
El aumento en la demanda de carne de cerdo y la concentración de la población porcina en ciertas regiones del país hacen que estos territorios sean el mercado objetivo ideal para la implementación de proyectos de biodigestores. Al aprovechar los desechos orgánicos generados en las fincas porcícolas, se puede contribuir al desarrollo de un sector energético más sostenible y reducir la dependencia de los combustibles fósiles, al mismo tiempo que se promueve una gestión más eficiente de los residuos y se minimiza el impacto ambiental.

Esta creciente demanda de carne de cerdo también se refleja en el aumento de la población porcina en el territorio colombiano. Según datos proporcionados por el ICA (Instituto Colombiano Agropecuario) [18], el censo de animales de especie porcina revela un total de 9.658.204 cerdos censados en el país. De esta población, el 89.5% corresponde a animales de predios de producción comercial y tecnificada, mientras que el 10.5% restante son animales de traspatio.

La concentración de la población porcina en Colombia se observa en seis departamentos principales, siendo Antioquia el de mayor representación con un 26.6%, seguido por Valle del Cauca con un 14.7%, Meta con un 8.7%, Cundinamarca con un 7.3%, y Córdoba con un 7.0%. Estos departamentos son considerados los principales focos de producción porcina en el país.

Figura 3.

Distribución de la cría de cerdo en Colombia

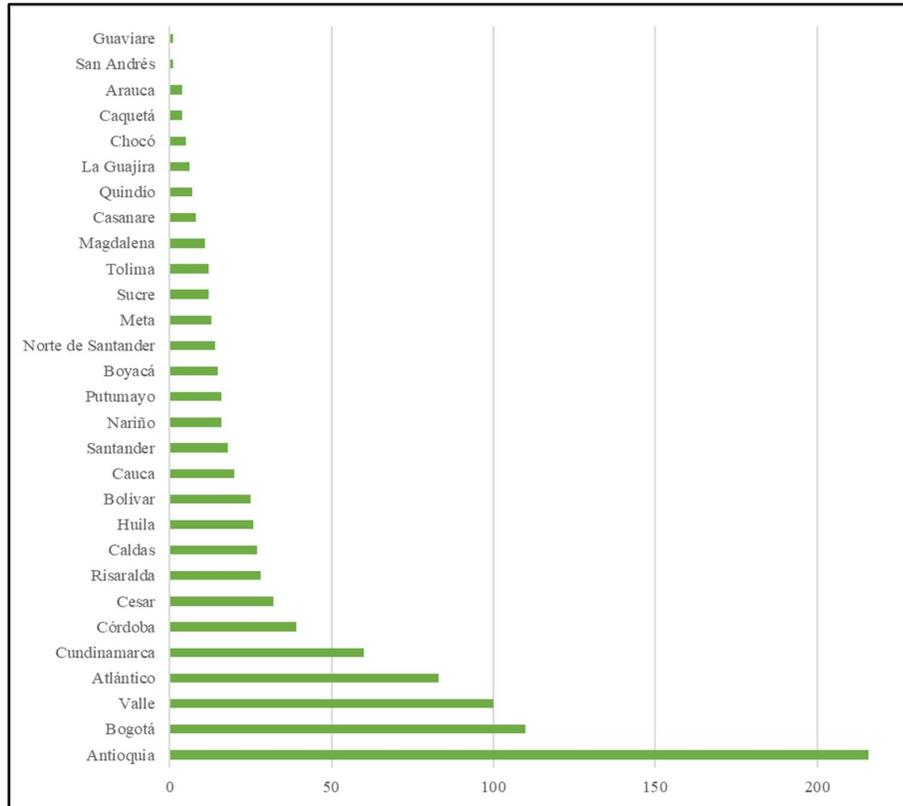


Nota. La figura muestra la participación de los departamentos en la cría de cerdo en Colombia y cuantifica la cantidad de cerdos censados por el ICA. Tomado de: Política nacional para la racionalización del componente de costos de producción asociado a los fertilizantes en el sector agropecuario. Disponible en: <https://www.ica.gov.co/getattachment/b527d0c9-e862-4c26-8347-e5076fd9b1a9/2009CP3577.aspx>.

Para conocer cómo esta población porcina se distribuye entre las empresas, se utilizaron datos proporcionados por la página "Informa Directorio de Empresas" [19]. Estos datos permitieron identificar las empresas registradas en cada departamento y cuáles de ellas se centran en la producción de cerdos. La figura a continuación muestra el número de empresas porcícolas que crían cerdos en diferentes departamentos, lo cual resulta relevante para comprender la distribución geográfica de la industria porcícola en el país y para identificar las regiones con una mayor concentración de empresas en este sector.

Figura 4.

Distribución de las empresas encargadas de la cría de cerdo en Colombia



Nota. La figura muestra la cantidad de empresas registradas por departamento en la cría de cerdos. Tomado de: Listados de empresas dedicadas a Cría de ganado porcino. Disponible en: https://www.informacolombia.com/directorio-empresas/actividad/0144_CRIA-DE-GANADO-PORCINO.

Algunos análisis y observaciones a partir de la tabla son:

- **Liderazgo de Antioquia:** El departamento de Antioquia destaca como la región con el mayor número de empresas porcícolas, contando con un total de 216. Esto sugiere que Antioquia es una de las áreas clave en la producción porcícola del país.
- **Concentración en Bogotá:** A pesar de ser una entidad territorial especial, Bogotá también muestra una notable presencia en la crianza de cerdos con 110 empresas porcícolas. Es importante tener en cuenta que, aunque Bogotá es la capital y una zona urbana, también puede albergar algunas actividades agropecuarias y ganaderas.
- **Regiones de producción porcícola significativa:** el Valle del Cauca, Atlántico y Cundinamarca son departamentos con un número considerable de empresas porcícolas, registrando 100, 83 y 60 empresas, respectivamente.
- **Baja presencia:** Algunos departamentos tienen un número relativamente bajo de empresas porcícolas, como Chocó, Caquetá, Arauca, San Andrés y Guaviare, que cuentan con solo 5

o menos empresas porcícolas cada uno. Esto puede deberse a factores como la geografía, la disponibilidad de recursos o el enfoque económico predominante en esas áreas.

Una vez comprendido el contexto general, es relevante mencionar que, en agosto de 2020, PorkColombia, el gremio que representa a los productores de carne de cerdo del país, en conjunto con la Bolsa Mercantil de Colombia (BMC) [20], llevó a cabo un estudio que tuvo en cuenta las actividades de cría de ganado porcino y procesamiento y conservación de carne y productos cárnicos, para identificar a los principales productores del país:

Tabla 2.

Principales empresas en la cría de cerdos

Empresa	Ingresos por Ventas [COP]	Ganancia Neta [COP]	Sedes Principales
Alimentos Cárnicos S.A.S.	1.685.542.741	97.518.798	Bogotá - Valle del Cauca - Antioquia - Risaralda - Meta
Agropecuaria Aliar S.A.	380.008.920	7.066.313	Santander - Meta
Red Cárnica S.A.S.	371.432.659	5.907.812	Santander - Córdoba - Bogotá
Cerdos Del Valle S.A.	257.740.346	1.508.213	Valle del Cauca
Antioqueña De Porcinos S.A.S.	237.015.284	840.139	Antioquia
Camagüey S.A.	190.168.917	28.050.236	Chocó - Atlántico
Carnes Casablanca S.A.	151.116.141	2.783.398	Bogotá - Antioquia
Comestibles Dan S.A.	149.425.251	1.605.336	Bogotá - Antioquia
Compañía Internacional De Alimentos Agropecuarios Cialta S.A.S.	103.045.041	3.052.541	Bogotá
Pic Colombia S.A.	93.839.444	9.530.484	Bogotá - Antioquia - Santander - Atlántico

Nota. La figura muestra las principales empresas en el mercado porcícola en Colombia, a través de un reporte presentado por PorkColombia. Tomado de: Serie de estudios sectoriales Carne de cerdo (Porcino). Disponible en: <https://bolsamercantil.com.co/sites/default/files/2022-07/Estudio%20Sector%20Porcino%2015-9-2020.pdf>.

El análisis general de las principales empresas que crían cerdos en Colombia, basado en la tabla proporcionada, revela lo siguiente:

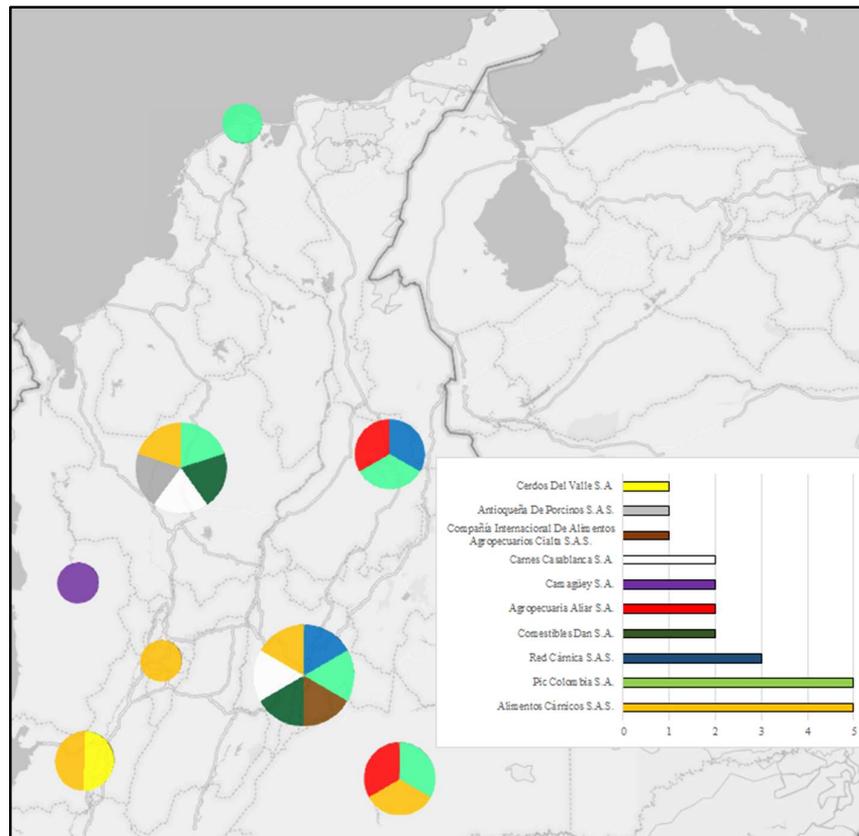
- **Líder del mercado:** Alimentos Cárnicos S.A.S. es la empresa líder en términos de ingresos por ventas, con una cantidad significativamente alta de 1.685.542.741. Su presencia en varias regiones del país, como Bogotá, Valle del Cauca, Antioquia, Risaralda y Meta, demuestra su alcance geográfico y dominio en el mercado.
- **Desempeño financiero:** Varios de los actores principales, como Alimentos Cárnicos S.A.S., Red Cárnica S.A.S. y Pic Colombia S.A., tienen ganancias netas positivas, lo que indica una operación financiera saludable y sostenible en el negocio de cría de cerdos.
- **Diversidad geográfica:** Algunas empresas, como Camagüey S.A. y Red Cárnica S.A.S., tienen sedes principales en diferentes regiones del país, lo que sugiere una estrategia de expansión geográfica para maximizar su alcance y penetración en el mercado.
- **Oportunidades:** Aunque algunas empresas tienen ingresos por ventas significativos, se observa que algunas de ellas registran ganancias netas bajas, como Agropecuaria Aliar S.A.

y Comestibles Dan S.A. Esto podría indicar áreas de mejora en la gestión financiera y operativa para garantizar la rentabilidad a largo plazo, con posibilidades de recibir inversionistas dispuestos a apalancar el crecimiento.

En la siguiente figura se ilustra, de una manera más detallada, la distribución de estas empresas en los principales departamentos del país:

Figura 5.

Distribución de las principales empresas porcícolas por departamento



Nota. La figura muestra la distribución geográfica de las principales empresas porcícolas en Colombia, identificando los departamentos donde tienen presencia destacada en el sector. Tomado de: SERIE DE ESTUDIOS SECTORIALES Carne de cerdo (Porcino). Disponible en: <https://bolsamercantil.com.co/sites/default/files/2022-07/Estudio%20Sector%20Porcino%202015-9-2020.pdf>.

Las empresas evidenciadas, representan un gran porcentaje del mercado porcícola en el país. Su liderazgo en términos de ingresos, alcance geográfico y capacidad financiera indica que estas empresas tienen un papel crucial en la industria porcícola y, por lo tanto, son actores clave para el interés en la implementación de biodigestores.

Dada su prominencia en el sector, estas empresas tienen una significativa producción de cerdos y generan una considerable cantidad de desechos orgánicos en sus procesos. Los biodigestores ofrecen una solución sostenible para la gestión de estos residuos, permitiendo convertirlos en biogás y fertilizantes orgánicos.

El interés de estas principales empresas en la implementación de proyectos de biodigestores podría tener un efecto dominó en el resto del mercado porcícola. Otras compañías del sector, al observar los beneficios y el éxito de estas prácticas sostenibles, podrían verse motivadas a adoptar tecnologías similares. Además, la adopción generalizada de biodigestores en la industria porcícola podría impulsar el desarrollo y la mejora tecnológica de estas soluciones, haciendo que sean más accesibles y efectivas para un mayor número de productores.

Asimismo, el compromiso de estas empresas líderes en la sostenibilidad ambiental podría influir positivamente en la percepción del público y los consumidores hacia la industria porcícola.

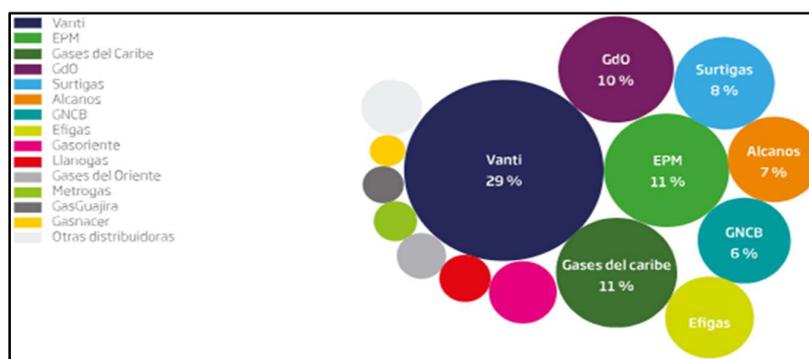
2.2.1.b. Mercado real en la comercialización de gas natural. En Colombia, los comercializadores de gas natural, tales como Alcanos, Gas Caribe, Gas Occidente, EPM, Vanti y Surtigas, desempeñan un rol esencial en la cadena de suministro y distribución de este recurso energético a nivel nacional [21]. Su labor abarca desde la adquisición del gas natural de los productores y transportistas hasta su entrega a los usuarios finales en los sectores industrial, residencial y comercial. Estas empresas actúan como intermediarios vitales al gestionar aspectos como la comercialización, la negociación contractual, la facturación, el servicio al cliente y la promoción del uso seguro y eficiente del gas natural. Asimismo, desempeñan un papel crucial en la garantía del cumplimiento normativo y contribuyen al desarrollo y expansión de la infraestructura de gasoductos y redes de distribución para alcanzar nuevas zonas y usuarios.

Estos comercializadores, adquieren el gas natural a través de diversos contratos de compra con los productores y transportistas nacionales. Los acuerdos les permiten adquirir volúmenes específicos de gas natural provenientes de diversas fuentes, como campos de producción locales o importaciones, según corresponda [21]. A través de negociaciones y convenios con los productores y transportistas, garantizan un suministro, el cual posteriormente es distribuido a los usuarios finales en las distintas regiones donde operan.

La posibilidad de implementar biodigestores en fincas abre una interesante oportunidad en relación con la producción de biogás y su eventual comercialización a las empresas distribuidoras de gas natural en Colombia.

Figura 6.

Participación de los comercializadores de gas natural en el mercado



Nota. La figura presenta la participación en el mercado colombiano de los principales comercializadores de gas natural, en un estudio realizado por el transportador de la costa Promigas.

Tomado de: Informe del sector de Gas Natural Colombia - Cifras 2021. Disponible en:

<https://www.promigas.com/InformeSectorGas2022/Paginas/Cifras-del-sector.aspx>.

La viabilidad de vender biogás a las empresas distribuidoras de gas natural depende de varios factores, como la calidad del biogás, la cantidad producida, la infraestructura de transporte disponible, las regulaciones vigentes y acuerdos comerciales establecidos, así como la rentabilidad económica. Sería necesario establecer acuerdos y regulaciones específicas para habilitar esta venta, lo que involucra aspectos legales, regulatorios y tarifarios.

2.2.1.c. Mercado real en la comercialización de fertilizantes. En el contexto de la agricultura y la ganadería en Colombia, es evidente la marcada dependencia de materias primas importadas para la elaboración de fertilizantes. Esta realidad tiene un impacto considerable en la volatilidad de los precios internos de estos insumos, lo que, a su vez, afecta directamente los costos de producción en estos sectores clave de la economía.

Esta dinámica de mercado se refleja en la participación de las principales empresas. Un 94% de las ventas está concentrado en seis empresas líderes en la industria de fertilizantes. Entre ellas se encuentran nombres como Monómeros Colombo Venezolanos S.A, Abonos Colombianos S.A – ABOCOL, Ecofertil S.A, Yara Colombia Ltda., Nutrición de Plantas S.A y C.I. De Azúcares y Mieles S.A. – CIAMSA, quienes son los actores principales en la comercialización y distribución de estos insumos esenciales [22].

La Urea importada por Colombia es proveniente de diferentes países, con un enfoque principal en Rusia (29%), Venezuela (20%), Trinidad y Tobago (14%) y Ucrania (13%). En el caso de las importaciones de KCL (Cloruro de potasio), Canadá lidera con un 37%, seguido de Alemania (29%), Estados Unidos (14%) y Rusia (10%). Las importaciones de DAP (fosfato

diamónico) y MAP (fosfato monoamónico), por su parte, tienen su origen principalmente en Estados Unidos, que contribuye significativamente con un 94% de estas importaciones [23].

2.3. Demanda Potencial

En complemento a lo tratado anteriormente, es vital explorar con mayor detalle la demanda de los productos clave generados por los biodigestores: el biogás y el abono orgánico. El biogás, como fuente renovable, tiene aplicaciones diversas en calor, electricidad y combustible. Su demanda se vincula con costos energéticos, regulaciones ambientales y sustitución de combustibles fósiles. El abono orgánico es esencial para la agricultura sostenible.

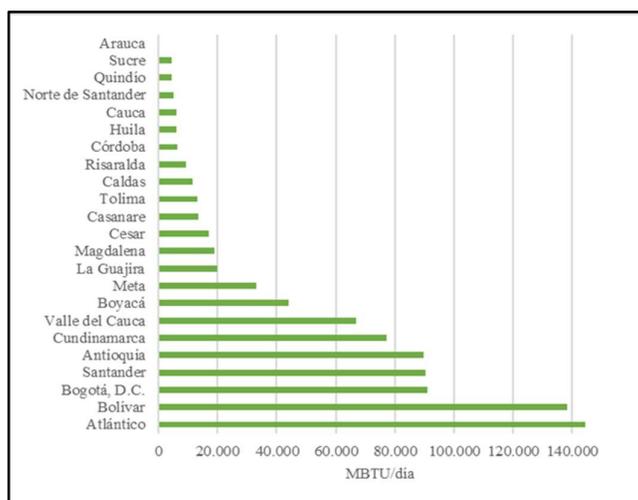
2.3.1. Demanda potencial de Biogás

En la actualidad, Colombia consume diariamente una cantidad estimada de aproximadamente 950-1.000 GBTU (gigabytes térmicos británicos) de gas natural. Dicha demanda engloba diversos sectores económicos, desde usuarios residenciales hasta comerciales, pasando por la industria, los sectores petroquímicos, las refinerías, el gas natural vehicular (GNV), los compresores y los generadores térmicos [24].

Este consumo de gas natural se distribuye a lo largo y ancho del país y presenta variaciones significativas por departamento, como se detalla en la siguiente figura:

Figura 7.

Proyección demanda gas natural por zonas



Nota. La figura presenta la demanda de gas natural en Colombia, identificando los departamentos en donde existe un mayor consumo en MBTU/Día. Tomado de: Proyecciones de demanda. Disponible en: <https://n9.cl/qhbxq>

El 60% del consumo total de gas natural se encuentra concentrado en cinco regiones clave: Atlántico, Bolívar, Bogotá, Santander y Antioquía. De especial importancia es el hecho de que dos de estas regiones albergan las únicas refinerías del país, Cartagena y Barrancabermeja, las cuales en conjunto tienen una capacidad aproximada de 145.000 MBTUD.

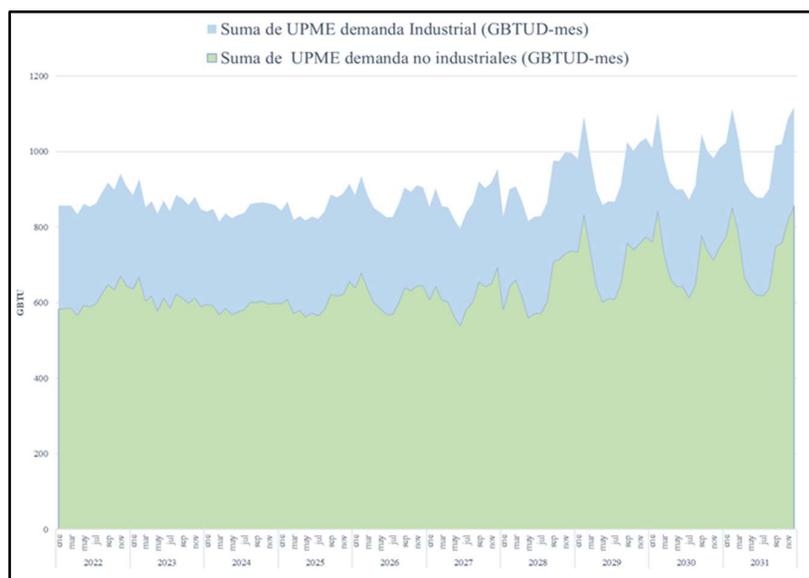
Dentro de estas regiones, la costa experimenta el mayor uso térmico, siendo Termobarranquilla (TEBSA) la instalación líder en consumo, con un promedio de 79.110 MBTUD [25]. Este enfoque en la demanda térmica está fundamentado en gran medida en la proyección de crecimiento de la demanda por parte de la UPME, ya que esta demanda está intrínsecamente ligada a la expansión de la demanda de energía eléctrica a largo plazo.

Junto con la demanda generada por las plantas térmicas, otras áreas también ejercen una influencia considerable en la demanda total de gas natural. Entre estas se destaca el sector industrial, que contribuye con un 31% de la demanda total, así como el sector no industrial, que abarca segmentos como el sector petrolero (25%), residencial (18%), termoeléctrico (10%), petroquímico (1.6%) y compresores (1%) [24].

A continuación, se presenta un análisis más detallado de la distribución sectorial de la demanda de gas natural en el escenario medio de proyección:

Figura 8.

Distribución de las principales empresas porcinícolas por departamento



Nota. La figura presenta la proyección de demanda de Gas Natural Sectorial en el escenario medio de la UPME. Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética, “Proyección demanda gas natural por zonas”, UPME. Tomado de: Proyecciones de demanda. Disponible en: <https://n9.cl/qhbxq>

La demanda no industrial oscila desde un mínimo de aproximadamente 7.083,92 GBTUD-mes hasta un máximo cercano a 8.782,53 GBTUD-mes, evidenciando cierta fluctuación, con una tendencia clara a aumentar. Por otro lado, la demanda industrial también presenta variaciones mensuales, con valores mínimos en el rango de alrededor de 3.068,24 GBTUD-mes y valores máximos alrededor de 3.104,03 GBTUD-mes. Es importante considerar que, estos datos reflejan la demanda en los meses registrados y pueden estar influenciados por diversos factores económicos, estacionales y regulatorios.

2.3.2. Demanda potencial de biogás en Zonas No Interconectadas

Los comercializadores de gas natural, entre los que se incluyen Alcanos, Gas Caribe, Gas Occidente, EPM, Vanti y Surtigas, juegan un papel esencial en la cadena de suministro y distribución de este recurso energético a nivel nacional [21]. Su rol resulta crítico para la construcción de la infraestructura necesaria destinada a llevar el gas a cada punto donde su presencia es requerida. Sin embargo, en ciertas ocasiones, la inversión necesaria para la expansión de dicha infraestructura puede ser de magnitud considerable, lo que puede limitar el alcance de sus operaciones. En aquellas regiones donde el suministro de gas aún no ha llegado, son denominadas como zonas no interconectadas (ZNI) [20].

Estas zonas, ubicadas en lugares distantes y de acceso complicado, se encuentran alejadas de los centros urbanos. La infraestructura física es escasa, y la ausencia de vías de acceso adecuadas añade un desafío adicional. Los servicios públicos son limitados y dispersos, lo que dificulta el acceso a servicios esenciales como energía, agua potable y saneamiento.

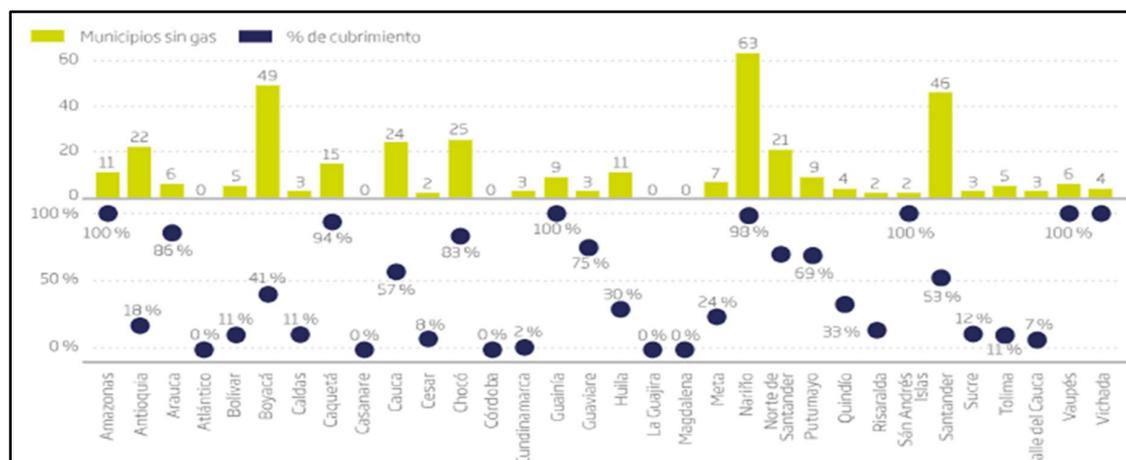
Frente a esta problemática, los hogares en estas áreas han debido suplir sus necesidades energéticas principalmente mediante el uso de la leña, un recurso ampliamente disponible en estos contextos. A pesar de los avances logrados en la expansión de la cobertura y en la transición de millones de hogares del uso de la leña al gas, el empleo de esta última como fuente de energía para cocinar sigue siendo notable. Hasta finales de 2021, alrededor de un 28% de los hogares en zonas rurales remotas del país continuaban utilizando fogones abiertos para cocinar alimentos, calentar agua y espacios. Adicionalmente, un 22% en zonas rurales cercanas y un 14% en áreas con un nivel intermedio de urbanización, en suma, un total de 1.7 millones de familias, todavía mantenían esta práctica, a pesar de los riesgos que conlleva para la salud [26]. Actualmente, persiste el desafío de llevar el servicio de gas natural a 363 municipios distribuidos en 27 departamentos. De estos, alrededor del 50%, es decir, 183 municipios, se concentran principalmente en cuatro departamentos clave: Nariño con 63, Boyacá con 49, Santander con 46 y Chocó con 25 [27]. No obstante, se observa una disparidad en otros departamentos como

Antioquia, Caldas, Casanare, Cauca, Cesar, Córdoba, Cundinamarca, La Guajira, Magdalena, Meta, Quindío, Risaralda, San Andrés, Sucre, Tolima, Valle del Cauca, Vaupés y Vichada. En estos últimos, la cobertura de gas natural es insuficiente, con 15 departamentos reportando una cobertura inferior al 20%, e incluso algunos de ellos con una cobertura del 0%, como es el caso de Atlántico, Córdoba, La Guajira y Magdalena.

Determinar la demanda precisa de gas natural para cada hogar o empresa es una tarea de cierta complejidad debido a la variedad de factores que influyen en los patrones de consumo. No obstante, el mercado ha establecido una categorización de usuarios en dos grupos principales: los regulados y los no regulados. Esta clasificación se basa en la observación de cómo estos usuarios utilizan el gas natural y cuánto consumen en promedio.

Figura 9.

Nivel de suministro de gas natural por departamentos



Nota. La figura presenta, en un nivel más detallado, el porcentaje de suministro de gas natural por departamento, en un estudio realizado por el transportador de la costa Promigas. Tomado de: Informe del sector de Gas Natural Colombia - Cifras 2021. Disponible en: <https://www.promigas.com/InformeSectorGas2022/Paginas/Cifras-del-sector.aspx>.

En el caso de las familias y hogares, podemos afirmar que sus necesidades específicas de consumo se satisfacen con volúmenes inferiores a 85.000 m³/mes de gas natural [28]. Esta cifra promedia alrededor de 400-600 m³ por hogar [29], aunque las cifras reales pueden variar dependiendo de factores como el tamaño de la vivienda, las prácticas de cocción y calefacción, así como las preferencias personales.

Por otro lado, en el ámbito empresarial de este sector, las demandas pueden superar significativamente la marca de 1.000.000 m³/mes de gas natural [28]. Empresas industriales, plantas de producción y otras instalaciones comerciales pueden requerir un suministro mucho mayor debido a sus operaciones y procesos intensivos en energía. Estos volúmenes elevados de

consumo son una manifestación de la importancia del gas natural en el funcionamiento de diversas industrias y en la generación de energía.

Es importante considerar que la demanda de gas natural está influenciada por una serie de factores cambiantes, como las condiciones económicas, las estaciones del año, las regulaciones gubernamentales y las tendencias tecnológicas.

Dentro del marco de esta investigación particular, que tiene como enfoque principal el análisis de la demanda de BIOGÁS, se proporciona una tabla detallada que desglosa los promedios de consumo de biogás para una variedad de aplicaciones [30].

Tabla 3.

Consumos de biogás promedio para diferentes equipos

Equipo	Biogás (litros/ hora)	Tiempo de funcionamiento (horas) x 1000 litros de biogás
Estufa doméstica	300	3,33
Estufa industrial	450	2,22
Calefactor de lechones	300	3,33
Lámpara (60W)	120	8,33
Olla arrocera (2L)	140	7,14
Calefactor de agua (14kW)	2.500	0,4
Refrigerador (100L)	30 clima frío 75 en clima cálido	33,3 clima frío 13,33 clima cálido
Motor < 5HP (por cada 1HP)	400	2,5
Motor > 5HP (por cada 1HP)	250	4
Ordeñadora (15 HP)	2.500	0,4
Generador (1,2 kW)	600	1,67
Generador (3 kW)	2.100	0,48

Nota. La tabla proporciona información sobre el consumo de biogás de diversos equipos comúnmente encontrados en áreas rurales, junto con el tiempo de funcionamiento por cada 1.000 litros de biogás. Fuente: Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia. Tomado de: Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia. Disponible en: https://porkcolombia.co/wp-content/uploads/2020/06/Guia-Biogas-sector-porcicultor_Porkcolombia.pdf.

Se evidencia el consumo de biogás y el tiempo de funcionamiento necesario para utilizar 1.000 litros de biogás en varios artefactos [30]. Se observa que artefactos con menor consumo por hora, como lámparas y ollas arroceras, pueden operar durante más tiempo con la misma cantidad de biogás. Por otro lado, artefactos con mayor consumo, como calefactores de agua y ordeñadoras, tienen tiempos de funcionamiento más cortos. La variación en el consumo de generadores y motores según su capacidad sugiere considerar la eficiencia al elegir qué artefacto utilizar. Estos datos resaltan la importancia de comprender el consumo de biogás para tomar decisiones informadas sobre su uso.

2.3.3. Demanda potencial de estiércol

La demanda de fertilizantes en Colombia es un reflejo dinámico y en constante cambio del sector agrícola del país. Las estadísticas proporcionadas por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural arrojan cifras impactantes: en el año 2020, se utilizó aproximadamente un total de 4.7 millones de toneladas de fertilizantes en todo el territorio colombiano [23].

Dentro de este contexto de búsqueda de eficiencia y productividad, emerge una realidad que no puede ser ignorada: existe una notable escasez de fuentes de nitrógeno en Colombia. Esta limitación ha llevado a que se priorice la producción de fertilizantes basados en otros elementos esenciales como el fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. Sin embargo, pese a esta preferencia, la posibilidad de establecer la producción local de Amoniaco-Urea se ha descartado mayoritariamente. Esta decisión se fundamenta en los costos relativamente altos de la materia prima esencial, particularmente el gas natural, en comparación con los principales productores a nivel global [22].

En términos de la amplitud de la demanda de fertilizantes, esta se ajusta en función de una producción total registrada de 63.247.863 toneladas de alimentos cosechados, en el año 2019. Esta producción se distribuye de manera significativa en distintos segmentos agrícolas [31]: 42.208.363 toneladas corresponden al grupo agroindustrial, representando un 66,7% del total; 6.712.167 toneladas se destinan a los cultivos frutales, constituyendo un 10,6%; 6.404.514 toneladas son asignadas a los tubérculos y el plátano, comprendiendo un 10,1%; 4.423.183 toneladas se dirigen hacia los cereales, lo que equivale al 7,0%; 3.051.481 toneladas están enfocadas en las hortalizas, verduras y legumbres, reflejando un 4,8%; finalmente, 448.154 toneladas, equivalente al 0,7%, se dedican a los árboles frutales dispersos. Esta distribución ponderada subraya la necesidad diversa de fertilizantes en los diversos segmentos agrícolas que conforman el entramado productivo del país.

2.3.4. Demanda potencial de biogás en la agricultura

Según los datos proporcionados por la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (Upra) [67], diversos departamentos se destacan por su extensa área agrícola. Hasta el corte de 2021, los departamentos líderes en extensión de cultivos son Meta (con unas 520.363 hectáreas cultivadas), seguido por Antioquia (con 435.373 hectáreas), Tolima (con 374.386 hectáreas), Valle del Cauca (con 367.760 hectáreas) y Santander (con 352.371 hectáreas).

A continuación, se presenta una tabla que muestra el rango estimado de la cantidad de fertilizantes necesarios por hectárea para diferentes tipos de cultivos:

Tabla 4.

Cantidad de abono según cultivo

Tipo de Cultivo	Rango de Abono por Hectárea (kg)
Hortalizas	2.000 - 5.000
Granos	1.000 - 2.000
Frutales	1.000 - 2.000
Pastos y Forrajes	500 - 1.500
Cultivos Intensivos	2.000 - 6.000

Nota. La tabla

muestra los kg de abono que requiere cada tipo de cultivo. Fuente: Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia. Tomado de: Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia. Disponible en: https://porkcolombia.co/wp-content/uploads/2020/06/Guia-Biogas-sector-porcicultor_Porkcolombia.pdf.

Si se establece una necesidad de 2.000 kg de abono por hectárea, en términos de necesidades de fertilizantes, se estima que Meta, con sus 520.363 hectáreas de cultivo, requeriría alrededor de 1.040.726.000 kg (equivalentes a aproximadamente 1.040.726 toneladas); Antioquia, con 435.373 hectáreas, demandaría cerca de 870,746,000 kg (870,746 toneladas); Tolima, con 374.386 hectáreas cultivadas, necesitaría aproximadamente 748,772,000 kg (748.772 toneladas); el Valle del Cauca, con 367.760 hectáreas cultivadas, presentaría una demanda estimada de unos 735.520.000 kg (735,520 toneladas); mientras que Santander, con 352,371 hectáreas en cultivo, requeriría aproximadamente 704.742.000 kg (704.742 toneladas) de fertilizantes. En consecuencia, la demanda total de fertilizantes para estos departamentos sumaría alrededor de 4.100.506 toneladas.

2.4. Aliados Estratégicos – Oferta

Se evalúa la oferta actual de biogás y abono en Colombia, para comprender el panorama existente en este mercado. Sin embargo, este análisis va más allá de una mera evaluación superficial de la oferta disponible. En realidad, abre una ventana de oportunidad para la creación de alianzas estratégicas con empresas que ocupan una posición destacada en el mercado. Estas empresas no solo cuentan con experiencia en el desarrollo de proyectos de biodigestores, sino que también tienen una perspectiva amplia y profunda sobre las tendencias y las oportunidades emergentes en este sector.

2.4.1. *Oferta de Biogás*

En Colombia, diversas compañías están encabezando la implementación de energía renovable al hacer uso eficiente de la biomasa en sus actividades. Bioenergy, por ejemplo, extrae etanol a partir de caña de azúcar que ellos mismos cultivan en los Llanos Orientales. Esta empresa aprovecha los residuos de caña, madera y otros recursos para generar energía que cubre sus necesidades operativas y aporta hasta 19 MW hora a la red eléctrica nacional [68].

RefoEnergy, ubicada en Puerto Carreño (Vichada), sobresale al llevar fuentes de energía renovable a una ciudad y respaldar el progreso económico local, al reducir aproximadamente 50,000 toneladas de CO₂ anuales al utilizar residuos de madera [69].

En el caso de SmurfitKappa, con varias plantas en el país, su inversión de 100 millones de dólares en una caldera de biomasa tiene como objetivo disminuir 200,000 toneladas de CO₂ al año al convertir desechos de corteza de pino y eucalipto en energía ecológica y biocombustible [70].

Estas empresas lideran la utilización de biomasa en Colombia, acompañadas por otras en el sector azucarero, paplero, de cartón y de alimentos, como Cartón Colombia, Cervecería Águila, Riopaila Castilla, Argos y Celsia Solar Yumbo [71].

De acuerdo al análisis titulado "Estimación del potencial de conversión a Biogás de la biomasa en Colombia", llevado a cabo por la Universidad Nacional de Colombia y la UPME [72], en conjunto con información de empresas del sector, se ha identificado la disponibilidad de biogás en diferentes regiones de Colombia:

- El sector de la Caña de Azúcar se destaca como líder en la generación de bioenergía en el país. En esta industria, se emplea el bagazo de la caña para alimentar calderas y producir etanol, que luego se combina con gasolina para el abastecimiento del transporte.
- Por su parte, la industria de la Palma de Aceite es otra importante fuente de biogás en Colombia, con una extensión de más de 560,000 hectáreas y la participación de más de 6,000 productores. En este campo, el biogás se obtiene mediante la digestión anaeróbica de las aguas residuales generadas por las plantas de extracción de aceite de palma. Este biogás es conocido por su elevado contenido de metano, oscilando entre el 50 % y el 60 %, lo que lo hace idóneo para la generación de energía térmica o eléctrica.
- Dentro del ámbito de la porcicultura, las explotaciones de escala mediana y pequeña se concentran en aprovechar los desechos orgánicos resultantes de la industria porcina. Para ello, implementan biodigestores de modelos tipo bolsa y Taiwán. En este subsector, se procesan diariamente alrededor de 1,200 toneladas de efluentes, generando 600 m³/h de

biogás con un alto contenido de metano (63 %), lo que equivale a una producción mensual de 576,000 KW.

2.4.2. Oferta de Abono

Dentro del panorama empresarial colombiano, se destacan diversas compañías líderes en la manufactura de fertilizantes, como Monómeros Colombo Venezolanos S.A y Abonos Colombianos S.A, como se ha mencionado anteriormente. No obstante, entre las cinco principales empresas que dominan el sector, Yara sobresale al generar ingresos por un total de \$1.1 billones, seguida de cerca por Monómeros, que reporta ganancias por \$744.081 millones. La tercera posición la ocupa Dow Química con ingresos de \$639.049 millones, mientras que Dow Agrosiences se posiciona cuarta con ingresos equivalentes a \$583.765 millones. Finalmente, Pintuco figura en el quinto lugar con ingresos alcanzando los \$539.721 millones [73]. Desde una perspectiva histórica, Colombia ha mantenido una fuerte dependencia de la importación de fertilizantes e insumos agropecuarios provenientes de otras naciones. De hecho, alrededor del 95% de estos productos son adquiridos de países como Venezuela y Trinidad y Tobago. Los principales países proveedores de urea, uno de los fertilizantes más esenciales, son Rusia y Ucrania [74].

Para ejemplificar, Yara, una de las compañías líderes, comercializa alrededor de 800,000 toneladas de fertilizantes anualmente, atendiendo a más del 50% de los agricultores colombianos. No obstante, en Colombia aún no se ha establecido la capacidad necesaria para la producción de urea, y persiste la incertidumbre sobre si hay reservas suficientes de gas para realizar este proceso a nivel industrial y reducir las importaciones [75]. En relación al fósforo, a pesar de que Colombia genera este elemento, se plantean interrogantes sobre la cantidad de reservas disponibles para satisfacer la demanda interna. Asimismo, la calidad del material local genera preocupación, ya que podría impactar negativamente en la eficacia de los cultivos. Con respecto al potasio, la producción interna en Colombia se ve limitada por la falta de reservas minerales con concentraciones significativas. Como resultado, el país sigue dependiendo de fuentes externas de potasio, principalmente de países como Chile, Rusia, China y Estados Unidos. Un ejemplo concreto es que más del 37% del cloruro de potasio importado por Colombia proviene de Canadá, el 35.5% de Rusia y el 11.8% de Bielorrusia [76].

La producción interna de fertilizantes y abonos en Colombia se enfrenta a desafíos fundamentales que incluyen la necesidad de contar con reservas sustanciales de materias primas y la demanda de un desarrollo tecnológico, infraestructura e investigación sólidos para atender las necesidades nacionales en este sector industrial.

3. ESTUDIO TÉCNICO

3.1. Materia prima requerida

El estiércol se considera la materia prima fundamental en el proceso de biodigestión, por lo que un factor importante a considerar es el tiempo de digestión de los cerdos, el cual puede variar según varios factores, como la edad, el tipo de alimento y las condiciones de manejo. En promedio, el proceso de digestión en cerdos puede tomar alrededor de 24 a 36 horas, desde que consumen los alimentos hasta que los desechos son eliminados en forma de excremento. Se estima que un cerdo adulto puede producir alrededor de 2 a 6 kilogramos de estiércol por día. Considerando un ciclo de producción de aproximadamente 1 mes, un cerdo podría generar alrededor de 60 a 150 kilogramos de estiércol en ese período [32], [33].

El estiércol es importante para producir biogás debido a su contenido de materia orgánica y su capacidad de descomposición. Sus principales componentes son [34]:

3.1.1. *Materia orgánica*

El estiércol porcino contiene una alta proporción de materia orgánica, que incluye los restos de alimentos consumidos por los cerdos y otros residuos orgánicos. Esta materia orgánica es la fuente principal para la producción de biogás durante la digestión anaeróbica.

3.1.2. *Nutrientes*

El estiércol es rico en nutrientes esenciales para las plantas, como nitrógeno, fósforo y potasio. Estos nutrientes son beneficiosos cuando se utiliza el estiércol como fertilizante en la agricultura, ya que pueden mejorar la calidad del suelo y promover el crecimiento de las plantas [34].

3.1.3. *Agua*

El estiércol contiene una cantidad significativa de agua, ya que los cerdos eliminan parte de su ingesta de líquidos a través de los excrementos. El contenido de agua puede variar dependiendo de la cantidad de agua que consumen los cerdos y las prácticas de manejo del estiércol [34].

3.1.4. *Materiales fibrosos*

El estiércol puede contener materiales fibrosos, como paja o virutas de madera, que son utilizados como lecho en las instalaciones de crianza de cerdos. Estos materiales pueden mezclarse con los excrementos y formar parte del estiércol [34].

3.2. **Productos y subproductos**

3.2.1. *Biogás*

El biogás es un subproducto de la descomposición de la materia orgánica dentro de los biodigestores, el mismo es producido por medio de digestión anaeróbica, por lo cual puede ser considerado como una mezcla de metano con porciones mínimas de dióxido de carbono, e impurezas tales como ácido sulfhídrico. Teniendo en consideración su alto poder calorífico suele ser usado como una fuente alternativa a los combustibles tradicionales [35].

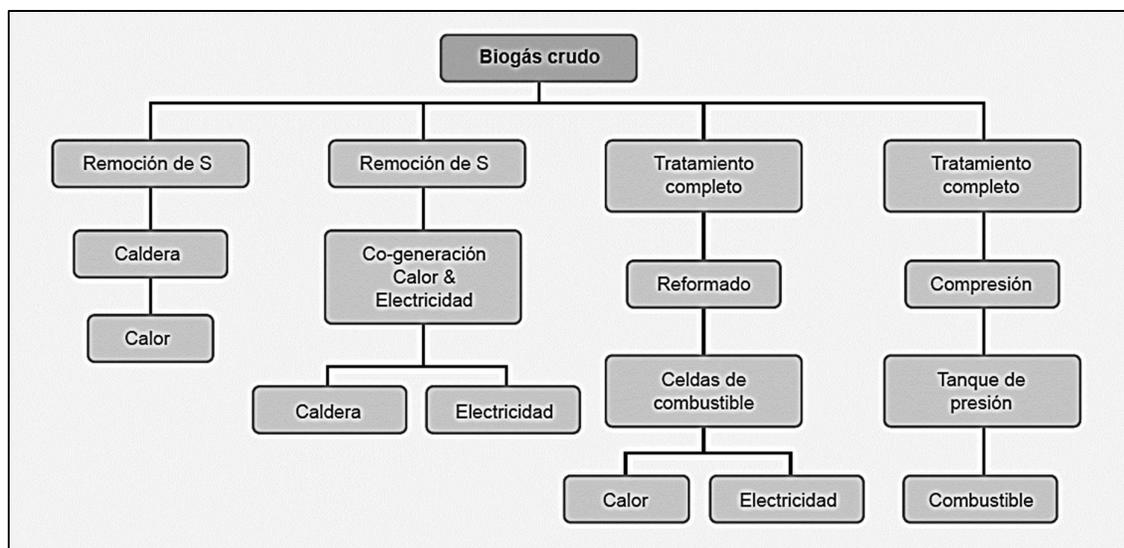
A partir de lo anterior y considerando lo dispuesto en el Manual del biogás [33], se plantean como las principales aplicaciones de este compuesto las plasmadas a continuación:

- **Producción de calor o vapor:** una de las aplicaciones más comunes y básicas del biogás en su aprovechamiento para la producción de energía térmica o calor, esto es principalmente útil en sistemas pequeños en los cuales el uso de este componente puede ser usado para solventar necesidades como la cocina y la preparación de alimentos; cabe mencionar que dichos escenarios la calidad del biogás es baja pues tan solo “Se necesita alcanzar una presión de gas de 8 a 25 mbar y mantener niveles de H₂S inferiores a 100 ppm para conseguir un punto de rocío de 150°C” [33].
- **Generación de electricidad o combinados:** dentro de estos sistemas se hace aprovechamiento tanto de la electricidad producida por el combustible, así como del calor desprendido del proceso como subproducto, un ejemplo de esta aplicación es el uso en turbinas de gas de 25 kW a 100 kW, así como los motores de combustión interna, naturalmente para hacer esto posible se hace necesario la remoción íntegra del H₂S (menor a 100 ppm) [33].
- **Combustible para vehículos:** para su aplicación correctamente se ha de someter al biogás a un proceso de purificación exhaustivo, pues el mismo ha de poseer características similares al gas natural usado en automóviles. Cabe señalar que, el gas obtenido de procesos de fermentación tiene un nivel de octanaje de 100 y 110, siendo de esta forma ideal para este medio de transporte [33].

Teniendo en consideración lo anterior se ha de notar que existen una gran variedad de aplicaciones del biogás, por lo cual para cada uno de sus usos se han de adelantar procesos de tratamiento y purificación del compuesto, por lo cual en la Figura 10 se sintetizan los más relevantes.

Figura 10.

Procesos de tratamiento del biogás



Nota. La figura sintetiza los usos más comunes del biogás. Tomado de: FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF, “Manual del Biogás”, Gobierno de Chile, Ministerio de energía. 2011. p. 57.

3.2.2. *Tratamiento y purificación del biogás*

El biogás obtenido de la materia orgánica no es un compuesto puro, pues puede contener partículas añadidas, así como trazas de otros gases. Ahora bien, uno de los aspectos más relevantes con respecto a la purificación de este compuesto, se encuentra relacionado al nivel de tratamiento al cual es sometido, lo que está dado principalmente por la el tipo y aplicación requerida; así las cosas, se puede argumentar que las dos principales razones que justifican cualquier proceso de acondicionamiento del gas son [33]:

- La mejora y aumento del poder calorífico del gas.
- El acondicionamiento para la aplicación en maquinaria, tal como vehículos, calderas, motores, entre otros.

En concordancia con lo anterior, el acondicionamiento y tratamiento del gas puede resumirse a la eliminación de compuestos añadidos como son el CO₂, humedad (vapor de agua), material particulado sólido y la presencia de otros gases [33].

3.2.2.a. Eliminación del CO₂. Teniendo en cuenta que, la presencia de dióxido de carbono en el biogás no es un factor determinante para el aprovechamiento de este compuesto en muchas aplicaciones como lo son el uso en motores de combustión interna, calentadores, o generadores de electricidad, existen aplicaciones en las cuales se requiere que este gas tenga una mayor concentración en cadenas de hidrocarburos, como lo es como el aprovechamiento en vehículos, por lo anterior un eliminación o disminución de la porción de CO₂ resulta en un aumento considerable en el poder calorífico del compuesto [33].

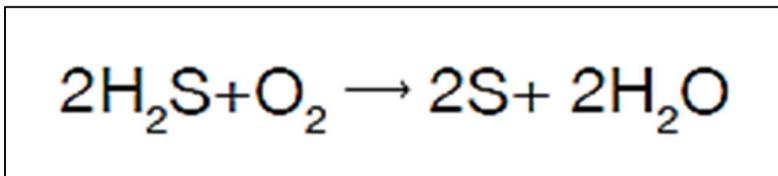
Dentro de los procesos usados para la eliminación del dióxido de carbono, industrialmente son usados procesos como lavado a presión, uso de glicoles, uso de solventes orgánicos, procesos de adsorción o absorción, tecnologías de diafragmas, mineralización o purificación criogénica, entre otros. en este punto cabe señalar que, para el análisis de la cadena de suministro, así como para el sentido general de este proyecto de investigación fueron seleccionados los procesos de absorción, teniendo presente su alta eficiencia versus su costo general [33]:

- **Absorción:** consiste en aprovechar las diferentes afinidades que poseen el metano y el CO₂ a diversos líquidos, tal como el agua, en la cual los componentes ácidos como el dióxido de carbono, son disueltos con mayor facilidad en sustancias hidrofóbicas como el metano. Durante este proceso, el biogás que entra a la cámara es presurizado hasta los 12 bar, mediante la movilización del mismo a través de un material de empaque, por lo cual y gracias a la transferencia del CO₂ al agua, se obtiene un gas resultante rico en metano (alrededor del 95%) [33].
- **Deshidratación:** uno de los elementos contaminantes que más genera afectaciones a los sistemas de almacenamiento y transporte del biogás, es el agua pues al presentarse una humedad relativa mayor al 60% en el biogás se aceleran los procesos de corrosión [15]. Por lo anterior y con objetivo a lo relativo a este proyecto, se hace necesario el sometimiento del biogás a procesos de enfriamiento y compresión, en los cuales una disminución de la temperatura mediante un intercambiador de calor permite la separación del agua del gas mediante la condensación de la primera [33].
- **Remoción del sulfuro de hidrógeno:** de la mano con los efectos producidos por altas concentraciones de humedad, la presencia de H₂S, aumenta la posibilidad de la generación de ácido sulfúrico (H₂SO₄), compuesto que puede llegar a ser muy corrosivo para elementos metálicos y motores. Así las cosas, existen una gran variedad de procedimientos y procesos para realizar la eliminación del sulfuro de hidrógeno, tales como: Desulfuración biológica, Precipitación de sulfuros, Absorción en una solución férrica quelante, Adsorción en carbón activado [33].

- **Enlace químico con zinc:** teniendo en cuenta lo anterior, para el desarrollo de esta investigación se tomará en cuenta los procesos de adsorción en carbón activado como proceso para la eliminación de las contaminaciones con H₂S. De esta forma, el carbón activado ejerce un papel de catalizador, descomponiendo la partícula de sulfuro de hidrógeno, en azufre, en los casos en los cuales la concentración de H₂S sea altas se suele hacer uso de agentes acelerantes, entre los cuales se destacan el yoduro de potasio con una concentración de 5% [33]. A continuación, se presenta la reacción química llevada a cabo:

Figura 11.

Eliminación del H₂S mediante la aplicación de carbón activado haciendo uso de un agente catalizador de yoduro de potasio



Nota. La figura muestra la reacción química llevada a cabo en la eliminación del H₂S mediante la aplicación de carbón activado haciendo uso de un agente catalizador de yoduro de potasio. Tomado de: FAO, Minergia, PNUD, and GEF, “Manual del Biogás”, Gobierno de Chile, Ministerio de energía, 2011.

3.2.3. **Biosol**

Durante la digestión anaeróbica, los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás (compuesto principalmente de metano y dióxido de carbono) y una suspensión rica en nutrientes llamada biosol o digestato [36].

El biosol es un material de desecho orgánico que contiene nutrientes valiosos como nitrógeno, fósforo y potasio, así como materia orgánica. Por lo general, se encuentra en forma semilíquida o en suspensión y su consistencia puede variar según el tipo de materiales orgánicos utilizados en el biodigestor [37].

El biosol se puede utilizar como fertilizante orgánico rico en nutrientes para fines agrícolas. Su aplicación al suelo ayuda a mejorar la estructura del suelo, la fertilidad y la retención de agua, promoviendo un crecimiento más saludable de las plantas y reduciendo la necesidad de fertilizantes sintéticos [36].

La gestión y el manejo adecuados del biosol son esenciales para garantizar que se aplique al suelo de forma segura y eficaz. El uso de biosol como fertilizante orgánico puede ser un enfoque ecológico para reciclar los desechos orgánicos y apoyar prácticas de agricultura sostenible.

3.2.4. *Biol*

El Biol es un material orgánico que se encuentra en estado líquido, el cual puede ser considerado como un subproducto durante el proceso de descomposición de material orgánico como lo son restos de materia vegetal, estiércol de animales o los restos de los mismos. Teniendo en consideración su alto nivel energético contiene una serie de nutrientes que son asimilados fácilmente por la vegetación. Este compuesto es usualmente obtenido mediante el uso de biodigestores [35].

Se añade además que este compuesto es considerado como un producto secundario en la producción de biogás por medio de digestores anaerobios y es usado como fertilizante posteriormente, por lo anterior y teniendo en cuenta su uso a continuación se presentan las tres principales modalidades de implementación de Biol [38]:

- **Efluente líquido:** permite una alta absorción de los nutrientes por parte de las plantas por lo cual, y por su disponibilidad es usualmente usado a la salida del biodigestor, o en su defecto almacenado de tal forma que se asegure una pérdida mínima de nitrógeno [38].
- **Efluente compostado:** dentro de esta modalidad de aplicación se hace uso de agregados como desechos de forraje de establo con el fin de compostar la mezcla logrando de esta manera pérdidas de hidrógeno de entre el 30% al 70% [38].
- **Efluente:** al usar este mecanismo de aplicación se encuentra una pérdida total de nitrógeno orgánico de cerca del 90%, por lo cual las producciones observadas en este escenario comparten similitudes con el uso de estiércol seco, lo que hace que sea usado durante la fertilización de grandes áreas [38].

Teniendo en cuenta las diferencias de humedades se puede diferenciar el Biol y el Biosol, siendo este último la parte sólida con menor humedad de los fertilizantes producidos en el proceso de producción de gas por medio de biodigestores. Dentro de la humedad promedio alcanzada por el biosol se encuentran rangos del 10% al 25%, lo cual depende en gran medida de las técnicas usadas para su obtención, así como las condiciones del proceso. Estos subproductos pueden ser usados como fertilizantes y materiales de compostaje [36].

3.3. Factores determinantes en el proceso de producción

3.3.1. *Temperatura*

La temperatura desempeña un papel fundamental en la digestión anaerobia, al igual que en otros procesos biológicos. Varios factores influyen en su control, como el tipo de biodigestor, el material de construcción utilizado, la temperatura ambiente en la ubicación y la temperatura de

la materia prima.

El control de la temperatura es crucial debido a su influencia en la velocidad de crecimiento de los microorganismos responsables de la producción de biogás. Los microorganismos anaeróbicos pueden operar en un rango de temperatura que va desde los 10°C hasta los 55°C. Se dividen en tres categorías según su rango de temperatura: psicrófilos (10°C-25°C), mesófilos (25°C - 40°C) y termofílicos (40°C - 55°C). Cada uno de estos rangos de temperatura puede ser propicio para la producción de biogás [39].

Es importante destacar que una temperatura más alta tiene un impacto significativo en la digestión anaeróbica. A medida que aumenta la temperatura, aumenta la producción de biogás, el crecimiento microbiano se acelera y la viscosidad de los sólidos se reduce, lo que disminuye la necesidad de agitación en el sistema [39].

El control adecuado de la temperatura en un biodigestor es esencial para mantener un proceso eficiente de digestión anaerobia y optimizar la producción de biogás. Dependiendo de los microorganismos presentes y las condiciones específicas del biodigestor, se puede ajustar la temperatura para favorecer el crecimiento y la actividad microbiana, lo que se traduce en una mayor producción de biogás.

3.3.2. Concentración de Iones Hidronio pH

El pH es una variable de suma importancia en la digestión anaerobia, ya que tiene gran influencia en la eficiencia de la digestión. Si el pH no se controla adecuadamente, puede afectar negativamente el desarrollo de los microorganismos y comprometer la producción de biogás. Durante las etapas de hidrólisis y acidogénesis, el rango de pH óptimo se sitúa entre 5,5 y 6,5. Para la etapa de metanogénesis, es preferible que el pH esté en un rango de 7,8 a 8,2. Esto se debe a que la producción de metano depende de los microorganismos metanogénicos, los cuales requieren un entorno cercano a la neutralidad para funcionar de manera eficiente [40].

Mantener un pH adecuado es fundamental para asegurar una producción estable de biogás. Si el pH se desvía demasiado de los rangos óptimos, puede haber inhibición de los microorganismos o el crecimiento de organismos indeseables, lo que afecta negativamente la producción de metano y la calidad del biogás.

El monitoreo regular del pH y la adición de agentes neutralizantes, como ácido sulfúrico o hidróxido de sodio, pueden ser necesarios para mantener el equilibrio ácido-base en el biodigestor. Esto garantiza un ambiente propicio para el crecimiento de los microorganismos metanogénicos y una producción estable de biogás [40].

3.3.3. *Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)*

El tiempo de retención hidráulica (TRH) es un factor crucial en la digestión anaerobia y se refiere al período de tiempo durante el cual la materia orgánica se degrada en el biodigestor. Se calcula dividiendo el volumen del biodigestor por el caudal de entrada de la materia orgánica. El TRH está estrechamente relacionado con la temperatura del sistema. A medida que la temperatura aumenta, el tiempo de retención hidráulica tiende a disminuir. Esto se debe a que las condiciones más cálidas aceleran la actividad microbiana y el proceso de descomposición. En consecuencia, los organismos psicrófilos, que operan en temperaturas más bajas, tienen un TRH más largo, mientras que los organismos termofílicos, que trabajan en temperaturas más altas, tienen un TRH más corto [39].

Es importante tener en cuenta el tiempo de retención hidráulica adecuado para garantizar una digestión anaerobia eficiente. Un TRH demasiado corto puede resultar en una digestión incompleta de la materia orgánica y una producción subóptima de biogás. Por otro lado, un TRH demasiado largo puede llevar a un rendimiento deficiente y una pérdida de capacidad del biodigestor [39].

La temperatura y el TRH son aspectos interrelacionados que deben ser considerados en el diseño y la operación de un biodigestor para garantizar un rendimiento óptimo y una producción estable de biogás.

3.3.4. *Sólidos Totales*

Los sólidos totales se refieren a la fracción seca o sólida presente en la materia orgánica. Un alto contenido de sólidos totales puede afectar la movilidad de los microorganismos metanogénicos, que son responsables de la producción de metano, lo que resulta en una baja eficiencia y producción de biogás [33].

La investigación experimental ha demostrado que, en los digestores semicontinuos, la carga de sólidos totales no debe superar el rango del 8% al 12% para garantizar un buen funcionamiento del proceso. En contraste, los digestores discontinuos pueden tener un contenido de sólidos totales mucho más alto, generalmente entre el 40% y el 60% [33].

Es importante tener en cuenta el contenido de sólidos totales en la materia prima al diseñar y operar un biodigestor. Un exceso de sólidos totales puede generar problemas de agitación, dificultades en la transferencia de calor y una menor disponibilidad de nutrientes para los microorganismos. Por otro lado, un contenido de sólidos totales demasiado bajo puede resultar en un rendimiento subóptimo y una menor producción de biogás.

3.3.5. Relación C/N

El equilibrio entre carbono y nitrógeno es esencial en la digestión anaerobia, ya que estos elementos son nutrientes clave para las bacterias metanogénicas, las cuales desempeñan un papel fundamental en la producción de biogás. El carbono proporciona la energía necesaria, mientras que el nitrógeno se utiliza para la formación de nuevas células microbianas [33].

Es importante tener en cuenta que los microorganismos consumen carbono en mayor cantidad que el nitrógeno. Por lo tanto, la relación C/N ideal para un proceso de digestión anaerobia eficiente se encuentra en el rango de 20:1 a 30:1. Mantener este equilibrio adecuado garantiza un entorno propicio para el crecimiento y actividad de los microorganismos, lo que a su vez maximiza la producción de biogás [33].

El control de la relación C/N es primordial para optimizar el rendimiento de un biodigestor y asegurar una descomposición eficiente de los materiales orgánicos. Con un equilibrio adecuado de carbono y nitrógeno, podrás aprovechar al máximo el potencial energético de los residuos y obtener resultados óptimos en la generación de biogás [33].

3.3.6. Nutrientes

La velocidad del proceso de digestión anaerobia está estrechamente relacionada con el crecimiento bacteriano en el biodigestor. Este crecimiento bacteriano se ve influenciado por la cantidad de nutrientes disponibles en la materia orgánica utilizada como alimentación.

Es crucial comprender los principales nutrientes que deben estar presentes en el sistema anaerobio para asegurar un proceso eficiente. Estos nutrientes incluyen nitrógeno, carbono, sulfuro, fósforo y sales minerales. Cada uno de ellos desempeña un papel vital en el metabolismo microbiano y en la producción de biogás [41].

Como se mencionaba anteriormente, el nitrógeno es esencial para el crecimiento celular y la síntesis de proteínas, mientras que el carbono proporciona la energía necesaria para las reacciones biológicas. El sulfuro y el fósforo son necesarios para la formación de componentes celulares, y las sales minerales actúan como cofactores en las enzimas involucradas en el proceso de digestión anaerobia [41].

Garantizar la presencia adecuada de estos nutrientes en el sistema anaerobio es fundamental para promover un crecimiento bacteriano saludable y una producción óptima de biogás. Además, el equilibrio adecuado de estos nutrientes contribuye a la estabilidad y eficiencia del proceso de digestión anaerobia.

3.3.7. Humedad

Para llevar a cabo la digestión anaerobia de manera eficiente, es importante utilizar biomasa con un alto contenido de humedad, que generalmente se encuentra en el rango del 80% al 90%. Esta biomasa está compuesta principalmente por polisacáridos, proteínas, lípidos y lignina [41]. En el contexto de la digestión anaerobia, la mezcla de excretas con agua se conoce como purines. Estos purines son una fuente valiosa de materia orgánica que puede ser procesada en el biodigestor para la producción de biogás. Los purines pueden provenir de diversas fuentes, como desechos de animales, residuos agrícolas o aguas residuales. La cantidad de agua que se debe agregar al estiércol en la carga de un biodigestor puede variar dependiendo del tipo de biodigestor, la composición del estiércol y otros factores específicos del proyecto. Sin embargo, como referencia general, se suele recomendar agregar aproximadamente 1 parte de agua por cada 1 parte de estiércol en peso [41].

La alta humedad de la biomasa es esencial para mantener un entorno favorable para los microorganismos anaeróbicos presentes en el biodigestor. Estos microorganismos requieren un ambiente húmedo para llevar a cabo la descomposición y fermentación de la materia orgánica, liberando así el biogás [42].

Al seleccionar y preparar la biomasa adecuada, asegurando un contenido de humedad óptimo y una composición rica en nutrientes, se favorece el proceso de digestión anaerobia y se maximiza la producción de biogás. Es importante garantizar un suministro constante y adecuado de biomasa para mantener el funcionamiento eficiente del biodigestor [43].

Es importante tener en cuenta que, si los niveles de humedad en el biodigestor son demasiado altos, el metano producido puede contener una cantidad significativa de humedad. Esta condición puede representar un desafío para las partes metálicas del biodigestor, ya que se puede presentar corrosión en estas partes. Esto se debe a que la humedad puede acelerar la oxidación y la corrosión de los metales, lo que eventualmente puede llevar al deterioro y a la necesidad de reparaciones o reemplazos costosos [44].

3.4. Caracterización de los tipos de biodigestores en el mercado

El biodigestor es un componente clave en el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica. En los digestores anaerobios, el estiércol se mantiene sin oxígeno para crear condiciones favorables que promuevan el crecimiento de microorganismos necesarios para la formación de metano. Aunque existen diferentes tipos de digestores anaerobios, cada uno con un proceso ligeramente diferente debido a su forma, funcionamiento y materiales de

construcción, todos comparten esta característica fundamental [6].

Los biodigestores pueden tener diversas formas, pueden ser sistemas pasivos, de alta o baja velocidad, y contruidos con diferentes materiales, como polietileno de alta densidad (PEAD), geotextiles, PVC, ladrillos, concreto o acero inoxidable. La elección del tipo de digestor anaerobio depende del tamaño del proceso (continuo, semicontinuo o discontinuo), del presupuesto disponible (bajo o alto costo) y de las condiciones climáticas, topográficas y de disponibilidad de terreno [6].

Sin embargo, es importante tener en cuenta que los biodigestores funcionan mejor a una temperatura de 35°C, por lo que a menudo se requiere la instalación de sistemas de calefacción en algunos climas y condiciones. Además, dependiendo del sustrato o materia orgánica utilizada para alimentar el biodigestor, pueden ser necesarios mecanismos de agitación para evitar la formación de costras en el fondo o natas en la superficie de la fase líquida, que puedan interferir con el funcionamiento normal del sistema [6].

3.4.1. Biodigestor de tapa fija o de tipo chino

Los biodigestores de tipo chino son sistemas cerrados contruidos usualmente de mampostería y ubicados bajo el nivel del suelo. Estos biodigestores, también conocidos como minidigestores, cuentan con una tapa fija en forma de domo que atrapa el biogás producido, una entrada para introducir el sustrato y una salida para el digestato que actúa como tanque de compensación. La cámara de gas debe ser completamente hermética, lo que requiere la aplicación de pinturas sintéticas u otros materiales que garanticen la hermeticidad necesaria. La construcción de este tipo de biodigestores implica un trabajo excesivo y una supervisión rigurosa por parte de especialistas, ya que su estructura de mampostería es propensa a la porosidad y agrietamiento, lo que dificulta la hermeticidad requerida y a veces requiere el uso de materiales adicionales para el sellado [45].

Existen varios diseños de biodigestores de tapa fija, como el modelo Deebandhu de la India, el Akut y el CAMARTEC, cada uno de los cuales se caracteriza por tener un domo esférico.

Estos biodigestores pueden operar de forma continua o discontinua [45].

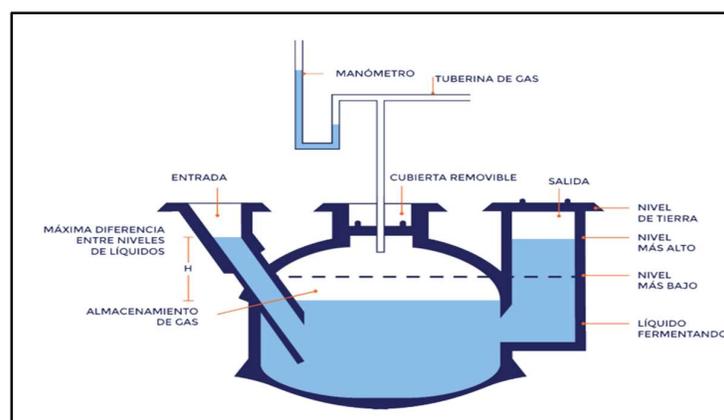
Los biodigestores de tipo chino no disponen de un gasómetro, por lo que el biogás generado se almacena en el domo del digestor, aumentando la presión a medida que el volumen del gas almacenado crece. Esta presión puede alcanzar hasta 100 cm de columna de agua y genera entre 0.15 y 0.20 volúmenes de gas por volumen de digestor/día. Sin embargo, la fluctuación de la presión disminuye la eficiencia de los equipos consumidores [33].

Para vaciar el digestor, se extrae periódicamente una parte del líquido en fermentación mediante

un tubo de salida y se utiliza el residuo sólido como bioabono para fertilizar los campos de cultivo. Aunque la producción de biogás no es muy alta, este tipo de biodigestor es eficiente para la producción de bioabono debido a los largos tiempos de retención. Los tiempos de retención de los biodigestores chinos son de 30 a 60 días, lo que representa de 1/2 a 1/3 del tiempo de retención necesario en los biodigestores hindúes para alcanzar una eficiencia similar (máximo 50% de reducción de la materia orgánica) [33].

Figura 12.

Biodigestor de tapa fija



Nota. Partes de un biodigestor de tapa fija. Tomado de: Subsecretaría de Energías Renovables Santa Fe, (s.fs. f)."CURSO OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN DE PEQUEÑA Y MEDIANA ESCALA." Disponible en:<https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/08/M%C3%B3dulo-3-Biodigesti%C3%B3n-componentes-del-sistema.pdf>.

En general, el proceso de producción de biogás en un biodigestor de tapa fija puede tomar un poco más de tiempo en comparación con los biodigestores de campana flotante o tubular, debido a su diseño y la necesidad de alcanzar el equilibrio de microorganismos anaeróbicos en el interior del sistema.

En condiciones óptimas, se estima que un biodigestor de tapa fija puede empezar a producir biogás dentro de un período aproximado de 30 a 60 días desde el inicio de la carga con materia orgánica. Durante las primeras semanas, la actividad microbiana comenzará a descomponer la materia orgánica y a generar biogás. La producción de biogás se incrementará gradualmente a medida que los microorganismos anaeróbicos se adapten y establezcan un equilibrio en el biodigestor [33].

El adecuado mantenimiento en este tipo de biodigestor abarca una serie de tareas y acciones con el objetivo de garantizar un funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil. Este

mantenimiento consiste en [46]:

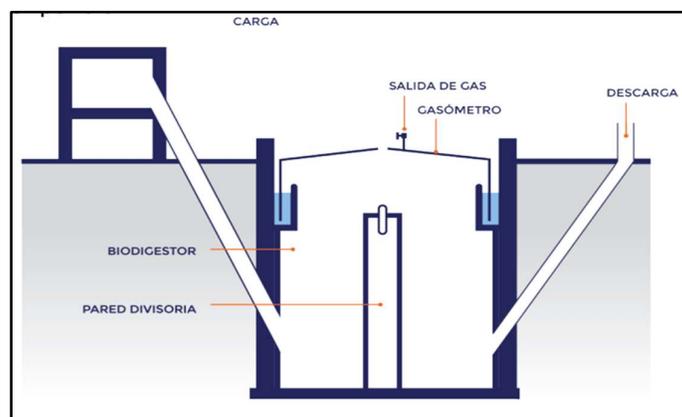
- Requiere una atención especial al sellado de la tapa para evitar fugas de biogás y líquido. Es importante verificar periódicamente la estanqueidad y realizar reparaciones si es necesario.
- Al no contar con agitadores, es fundamental garantizar una buena mezcla de los materiales antes de su ingreso al biodigestor y durante el proceso de digestión.
- La carga y alimentación del biodigestor deben ser controladas cuidadosamente para evitar sobrecargas o fluctuaciones que puedan afectar la eficiencia del proceso.

3.4.2. *Biodigestor de campana flotante o de tipo hindú*

El biodigestor tipo hindú, también conocido como biodigestor de campana flotante, se originó en la India en la década de los 50 después de la Segunda Guerra Mundial para abastecer de biogás a los tractores. Estos biodigestores son estructuras verticales que se entierran bajo tierra y pueden construirse con ladrillos o concreto armado [47].

Figura 13.

Biodigestor de campana flotante



Nota. Partes de un biodigestor de campana flotante. Tomado de: Subsecretaría de Energías Renovables Santa Fe, (s.f. f). "CURSO OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE BIODIGESTIÓN DE PEQUEÑA Y MEDIANA ESCALA." Disponible en: <https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/08/M%C3%B3dulo-3-Biodigesti%C3%B3n-componentes-del-sistema.pdf>.

El proceso de carga de materia orgánica en el biodigestor tipo hindú se realiza una vez al día por gravedad a través de tubos de PVC. El volumen de carga depende del tiempo de

fermentación o retención deseado. Si se mantienen las condiciones de operación adecuadas, el biodigestor producirá una cantidad diaria relativamente constante de biogás [47], [48].

En la parte superior del sistema, el biodigestor tipo hindú cuenta con un gasómetro y una campana flotante. La campana flotante puede ser de acero inoxidable o plástico y cumple la función de almacenar el biogás generado, el cual posteriormente será distribuido para su uso, mientras que el residuo resultante, conocido como bioabono (Biol y biosol), también se puede ser aprovechado como fertilizante [47].

La construcción de un biodigestor tipo hindú es relativamente sencilla y su vida útil promedio se estima en alrededor de 20 años, siempre y cuando se realice un mantenimiento adecuado [48] [47]. El tiempo que tarda un biodigestor de campana flotante en empezar a producir biogás también puede variar según varios factores, incluyendo el diseño del biodigestor, la carga inicial de materia orgánica, la temperatura ambiente y otros factores ambientales. Sin embargo, en condiciones óptimas, generalmente se estima que un biodigestor de campana flotante puede comenzar a producir biogás en un plazo de aproximadamente 20 a 30 días desde el inicio de la carga con materia orgánica [33].

El mantenimiento en este tipo de biodigestor implica una serie de tareas y acciones específicas para asegurar un funcionamiento óptimo y prolongar su vida útil. Entre las actividades más importantes se encuentran [49]:

- Requiere un monitoreo constante del nivel del líquido y de la campana flotante para mantener un control adecuado de la presión del biogás y prevenir fugas.
- Es importante verificar y mantener en buen estado los mecanismos de flotación y sellado de la campana para asegurar su correcto funcionamiento.
- Al igual que con otros biodigestores, es esencial mantener limpio el biodigestor y controlar la presencia de vegetación o malezas alrededor del mismo.

3.4.3. Biodigestor tipo Taiwanés o tubular

El biodigestor tipo taiwanés, también conocido como biodigestor de bolsa o tubular, se originó en Taiwán en 1960 cuando ingenieros buscaban una alternativa económica para la fabricación de biogás. Inicialmente, se desarrolló un biodigestor utilizando materiales como nylon y neopreno, pero con el tiempo se descubrió que esta idea resultaba costosa [48] [47].

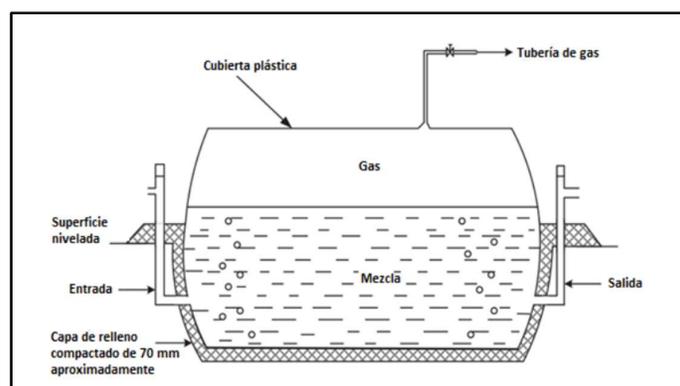
A lo largo de los años, este tipo de biodigestor fue mejorando y se cambiaron los materiales de construcción por otros más económicos y efectivos, como el polietileno y los tubos de PVC. El biodigestor de bolsa tiene una forma alargada y en la parte superior se encuentra una bolsa donde se almacena el gas. La entrada y la salida se encuentran en la misma superficie de la

bolsa y generalmente son tubos largos que pueden estar enterrados o colocados sobre el suelo [48] [47].

Una característica importante de este biodigestor es que, cuando se carga con los residuos orgánicos, toda la mezcla líquida dentro del biodigestor se mueve hacia la salida, lo que provoca una forma de agitación. Esto ayuda a mejorar la descomposición de la materia orgánica y la producción de biogás [48] [47].

Figura 14.

Biodigestor tubular



Nota. La figura muestra las partes de un biodigestor tubular. Fuente: Saavedra, R., M. Alamo and M. Marcelo, 2017). "DISEÑO DE UN BIODIGESTOR TUBULAR PARA ZONAS RURALES DE LA REGIÓN PIURA." Disponible en: https://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2017/12/Garcia-Rafael_biodigestor.pdf.

La construcción de un biodigestor tipo taiwanés es relativamente sencilla y económica. Sin embargo, tiene algunas desventajas. Su vida útil es corta, generalmente es necesario construir uno nuevo cada tres años. Además, es un sistema delicado y puede sufrir roturas debido a las condiciones climáticas del lugar donde se instala, así como por la influencia de acciones de animales o incluso del ser humano [48] [47].

A pesar de sus limitaciones, el biodigestor tipo taiwanés ha demostrado ser una opción viable en áreas donde se requiere una solución económica y de fácil construcción para la generación de biogás a partir de residuos orgánicos [48] [47].

El tiempo que tarda un biodigestor tubular en comenzar a producir biogás puede variar según varios factores, incluyendo el diseño del biodigestor, la cantidad y tipo de materia orgánica cargada, la temperatura ambiente, y el tamaño del biodigestor. Sin embargo, en condiciones óptimas, generalmente se estima que un biodigestor tubular puede empezar a producir biogás en un plazo de aproximadamente 20 a 40 días desde el inicio de la carga con materia orgánica

[50].

El mantenimiento en este tipo de biodigestor consiste en [51]:

- Revisión de los agitadores o mezcladores para asegurar una distribución homogénea de los materiales y mejorar la eficiencia de la digestión anaeróbica.
- Es importante mantener limpias las tuberías y conexiones para evitar obstrucciones y permitir un flujo continuo del sustrato.
- Se deben inspeccionar periódicamente las condiciones de las tuberías y sellos para evitar fugas de biogás o líquido.
- El control de la temperatura y el pH es crucial para mantener las condiciones óptimas para la actividad microbiana.

3.5. Matriz de comparación y selección de biodigestor

Se realizaron evaluaciones mediante un cuadro comparativo de tres tipos de biodigestores, analizando nueve características que abarcan desde el proceso de puesta en marcha hasta los mantenimientos futuros de cada reactor. Los aspectos evaluados son los siguientes:

- Material de construcción
- Alimentación
- Rendimiento (m^3 de biogás/kg de estiércol)
- Vida útil
- Utilización de espacio
- Mantenimiento

La evaluación se realiza mediante la asignación de una nota a cada aspecto a medir, utilizando un rango del 2 al 5, donde cada nota se clasifica de la siguiente manera:

- 2: Insatisfactorio
- 3: Poco Satisfactorio
- 4: Medianamente Satisfactorio
- 5: Satisfactorio

Cada aspecto se califica dentro de este rango para determinar el desempeño de los diferentes tipos de biodigestores en estudio.

Tabla 5.

Matriz comparativa de biodigestores

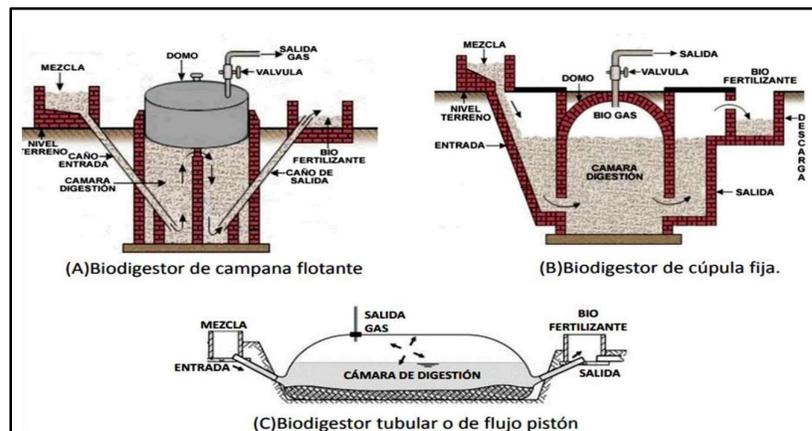
Características	Biodigestor Tubular	Calificación	Biodigestor de Campana Flotante	Calificación	Biodigestor de Tapa Fija	Calificación
Material de Construcción	PVC con geomembrana	5	Acero inoxidable	3	Cemento	3
Alimentación	Continua o discontinua	5	Discontinua	3	Discontinua	3
Tiempo de retención (días)	20-40	4	40-60	2	40-60	2
Rendimiento (m ³ /kg)	0,02-0,04	4	0,03-0,06	5	0,02-0,04	1
Vida útil	10-15 años	2	15-20 años	5	15-20 años	5
Utilización de Espacio	Requiere espacio horizontal	5	Requiere espacio horizontal	5	Requiere espacio horizontal	5
Mantenimiento	3-6 meses	4	1-2 meses	2	3-6 meses	4
TOTAL	29		25		23	

Nota. Matriz comparativa de los 3 tipos de biodigestores más comunes y estudiados en este proyecto.

Los biodigestores mencionados previamente cumplen con el objetivo principal del equipo al obtener biogás y biofertilizante. Cada biodigestor presenta sus ventajas y desventajas, las cuales se han reflejado en la matriz de comparación. En el momento de la implementación se requeriría un análisis más detallado, considerando el propósito específico del biodigestor requerido, las condiciones del terreno donde se implementará, el presupuesto disponible y el alcance del proyecto.

Figura 15.

Tipos de biodigestores



Nota. En la figura se muestran los tipos de biodigestores hablados en el proyecto. Tomado de: Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático, "MANUAL DE BIOGÁS Conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos." Disponible en: https://www.gba.gov.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf.

En este contexto, el biodigestor tubular sobresale al cumplir con todas las características requeridas y ofrece mejores resultados cuantitativos en comparación con el biodigestor de campana flotante y tapa fija. Es importante destacar que la elección del biodigestor adecuado dependerá de las particularidades de cada proyecto y las metas a alcanzar. Es recomendable realizar una evaluación minuciosa de las opciones disponibles para asegurar la selección del biodigestor que mejor se ajuste a las necesidades específicas y maximice los beneficios obtenidos.

El biodigestor tubular destaca como la opción más idónea según las características de la matriz comparativa, al cumplir completamente con todos los requisitos y objetivos establecidos. Además de su eficiencia, este tipo de biodigestor ofrece ventajas económicas tanto en su instalación inicial como en los mantenimientos a largo plazo. La producción constante y rápida de biogás garantiza un suministro continuo y eficiente. Además, su estructura permite realizar adaptaciones específicas de forma fácil y económica, si es necesario. En general, el biodigestor tubular se presenta como una alternativa sobresaliente que reúne todas las cualidades necesarias para lograr una gestión efectiva y rentable del proceso de obtención de biogás y biofertilizante.

3.5.1. Estimación del volumen del biodigestor

La cantidad de cerdos que se pueden alojar en los corrales puede variar significativamente, oscilando desde un mínimo de 8 hasta un máximo de 60 cerdos. También se debe tener presente que un cerdo puede generar entre 2 y 6 kg de estiércol en un día [77].

Esta amplia variabilidad se debe a diversos factores, como el tamaño del corral, el sistema de producción utilizado, las regulaciones locales y los estándares de bienestar animal. En corrales más pequeños o en sistemas de producción extensiva, se tiende a alojar menos cerdos para proporcionarles más espacio y libertad de movimiento. Por otro lado, en sistemas de producción intensiva, donde se busca maximizar la eficiencia y el rendimiento, se puede alojar un mayor número de cerdos en un espacio determinado.

Es fundamental tener en cuenta que, independientemente de la cantidad de cerdos por corral, es crucial garantizar condiciones óptimas de bienestar y salud para los animales. Esto implica proporcionarles un entorno adecuado, asegurar suficiente espacio para que puedan moverse y descansar cómodamente, así como brindarles una dieta balanceada y agua limpia.

Teniendo en cuenta información que se presentó anteriormente, se puede identificar el volumen de carga diaria como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6.*Volumen de estiércol*

	Valor mínimo	Valor máximo
Cantidad de cerdos por corral	8	60
kg de estiércol x cerdo/día	2	6
Cantidad total de estiércol por día (kg)	16	360
Densidad (kg/m ³) *	1,014	
Volumen de estiércol diario (m ³)	0,016	0,355

Nota. Cálculo de volumen mínimo y máximo de estiércol diario disponible, considerando el valor mínimo de cerdos con el valor min de kg de estiércol diario, y el valor máximo de cerdos y de kg de estiércol al día. Tomado de: Dirección General de Desarrollo Rural, 2010."Uso de los estiércoles en la fertilización agrícola, y su justificación en relación con la normativa aragonesa." Disponible en: https://digital.csic.es/bitstream/10261/31118/1/YagueRM_InfTecn_2010a.pdf.

El biodigestor recibe una cantidad diaria de estiércol que puede variar desde 0,016 m³ hasta un máximo de 0,355 m³, a esto se agrega la cantidad de agua necesaria, en una relación de 1:1, para disolver el estiércol y crear el sustrato óptimo para la digestión anaeróbica. En consecuencia, la carga diaria total del biodigestor puede oscilar entre 0,032 m³ y 0,710 m³.

Para determinar el volumen del biodigestor, es necesario calcular el volumen total de material que será procesado durante el tiempo de retención hidráulica. Este tiempo de retención hidráulica, según se indica en el documento "Curso de operación y mantenimiento de sistemas de biodigestión de pequeña y mediana escala", es de 40 días, ya que Colombia cuenta con clima tropical. El cálculo del volumen del biodigestor se realiza multiplicando la carga diaria de material (estiércol y agua) por el tiempo de retención hidráulico [46].

A continuación, se presenta una tabla que muestra los valores mínimos y máximos del volumen del biodigestor:

Tabla 7.*Volumen de biodigestor*

	Biodigestor tubular		Biodigestor de campana flotante		Biodigestor de tapa fija	
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor mínimo	Valor máximo	Valor mínimo	Valor máximo
Volumen de carga diaria (m ³)	0,032	0,710	0,032	0,710	0,032	0,710
Tiempo de retención (días)	20	40	40	60	40	60
Volumen del biodigestor (m ³)	0,63	28,40	1,26	42,60	1,26	42,60
Volumen del biodigestor (l)	630	28.403	1.262	42.603	1.262	42.603

Nota. Cálculo de volumen mínimo y máximo del biodigestor requerido.

El biodigestor tubular presenta una capacidad que oscila entre un volumen mínimo de 0,63 m³ y un máximo de 28,40 m³. Por su parte, tanto el biodigestor de campana flotante como el de tapa fija requieren un volumen que varía entre 1,26 m³ y 42,60 m³ para la carga de estiércol calculada.

Para determinar la cantidad de biogás generada a partir del día 40 de retención, resulta crucial tener en cuenta tanto el rendimiento como la cantidad diaria de kilogramos de estiércol recolectado en cada tipo de biodigestor. Esto permitirá estimar el tamaño adecuado del tanque de almacenamiento de biogás. Es importante tener presente que, una vez transcurrido el período de retención, el biogás producido comenzará a ser consumido a lo largo del día. Cualquier exceso de biogás no utilizado deberá ser eliminado mediante la quema controlada.

Tabla 8.

Cantidad de biogás

	Biodigestor tubular		Biodigestor de campana flotante		Biodigestor de tapa fija	
	<i>Valor mínimo</i>	<i>Valor máximo</i>	<i>Valor mínimo</i>	<i>Valor máximo</i>	<i>Valor mínimo</i>	<i>Valor máximo</i>
Total estiércol por día (kg)	16	360	16	360	16	360
Rendimiento (m³ biogás/kg estiércol)	0,02	0,04	0,03	0,06	0,02	0,04
Cantidad de biogás por día (m³)	0,320	14,4	0,48	21,6	0,320	14,4

Nota. Cálculo de volumen mínimo y máximo de biogás por ciclo (40 días).

Una vez se ha realizado el tratamiento del biogás, es de gran importancia determinar la cantidad de metano que puede ser aprovechada como fuente de energía. El contenido de metano en el biogás generalmente se encuentra en un rango que oscila aproximadamente entre el 50% y el 70%. Sin embargo, este porcentaje puede variar dependiendo del tipo de materia orgánica utilizada, la eficiencia del proceso de digestión anaeróbica y otros factores inherentes al sistema [33].

Tabla 9.

Cantidad de metano

	Biodigestor tubular		Biodigestor de campana flotante		Biodigestor de tapa fija	
	<i>Valor mínimo</i>	<i>Valor máximo</i>	<i>Valor mínimo</i>	<i>Valor máximo</i>	<i>Valor mínimo</i>	<i>Valor máximo</i>
Cantidad de biogás por día (m³)	0,320	14,4	0,48	21,6	0,320	14,4
%Metano	50	70	50	70	50	70

	Biodigestor tubular		Biodigestor de campana flotante		Biodigestor de tapa fija	
	Valor mínimo	Valor máximo	Valor mínimo	Valor máximo	Valor mínimo	Valor máximo
Cantidad de metano por día (m ³)	0,16	10,08	0,24	15,12	0,16	10,08

Nota. Cálculo de volumen mínimo y máximo de metano proveniente del biogás.

Los tres tipos de biodigestores pueden generar una cantidad de metano que oscila entre 0,16 y 10,08 m³ por día. La distinción radica en que el biodigestor tubular liberará este biogás después de 40 días de retención, mientras que los otros dos tipos lo harán después de 60 días.

El metano resultante puede ser aprovechado como una valiosa fuente de energía para la generación de electricidad o calor, o bien ser refinado y utilizado como combustible en vehículos u otros usos industriales y domésticos. Garantizar un alto contenido de metano en el biogás es de vital importancia para maximizar su potencial como una fuente de energía renovable de gran impacto.

Tabla 10.

Biofertilizante líquido y seco

	Valor mínimo		Valor máximo	
Cantidad estiércol y agua por día (kg)	32		720	
%Bioabono seco	30	10	30	10
kg bioabono seco por día	9,6	3,2	216	72
kg bioabono seco por mes	288	96	6.480	2.160
%Bioabono líquido	70	90	70	90
kg bioabono líquido por día	22,4	28,8	504	648
kg bioabono líquido por mes	672	864	15.120	19.440
TOTAL BIOABONO MENSUAL	960		21.600	

Nota. Cálculo de bioabono producido en un mes. Tomado de: SISTEMA BIOBOLSA, "Manual de BIOL." Disponible en: https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/SISTEMA%20BIOBOLSA%20s.f.%20Manual%20del%20BIOL.pdf.

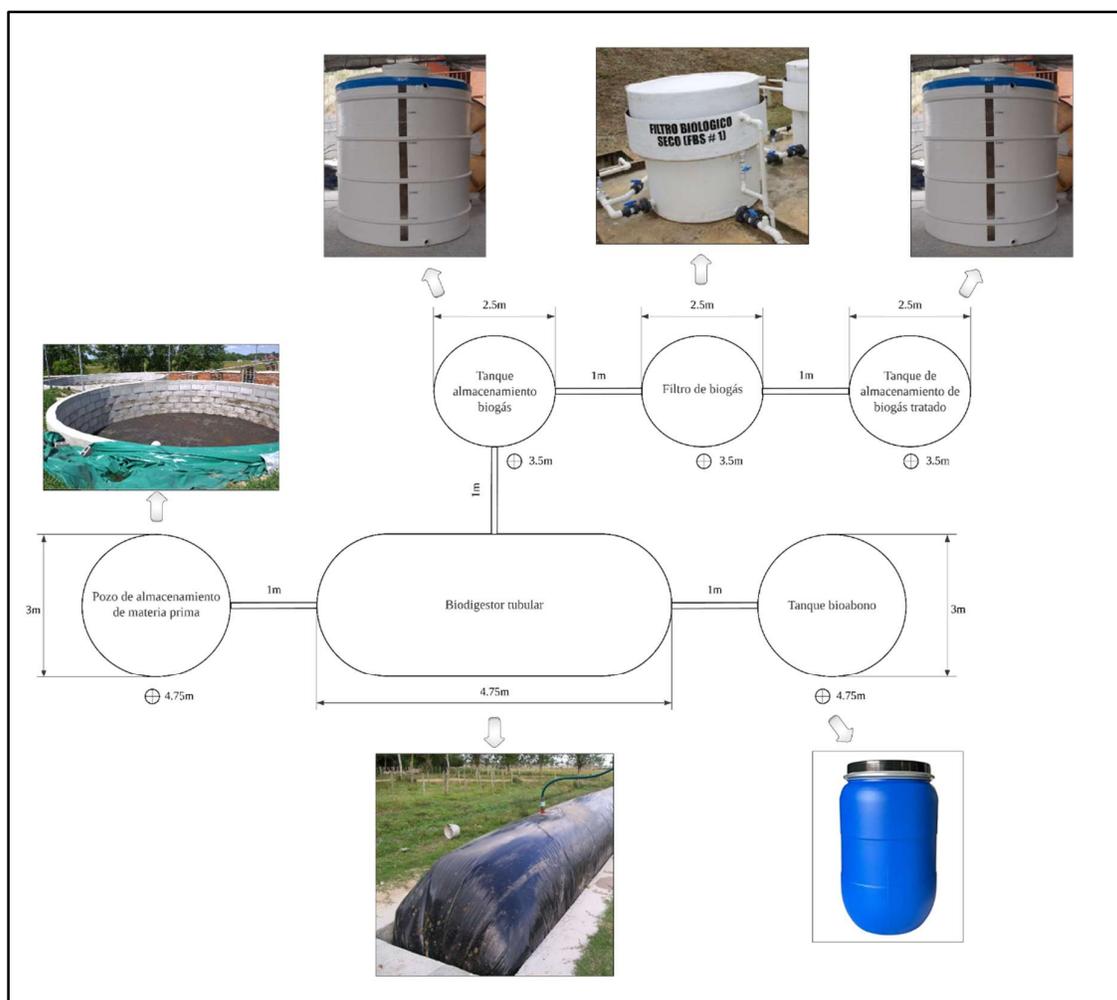
Para calcular la cantidad de bioabono que se puede obtener de los tres tipos de biodigestores, se consideró la posibilidad de producir entre un 10% y un 30% de bioabono seco, siendo el resto bioabono líquido. Al analizar estas fracciones, se observó que los tres biodigestores tienen la capacidad de generar cantidades equivalentes de bioabono, esto se debe a que todos tienen la misma carga de kg de agua y estiércol (0,032 m³ - 0,710 m³), siendo la única diferencia el momento en que estará disponible debido a sus distintos tiempos de retención. El valor de 960

kg corresponde al bioabono generado a partir de los kg de estiércol producidos por 8 cerdos en un día, mientras que 21.600 kg se refiere a 60 cerdos. Es importante destacar que este bioabono está compuesto por una fracción líquida y otra sólida, ambas adecuadas para su venta y uso como fertilizantes.

A continuación, se presenta el plan de ubicación para los tres tipos de biodigestores, en donde las dimensiones de todos los equipos se han determinado considerando la carga, la cantidad máxima de biogás y bioabono que pueden generarse, tal como se calculó previamente.

Figura 16.

Plot plan montaje de biodigestor tubular

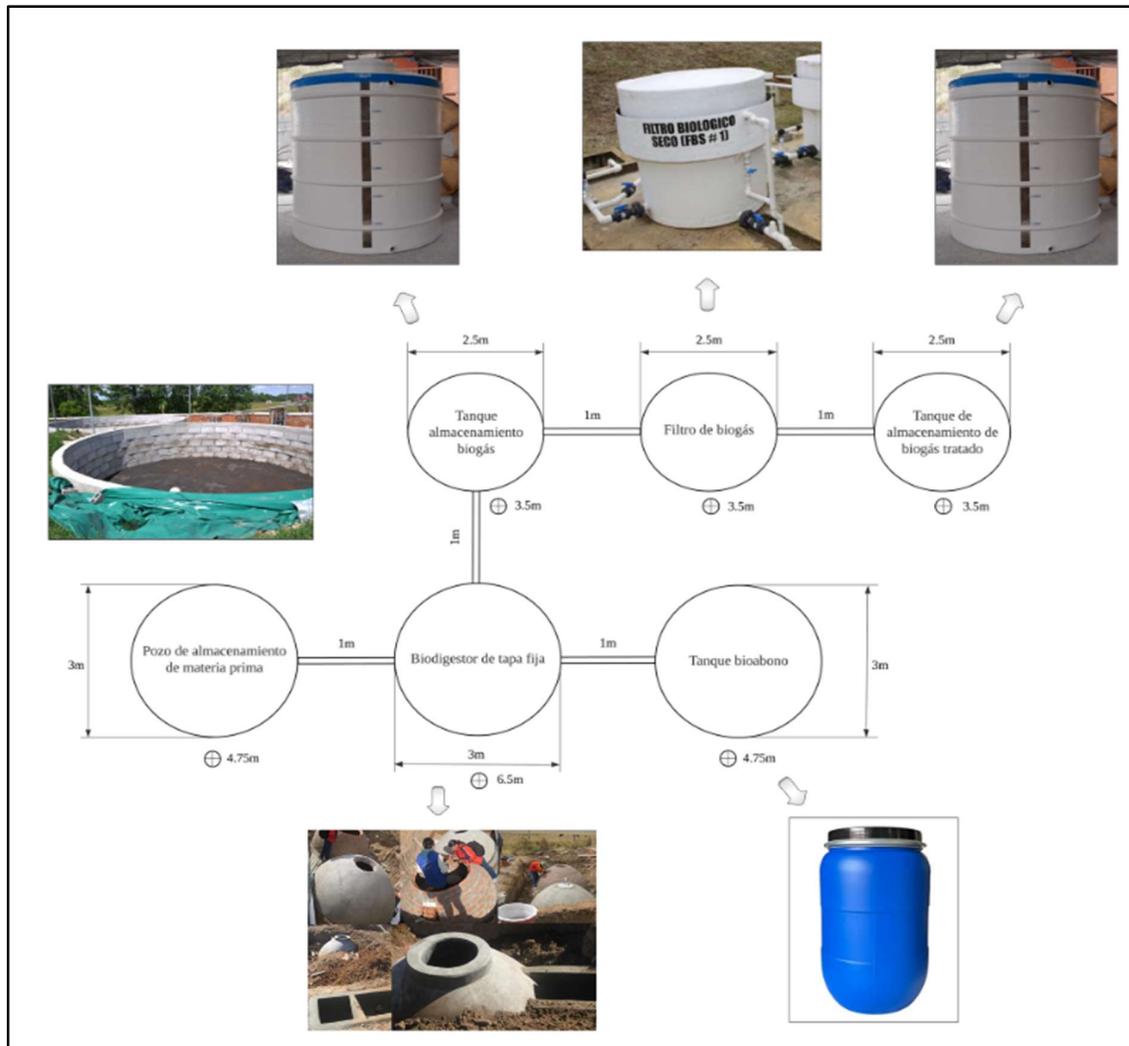


Nota. En la figura se muestran las dimensiones del sistema de biodigestión con un biodigestor tubular.

Con base en las dimensiones de los componentes del sistema de biodigestión con biodigestor tubular, se requiere un espacio de 82,88 m² para lograr la producción diaria de 14,4 m³ de biogás y la generación mensual de 21.600 kg de bioabono.

Figura 17.

Plot plan montaje de biodigestor de tapa fija

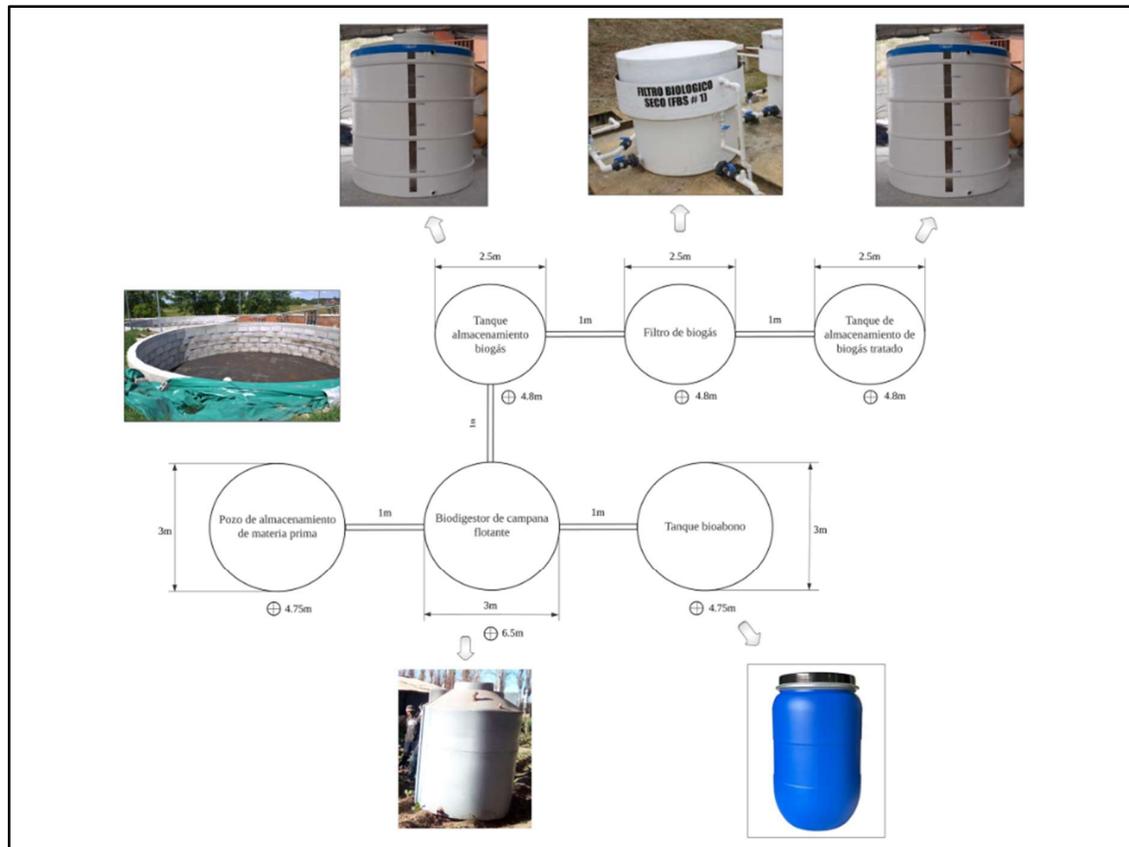


Nota. En la figura se muestran las dimensiones del sistema de biodigestión con un biodigestor de tapa fija.

Basándonos en las dimensiones de los componentes del sistema de biodigestión, tanto para el biodigestor de tapa fija como para el de campana flotante, se requiere un área de 71,5 m². Sin embargo, existe una diferencia en la producción diaria de biogás entre ambos: el biodigestor de tapa fija produce 14,4 m³, mientras que el de campana flotante produce 21,6 m³. En cuanto a la generación mensual de bioabono, es la misma para ambos, alcanzando los 21.600 kg.

Figura 18.

Plot plan montaje de biodigestor de campana flotante



Nota. En la figura se muestran las dimensiones del sistema de biodigestión con un biodigestor de campana flotante.

Por último, se destaca que el biodigestor tubular presenta un área mayor en comparación con el biodigestor de tapa fija y el de campana flotante. Sin embargo, es importante considerar que estos dos últimos tipos de biodigestores son de configuración vertical, lo que implica la necesidad de excavar un espacio adecuado en el suelo para su instalación. Es relevante resaltar que, a pesar de su mayor superficie, el diseño del biodigestor tubular promueve una distribución interna más eficiente de la presión y una mejor mezcla de los materiales en descomposición. Esto podría traducirse en una mayor eficacia en la generación de biogás. En última instancia, la elección entre estos distintos tipos de biodigestores dependerá de las necesidades específicas de cada proyecto, considerando factores como la disponibilidad de espacio, presupuesto, la cantidad de material orgánico a procesar y las condiciones ambientales.

4. ESTUDIO FINANCIERO

El análisis financiero del proyecto se basará en las características principales obtenidas en el estudio técnico detallado en las secciones anteriores. Con base en estas consideraciones, se llevará a cabo un análisis para comparar tres tipos de biodigestores, a través de la construcción de un flujo de caja que incluirá, como mínimo, los ahorros generados por el proyecto, la inversión requerida, los costos de operación y mantenimiento, así como otros gastos y ganancias relevantes. De cada alternativa se obtendrán los siguientes resultados:

- Costos-Ahorros.
- Flujo de caja.
- VPN – TIR – Pay Back.

4.1. Evolución de los precios al consumidor (IPC)

El Índice de Precios al Consumidor (IPC), tiene como propósito principal cuantificar la fluctuación en el costo promedio de una canasta representativa de bienes y servicios comúnmente adquiridos por los hogares, en comparación con un período de referencia. En Colombia, el encargado de llevar a cabo este análisis mensual es el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [52].

La inflación se refiere al cambio porcentual del IPC entre dos momentos en el tiempo. Específicamente, la inflación anual se determina al contrastar el IPC de un mes particular con el mismo mes del año precedente.

El análisis de la variación anual del Índice de Precios al Consumidor (IPC) entre los años 2021 y 2023 revela un aumento constante. En el 2021, la tasa de inflación se situó en un 3,63%; posteriormente, se observó un incremento significativo en el 2022, llegando a un 9,67%. Las proyecciones indican un incremento aún más marcado para el 2023, con una estimación de inflación de aproximadamente un 12,13%. Estas modificaciones pueden estar vinculadas a diversos factores económicos y externos que ejercen influencia sobre los precios de bienes y servicios [53].

En el contexto del presente año, se está considerando una tasa de inflación anual del 5,5%. Es importante señalar que prever el comportamiento del IPC implica tomar en cuenta múltiples variables, que no permiten asegurar una certeza absoluta en dichas estimaciones.

4.2. Evolución de los precios al productor (IPP)

El Índice de Precios al Productor (IPP) se trata de un indicador vital para rastrear la evolución de los precios de venta en la primera etapa de comercialización o distribución de bienes en la economía. En esta situación, se analiza el IPP que evalúa la variación de precios al salir de la fábrica para una diversidad de productos, englobando tanto bienes manufacturados como los de industrias extractivas y el sector energético [53].

Desde el año 2021, el Índice de Producción Industrial (IPP) ha manifestado un incremento continuo. Durante ese año, se registró un aumento del 3,63%, seguido de un notorio crecimiento en 2022, que alcanzó un índice del 9,67%. Las estimaciones para el 2023 auguran un crecimiento aún más destacado, con una proyección de aumento del 12,13% [54]. Estos datos reflejan una inequívoca tendencia ascendente en la actividad industrial, posiblemente influida por factores económicos y la demanda de productos industriales en este período.

En el contexto actual, se contempla una tasa de inflación anual del 6%. Es crucial resaltar que anticipar el comportamiento del IPP implica tomar en cuenta múltiples variables, lo que dificulta asegurar una certeza total en tales estimaciones.

4.3. Comportamiento de las tarifas reguladas de gas natural

Los elementos de suministro, transporte y comercialización se obtuvieron del recibo más reciente de Gas Natural. En relación al componente de suministro (Gm), se procedió a su proyección de acuerdo al porcentaje de crecimiento anual del IPP. Para el componente de Comercialización (Co), se llevó a cabo una proyección basada en el porcentaje de incremento anual del IPC. Respecto al componente de transporte (Tm), se determinó su cálculo a partir de patrones históricos y su evolución.

Se comprende que, para lograr una aproximación más precisa a los precios del gas natural, es necesario llevar a cabo un estudio por región, ya que los contratos negociados por los comercializadores dependen de la disponibilidad y el transporte de gas natural en el lugar donde se realizará la comercialización. Sin embargo, se tomaron en cuenta los datos proporcionados en el tarifario del grupo Vanti para el mercado regulado, que ofrecen una idea de los precios. Es importante destacar que el grupo Vanti posee una participación nacional del 60% [27], en comparación con otros comercializadores.

La fundamentación de la indexación de los precios de la energía y el gas al crecimiento del IPP se basa en diversas razones que aportan claridad y coherencia a esta estrategia. En primer lugar,

el IPP se erige como un indicador que captura las variaciones en los precios de los productos en sus etapas iniciales de producción. Esta conexión directa con los costos de manufactura y distribución de la energía y el gas se alinea con el propósito de ajustar los precios de manera coherente con las fluctuaciones en dichos costos, garantizando así un equilibrio entre los ingresos y los gastos de las empresas proveedoras.

En contraposición, la indexación al IPC añade otra dimensión a la ecuación. A diferencia del IPP, el IPC se enfoca en medir las variaciones en los precios de bienes y servicios consumidos por las personas. Estos precios pueden estar influenciados por factores humanos, como la mano de obra y otros elementos administrativos o técnicos relacionados con la producción y la distribución. La indexación al IPC resulta relevante en este contexto, ya que refleja las tendencias en los costos que están más directamente vinculados a las condiciones de vida de las personas y a los patrones de consumo. Por lo tanto, la indexación a ambos indicadores, el IPP y el IPC, permite un enfoque integral y equilibrado en la formación de precios de la energía y el gas, considerando tanto los aspectos de producción como los impactos en el bienestar de los consumidores.

Basándose en los supuestos anteriores, se efectuó una estimación y proyección de todos los componentes desde diciembre de 2022 hasta diciembre de 2028, a través de su indexación anual.

Tabla 11.

Proyección de componentes de tarifas de uso térmico gas natural

Año	Gm [\$/MBTU]	Tm [\$/MBTU]	Co [\$/MBTU]	D [\$/MBTU]	Tarifa [\$/MBTU]	Tarifa [\$/m ³]
2022	\$4,39	\$1,40	\$0,26	\$1,31	\$7,35	\$1.058
2023	\$5,27	\$1,42	\$0,28	\$1,57	\$8,54	\$1.229
2024	\$5,47	\$1,44	\$0,29	\$1,63	\$8,83	\$1.271
2025	\$5,58	\$1,46	\$0,30	\$1,66	\$9,01	\$1.296
2026	\$5,70	\$1,48	\$0,30	\$1,70	\$9,18	\$1.321
2027	\$5,81	\$1,50	\$0,31	\$1,73	\$9,36	\$1.347
2028	\$5,93	\$1,52	\$0,32	\$1,77	\$9,54	\$1.373

Nota. La tabla muestra el importe correspondiente a la tarifa de gas del año 2022 -2028 de un contrato de suministro de Gas Natural, indexado al IPP anual. Tomado de: Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia. Disponible en: https://porkcolombia.co/wp-content/uploads/2020/06/Guia-Biogas-sector-porcicultor_Porkcolombia.pdf.

La tabla refleja que el costo de la tarifa del gas para el último año de un contrato de suministro de Gas Natural destinado al uso térmico es de 7.35 US\$/MBTU, mientras que se proyecta una tarifa de 9.54 US\$/MBTU para el año 2028 [27]. Estos valores han sido convertidos a \$COP/m³, utilizando una tasa de cambio de referencia de \$4.000 COP, para este análisis. Sin embargo, es importante destacar que dichos precios podrían experimentar variaciones en función de las

condiciones macroeconómicas globales.

Es importante resaltar que las formas de contratación para el suministro de gas natural al finalizar el año se basan principalmente en opciones en firme, cuya proporción varía según el tipo de usuario. En este caso específico, prevalece una modalidad en firme del 80% [28], la cual es común en el mercado. Bajo esta modalidad, el comercializador asume la responsabilidad de garantizar el suministro del 80% del gas natural estipulado en el contrato con el usuario final. En contraste, el 20% restante se considera variable y está sujeto a los requisitos de otros usuarios en la misma zona.

4.4. Estimación del CAPEX

Para llevar a cabo la implementación del Sistema de Producción de Biogás y Abono, se ha realizado una investigación exhaustiva sobre los costos relacionados con la adquisición de los equipos necesarios, así como el montaje y suministro de las redes que constituyen este sistema. En este contexto, las redes se refieren a las instalaciones que facilitan la interconexión de los diversos equipos y conectan el sistema a la planta. Los valores presentados en la tabla se derivan de un análisis técnico que estimó los rangos de costos para los diferentes componentes.

Es fundamental subrayar que estos valores son estimados y están sujetos a posibles variaciones debido a múltiples factores. Los costos pueden variar según las condiciones específicas de cada proyecto, como la ubicación geográfica, el terreno, la disponibilidad de materiales, la mano de obra local y otros elementos cambiantes. Por lo tanto, aunque los valores proporcionados ofrecen una idea general de la inversión necesaria para cada tipo de biodigestor, es esencial reconocer que los costos reales pueden divergir según las circunstancias individuales de implementación.

La tabla se basa en una variedad de tesis y estudios técnicos que consideran los precios actuales de los elementos requeridos para la implementación de los biodigestores. Estos estudios ofrecen una visión realista de los costos en el contexto actual del mercado. Además de las tesis mencionadas, se han tenido en cuenta otros estudios relevantes que contribuyen a la precisión de los costos presentados:

- *“Estudio de viabilidad en la aplicación de un biodigestor anaerobio para la producción de energía en las instituciones educativas ubicadas en las Zonas No Interconectadas de Colombia”*. Alejandro Guerrero Vargas, Laura Daniela Carvajal Castañeda & Julián Enrique Dávila Pertuz. (2021).
- *“Evaluación de la producción de biogás mediante digestión anaerobia a partir de lodos*

residuales de la PTAR Villas del Nuevo Siglo, en la Mesa - Cundinamarca”. Lina Rocío Baquero Cadena & Cindy Melissa Murillo Malpica. (2019).

- “*Guía para el tratamiento de las aguas residuales porcinas*”. Lina María Cardoso Vigueros et al. (2021).
- “*Biodigestores Familiares Manual de Instalación*”. GTZ-Energía. (s.f).

Tabla 12.

Estimación de Capex para cada biodigestor

Volumen (m ³)	1-000 - 30.000	1.500 - 45.000	1.500 - 45.000
Partes del Biodigestor	Polietileno (COP)	Reactor de Campana (COP)	Tapa Fija (COP)
Reactor	2.000.000 - 50.000.000	2.500.000 - 70.000.000	3.000.000 - 85.000.000
Tuberías y Conexiones	3.500.000 - 10.000.000		
Tanque de Mezcla	5.000.000 - 7.000.000		
Gasómetro	2.000.000 - 3.000.000		
Sistema de Agitación Mecánica	2.500.000 - 3.500.000		
Sistema de Calefacción Solar	1.500.000 - 2.500.000		
Sistema de recolección	1.000.000 - 3.000.000		
Sistema de Monitoreo y Control	1.000.000 - 5.000.000		
Bomba Hidráulica	1.500.000 - 10.000.000		
Válvulas y Accesorios	1.000.000 - 8.000.000		
Filtros y Trampas	700.000 - 1.000.000		
Construcción Civil	3.000.000 - 7.000.000		
Mano de Obra (Instalación)	2.000.000 - 5.000.000		
TOTAL (\$COP)	27.700.000 - 126.000.000	28.200.000 - 151.000.000	27.200.000 - 166.000.000
TOTAL (\$USD) TRM: \$4.000 COP	6.925 - 31.500	7.050 - 37.750	6.800 - 41.500

Nota. La tabla proporciona información sobre el CAPEX para los tres tipos de biodigestores.

Los tres biodigestores analizados comparten similitudes en términos de capacidad de almacenamiento y algunos componentes como tuberías y accesorios. Sin embargo, la principal diferencia en los costos radica en la inversión requerida para el reactor. El primer biodigestor, con capacidad de 1.000 a 30.000 litros y fabricado en polietileno, tiene un rango de costos entre 2.000.000 y 50.000.000 COP. El segundo, que cuenta con un reactor de campana y puede almacenar de 1.500 a 45.000 litros, presenta un rango similar de 2.500.000 a 70.000.000 COP. Por último, el tercer biodigestor, que emplea una tapa fija y también almacena de 1.500 a 45.000 litros, tiene costos que oscilan entre 1.500.000 y 85.000.000 COP. La diferencia clave en los costos se atribuye al tipo de reactor utilizado, lo cual se fundamenta en el estudio técnico debido a su influencia en la eficiencia del sistema.

4.5. Estimación del OPEX

La relación entre los costos operativos (OPEX) y la inversión inicial en capital (CAPEX) en el contexto de un biodigestor puede variar considerablemente debido a diversos factores, como el tamaño del biodigestor, la tecnología utilizada, el tipo de residuos orgánicos procesados y las condiciones específicas de operación. No existe una proporción universal estándar, ya que cada proyecto puede presentar su propia estructura de costos.

En términos generales, la inversión inicial en capital (CAPEX) abarca los gastos relacionados con la construcción y puesta en marcha del biodigestor, incluyendo la adquisición de equipos, infraestructura, diseño, permisos y otros desembolsos vinculados a la instalación inicial. Por otro lado, los costos operativos (OPEX) se refieren a los gastos recurrentes de operación y mantenimiento durante la vida útil del biodigestor, que engloban costos de energía, mano de obra, mantenimiento, suministros y otros gastos operativos.

Frecuentemente, los costos operativos anuales (OPEX) pueden representar un porcentaje importante de la inversión inicial en capital (CAPEX). No obstante, la proporción exacta varía y depende de múltiples factores específicos del proyecto. En algunos casos, los costos operativos (OPEX) pueden ser considerablemente más bajos que la inversión inicial en capital (CAPEX), mientras que en otros proyectos pueden estar más cercanos en términos porcentuales. La relación entre los costos operativos (OPEX) y la inversión inicial en capital (CAPEX) es una consideración crucial en la evaluación económica y financiera de un proyecto de biodigestor. Los encargados del desarrollo y la operación deben analizar minuciosamente estos costos para evaluar la viabilidad y la rentabilidad a largo plazo de la instalación y operación del biodigestor.

Tabla 13.

Costos de mantenimiento por la vida útil del biodigestor

Indicadores	Tubular	Campana	Tapa Fija
Ciclo de Vida (años)	10	15	15
Mantenimiento (\$USD)	\$2.077.50 - \$9.450	\$2.115 - \$11.325	\$2.040 - \$12.450
Mantenimiento (\$USD/año)	\$207,75 - \$945	\$141 - \$755	\$136 - \$830
Mantenimiento (\$COP/año)	831.000 - 3.780.000	564.000 - 3.020.000	544.000 - 3.320.000

Nota. La tabla muestra los costos operacionales con respecto al ciclo de vida de los Biodigestores, en un periodo anual.

En términos generales, como enfoque aproximado, el costo operativo anual (OPEX) para la operación y el mantenimiento de un biodigestor podría oscilar entre el 20% y el 30% de la inversión inicial en capital (CAPEX) [64], a lo largo de la vida útil del equipo. Sin embargo,

esta proporción puede variar dependiendo de las circunstancias específicas de cada proyecto, la tecnología empleada, el tipo de residuos procesados y otros factores. Un análisis detallado es esencial para obtener una estimación más precisa en cada caso.

En el caso particular de este proyecto, se considera un porcentaje del 30% de los costos operativos totales (OPEX), distribuidos a lo largo del período de vida estimado del equipo, tal como se detalla en el capítulo técnico.

Utilizando el costo de mantenimiento derivado del OPEX y considerando el ciclo de vida de cada biodigestor, se calculó el costo de mantenimiento anual. En este análisis, se destaca que el biodigestor tubular presenta un costo de mantenimiento anual más elevado. Esta diferencia se atribuye a la complejidad de su diseño, su ciclo de vida más corto y los materiales utilizados en su construcción.

4.6. Beneficios tributarios aplicados

En el año 2014, se dio un paso significativo en la dirección de impulsar y desarrollar las FNCER con la aprobación de la Ley 1715. Esta normativa no solo creó una base legal sólida para fomentar estas fuentes, sino que también delineó herramientas específicas destinadas a su promoción, así como a la investigación y desarrollo de tecnologías afines.

Es fundamental destacar que, la Ley 1715 de 2014 basa su promoción de tecnologías renovables en la conciencia ambiental. En el artículo que define el propósito de la ley, se citan expresamente los "compromisos adquiridos por Colombia en relación con energías renovables, eficiencia energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, como los establecidos mediante la ratificación del estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) por medio de la Ley 1665 de 2013". Esto refuerza el mensaje acerca de la importancia de las energías renovables para Colombia, no solo por sus beneficios medioambientales, sino también por su contribución a acuerdos internacionales [55].

La Ley tiene como objetivo primordial fomentar la adopción y desarrollo de FNCER, especialmente aquellas con características renovables, en el marco del sistema energético nacional. Esto incluye su integración en el mercado eléctrico, su participación en ZNI y su aplicación en otras áreas energéticas, actuando como un componente esencial para alcanzar un desarrollo económico sostenible, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y garantizar la seguridad del suministro energético.

En línea con estos objetivos, la Ley 1715 establece una serie de incentivos fiscales dirigidos a los proyectos de generación basados en FNCER y a la eficiencia energética (EE).

Figura 19.

Beneficios tributarios ley 1715 de 2014

Deducción especial en determinación del impuesto sobre la renta	Depreciación acelerada	Exclusión de bienes y servicios de IVA	Exención de gravámenes arancelarios
<ul style="list-style-type: none"> El derecho a realizar deducciones de hasta el 50% del monto de las inversiones es válido. El monto deducible anualmente no puede exceder el 50% del ingreso neto del contribuyente. Esto es válido para iniciativas que involucren la Financiación y la Gestión Eficiente de Energía. Las deducciones son permitidas a lo largo de un periodo de hasta 15 años. 	<ul style="list-style-type: none"> Es posible realizar una deducción al presentar la declaración del impuesto sobre la renta, la cual no debe exceder el 33.33% del valor del activo anual. Esta medida aplica específicamente a proyectos que cuenten con FNCE. 	<ul style="list-style-type: none"> Se establece la exención del Impuesto al IVA en la adquisición de bienes, servicios, equipos, maquinaria y elementos, tanto de origen nacional como importados. Esta disposición se aplica de manera específica a proyectos que cuenten con FNCE. 	<ul style="list-style-type: none"> Se establece la exención de los Derechos Arancelarios de Importación para la adquisición de maquinaria, equipos, materiales e insumos destinados a actividades de pre inversión y de inversión.

Nota. La tabla muestra los beneficios tributarios de los proyectos de FNCER que expone la Ley 1715 de 2014. Tomado de: UPME, (2014). "Ley 1715 de 2014." Disponible en: http://www.upme.gov.co/normatividad/nacional/2014/ley_1715_2014.pdf.

Para este caso podrán aplicarse una deducción de hasta el 50% de la inversión de la base líquida gravable para el impuesto de renta y será aprovechable hasta por un periodo de 15 años. La depreciación acelerada puede aplicarse, siempre y cuando se certifique la propiedad irrevocable de los activos.

Tabla 14.

Beneficios tributarios por la ley 1715 de 2014 para cada Biodigestor

Beneficio	Tubular (SCOP)	Campana (SCOP)	Tapa Fija (SCOP)
Depreciación acelerada (año 3)	\$41.580.000	\$49.830.000	\$54.780.000
Deducción del 50% del Total de la inversión (para 10 años)	\$20.790.000	\$24.915.000	\$27.390.000

Nota. La tabla muestra los beneficios tributarios de los proyectos de FNCER que expone la Ley 1715 de 2014.

La Tabla 14 ilustra los beneficios que cada tipo de biodigestor obtendrá a través de la depreciación acelerada y la deducción de renta durante el período de evaluación de 10 años.

4.7. Flujo de Caja

El análisis financiero tiene como objetivo evaluar la viabilidad de implementar los tres tipos de biodigestores propuestos. En este análisis, se consideran las inversiones totales requeridas para cada biodigestor y los ahorros generados por su operación. Estos ahorros se ajustan al valor presente en el inicio del proyecto y se proyectan a lo largo de un horizonte de 10 años.

Con una Tasa Representativa del Mercado (TRM) de \$4.000 COP y una tasa de interés del 20%, se estima que el proyecto podría financiarse en 3 años, con una cuota inicial del 20%. Para

lograrlo, se explorará el uso de un leasing financiero, común en proyectos de FNCER, con la colaboración de entidades financieras como Bancolombia, que ofrece una tasa de descuento del 14% en esta modalidad. Este enfoque verde de financiamiento es estratégico para proyectos de biogás, ya que promueve la sostenibilidad y la amigabilidad con el medio ambiente [65].

Los ahorros operativos de los biodigestores se calculan multiplicando la tarifa de energía por el gas natural producido por cada biodigestor (según su eficiencia detallada en el alcance técnico). Se considera la generación de ingresos a través de la venta del estiércol producido, a un precio de \$150 COP por kilogramo, destinando el 3% [27] a adquirir la materia prima necesaria. Esta estimación se basa en un valor aproximado de \$4.400COP por kilogramo de abono [66].

La decisión de considerar nueve (9) cerdos con una producción de 6 kg por cerdo en el análisis financiero y no ocho (8), como se pensó inicialmente en el estudio técnico, se basa en la determinación de la cantidad mínima necesaria para garantizar resultados positivos y favorables tanto en la Tasa Interna de Retorno (TIR) como en el Valor Presente Neto (VPN) del proyecto. Mediante una inversión final de \$36.564.000 COP, se logra una producción anual de 544 m³ de gas natural, junto con la generación de 38.880 kg de bioabono por año.

En consecuencia, el Costo Nivelado de Energía (LCOE) mínimo se establece en \$8.656COP/m³, lo que conlleva a un ahorro total de \$47.971 COP/mes. Adicionalmente, el cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) arroja un valor del 19%. No obstante, el período de recuperación (Payback) abarca un lapso de 9 años.

Estos aspectos están detallados en la tabla que se presenta a continuación:

Tabla 15.

Valores mínimos de rentabilidad del proyecto de biodigestor

Indicadores	Valor
Inversión Final (COP)	\$36.564.000
Producción de Gas Natural (m ³ /año)	544
Producción de bioabono (kg/año)	38.880
LCOE (COP/m ³)	\$8.656
Ahorro Total (COP)	\$7.362.326
TIR	19%
VPN	3.190.504
PAYBACK (años)	9
Ahorro mes (COP)	\$47.971

Nota. La tabla proporciona los valores mínimos de los indicadores financieros que debe tener el proyecto para ser rentable.

Tras establecer las premisas iniciales del estudio, se procede a exponer los flujos de caja de cada uno de los biodigestores. Esto permite que los clientes, de inversores a nivel nacional e internacional, obtengan una visión financiera aproximada del desarrollo. En este análisis se considerarán tanto los ingresos como los egresos. Además, es importante destacar que el costo

de inversión inicial (CAPEX) se incrementará en un 20%, al establecido anteriormente, reflejando así la ganancia sobre la inversión de los desarrolladores.

En las siguientes tablas se evidencian los flujos de caja de cada biodigestor, considerando sus valores máximos, es decir, las condiciones correspondientes a 60 cerdos por corral:

Tabla 16.

Flujo de caja - Biodigestor Tubular

Años	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
IPC	5,5%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%
IPP	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tasa de interés	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Producción de Gas Natural m3/año	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80
Tarifa esperada \$COP/m3	1,058	1,229	1,271	1,296	1,321	1,347	1,373	1,455,02	1,542,32	1,634,86	
INGRESOS	59.072.452	62.026.586	64.650.771	67.200.973	69.842.771	72.565.053	75.366.800	78.244.143	81.198.938	84.231.394	87.343.530
Ahorro de gas Natural	3.837.652	4.458.986	4.610.403	4.704.387	4.793.149	4.887.132	4.981.115	5.279.982	5.596.781	5.932.588	6.298.350
Ahorro tributario	16.354.800	16.354.800	16.354.800	16.354.800	16.354.800	16.354.800	16.354.800	16.354.800	16.354.800	16.354.800	16.354.800
For depreciación acelerada	13.860.000	13.860.000	13.860.000	13.860.000	13.860.000	13.860.000	13.860.000	13.860.000	13.860.000	13.860.000	13.860.000
Incentivo L 1715	2.494.800	2.494.800	2.494.800	2.494.800	2.494.800	2.494.800	2.494.800	2.494.800	2.494.800	2.494.800	2.494.800
Venta de estérilcol	38.880.000	41.212.800	43.685.568	46.306.702	49.085.104	52.030.210	55.152.023	58.461.144	61.968.813	65.686.942	69.623.250
EGRESOS	(68.292.000)	(60.435.900)	(52.591.235)	(4.438.632)	(4.682.757)	(4.940.309)	(5.212.026)	(5.594.447)	(6.000.944)	(6.538.252)	(7.198.660)
Cuota inicial	30.240.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gasto mantenimiento	3.780.000	3.987.900	4.207.235	4.438.632	4.682.757	4.940.309	5.212.026	5.594.447	6.000.944	6.538.252	7.198.660
Cuota anual	30.240.000	3.780.000	3.987.900	4.207.235	4.438.632	4.682.757	4.940.309	5.212.026	5.594.447	6.000.944	6.538.252
Abono a capital	40.320.000	40.320.000	40.320.000	40.320.000	40.320.000	40.320.000	40.320.000	40.320.000	40.320.000	40.320.000	40.320.000
Intereses	24.192.000	16.128.000	16.128.000	16.128.000	16.128.000	16.128.000	16.128.000	16.128.000	16.128.000	16.128.000	16.128.000
Saldo	80.640.000	40.320.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FLUJO DE CAJA	(30.240.000)	(9.219.548)	1.590.686	12.059.537	49.067.256	51.690.296	54.471.834	57.415.913	60.541.480	64.477.142	68.335.664

Nota. En la figura se expone el flujo de caja para un biodigestor tubular para 60 cerdos.

Tabla 17.

Flujo de caja - Biodigestor de Campana Flotante

Años	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
IPC	5,5%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%
IPP	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tasa de interés	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Producción de Gas Natural m3/año	5,443,20	5,443,20	5,443,20	5,443,20	5,443,20	5,443,20	5,443,20	5,443,20	5,443,20	5,443,20	5,443,20
Tarifa esperada \$COP/m3	1,058	1,229	1,271	1,296	1,321	1,347	1,373	1,455,02	1,542,32	1,634,86	
INGRESOS	64.236.278	67.501.079	70.200.973	72.565.053	75.366.800	78.244.143	81.198.938	84.231.394	87.343.530	90.530.666	93.803.812
Ahorro de gas Natural	5.756.478	6.688.479	6.915.605	7.056.580	7.189.723	7.330.698	7.471.673	7.919.973	8.395.172	8.898.882	9.430.612
Ahorro tributario	19.599.800	19.599.800	19.599.800	19.599.800	19.599.800	19.599.800	19.599.800	19.599.800	19.599.800	19.599.800	19.599.800
For depreciación acelerada	16.610.000	16.610.000	16.610.000	16.610.000	16.610.000	16.610.000	16.610.000	16.610.000	16.610.000	16.610.000	16.610.000
Incentivo L 1715	2.989.800	2.989.800	2.989.800	2.989.800	2.989.800	2.989.800	2.989.800	2.989.800	2.989.800	2.989.800	2.989.800
Venta de estérilcol	38.880.000	41.212.800	43.685.568	46.306.702	49.085.104	52.030.210	55.152.023	58.461.144	61.968.813	65.686.942	69.623.250
EGRESOS	(30.332.000)	(70.834.100)	(61.345.330)	(5.346.209)	(5.741.250)	(6.197.019)	(6.714.105)	(7.298.849)	(7.950.694)	(8.688.694)	(9.516.819)
Cuota inicial	36.240.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gasto mantenimiento	3.020.000	3.186.100	3.361.336	3.546.209	3.741.250	3.947.019	4.164.105	4.399.849	4.660.694	4.950.694	5.275.618
Cuota anual	36.240.000	3.020.000	3.186.100	3.361.336	3.546.209	3.741.250	3.947.019	4.164.105	4.399.849	4.660.694	4.950.618
Abono a capital	48.320.000	48.320.000	48.320.000	48.320.000	48.320.000	48.320.000	48.320.000	48.320.000	48.320.000	48.320.000	48.320.000
Intereses	28.992.000	19.328.000	19.664.000	19.664.000	19.664.000	19.664.000	19.664.000	19.664.000	19.664.000	19.664.000	19.664.000
Saldo	95.640.000	48.320.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FLUJO DE CAJA	(36.240.000)	(16.095.722)	(3.333.021)	8.855.638	52.306.873	55.623.377	58.403.689	61.449.391	65.061.069	69.393.091	74.386.806

Nota. En la figura se expone el flujo de caja para un biodigestor de campana flotante para 60 cerdos.

Tabla 18.

Flujo de caja - Biodigestor de Tapa Fija

Años	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
IPC	5,5%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%
IPP	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Tasa de interés	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Producción de Gas Natural m3/año	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80	3,628,80
Tarifa esperada \$COP/m3	1,058	1,229	1,271	1,296	1,321	1,347	1,373	1,455,02	1,542,32	1,634,86	
INGRESOS	64.264.482	67.218.586	69.842.771	72.565.053	75.366.800	78.244.143	81.198.938	84.231.394	87.343.530	90.530.666	93.803.812
Ahorro de gas Natural	3.837.652	4.458.986	4.610.403	4.704.387	4.793.149	4.887.132	4.981.115	5.279.982	5.596.781	5.932.588	6.298.350
Ahorro tributario	21.546.800	21.546.800	21.546.800	21.546.800	21.546.800	21.546.800	21.546.800	21.546.800	21.546.800	21.546.800	21.546.800
For depreciación acelerada	18.260.000	18.260.000	18.260.000	18.260.000	18.260.000	18.260.000	18.260.000	18.260.000	18.260.000	18.260.000	18.260.000
Incentivo L 1715	3.286.800	3.286.800	3.286.800	3.286.800	3.286.800	3.286.800	3.286.800	3.286.800	3.286.800	3.286.800	3.286.800
Venta de estérilcol	38.880.000	41.212.800	43.685.568	46.306.702	49.085.104	52.030.210	55.152.023	58.461.144	61.968.813	65.686.942	69.623.250
EGRESOS	(88.312.000)	(77.870.600)	(67.839.249)	(4.898.481)	(5.112.898)	(5.339.107)	(5.577.758)	(5.837.980)	(6.120.944)	(6.438.809)	(6.795.442)
Cuota inicial	39.840.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gasto mantenimiento	3.320.000	3.502.600	3.695.243	3.898.481	4.112.898	4.339.107	4.577.758	4.737.980	4.903.809	5.075.442	5.263.880
Cuota anual	39.840.000	3.320.000	3.502.600	3.695.243	3.898.481	4.112.898	4.339.107	4.577.758	4.737.980	4.903.809	5.075.442
Abono a capital	53.120.000	53.120.000	53.120.000	53.120.000	53.120.000	53.120.000	53.120.000	53.120.000	53.120.000	53.120.000	53.120.000
Intereses	31.872.000	21.248.000	21.248.000	21.248.000	21.248.000	21.248.000	21.248.000	21.248.000	21.248.000	21.248.000	21.248.000
Saldo	106.240.000	53.120.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FLUJO DE CAJA	(39.840.000)	(24.047.548)	(10.652.014)	2.403.828	50.399.407	53.052.155	55.865.035	58.842.180	62.289.947	66.348.585	70.983.880

Nota. En la figura se expone el flujo de caja para un biodigestor tubular para 60 cerdos.

El biodigestor Tubular, tiene una inversión de \$ \$199.584.000 COP. Aunque su producción de gas natural es la más baja con 3.629 m³/año, el ahorro total estimado es de \$319.804 COP/mes. El Valor Presente Neto (VPN) también es positivo, alcanzando \$144.403.553, lo que sugiere que el proyecto podría ser financieramente viable. El período de recuperación (Payback) es de 4 años, evidenciando una rápida recuperación de la inversión.

Sin embargo, desde una perspectiva financiera, el biodigestor de Campana parece ser la opción más favorable. Requiere una inversión inicial mayor de \$239.184.000 COP, ofrece una producción de gas natural significativamente más alta con 5.443 m³/año, generando un ahorro total estimado de \$479.706 COP/mes. Aunque su período de recuperación es de 4,5 años, más largo que el del biodigestor Tubular, la combinación de su alta producción, eficiencia y ahorro total hace que este biodigestor parezca ser la elección más sólida desde una perspectiva financiera.

La siguiente tabla evidencia que, en ciertos casos, el biodigestor Tubular puede ser una opción atractiva, para aquellos que buscan una inversión inicial más baja y una recuperación más rápida de sus fondos. Sin embargo, la elección entre el biodigestor Tubular y el de Campana dependerá de las prioridades y objetivos específicos de los inversores, así como de las condiciones del entorno en el que se implementará el proyecto.

Tabla 19.

Comparación de indicadores financieros de los biodigestores

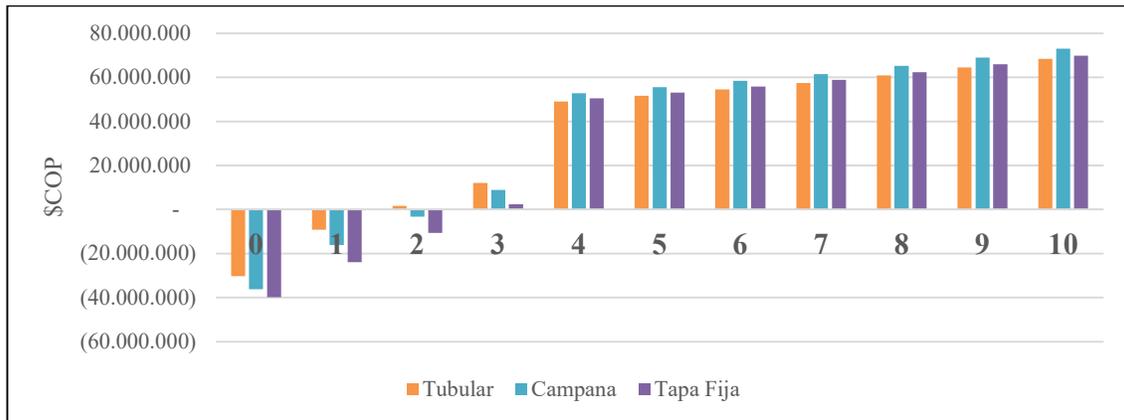
Indicadores	Tubular	Campana	Tapa Fija
Inversión (\$COP)	\$199.584.000	\$239.184.000	\$262.944.000
Producción de Gas Natural (m ³ /año)	3.629	5.443	3.629
Producción de estiércol (kg/año)	259.200	259.200	259.200
LCOE (\$COP/m ³)	\$6.823	\$5.099	\$8.408
Ahorro Total (\$COP)	\$49.082.176	\$73.623.264	\$49.082.176
TIR	48%	41%	33%
VPN	\$144.403.553	\$138.638.197	\$109.708.279
Ahorro mes (\$COP)	\$319.804	\$479.706	\$319.804
PAYBACK (años)	4	4,5	5

Nota. La tabla proporciona los valores de los indicadores financieros para los tres tipos de biodigestores.

Finalmente, como se muestra en la figura 20, en el largo plazo, se destaca que el biodigestor de tipo Campana emerge como el más rentable, pues a partir del cuarto período en adelante, las ganancias generadas por este biodigestor superan de manera constante a las de los otros dos tipos. Hacia el final del décimo (10) período, el biodigestor Campana registra la cifra más sobresaliente de ganancias, alcanzando un valor de \$77.575.624 COP, en comparación con los \$74.114.330 COP del biodigestor Tubular y los \$ 74.906.330 COP del biodigestor Tapa Fija.

Figura 20.

Comparación del flujo de caja de los biodigestores



Nota. En la gráfica se muestra el flujo de caja de los 3 tipos de biodigestores en un periodo de 10 años.

5. CONCLUSIONES

La oportunidad que presentan los biodigestores en Colombia para participar en la oferta de biogás y abono es significativa. En primer lugar, se evidencia un contexto propicio en el sector porcícola, donde la demanda creciente de carne de cerdo y la concentración de la población porcina en ciertas regiones del país brindan un mercado ideal para la implementación de estos sistemas. Aprovechar los desechos orgánicos generados en las fincas porcícolas podría no solo contribuir a un sector energético más sostenible, sino también reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mejorar la gestión de residuos, minimizando el impacto ambiental.

En el mercado de biogás, la posibilidad de comercializarlo a las empresas distribuidoras de gas natural se presenta como una oportunidad interesante, pero también desafiante debido a factores técnicos y económicos que deben considerarse cuidadosamente.

En cuanto al mercado de abono, la producción local a través de biodigestores puede abordar la escasez de fuentes de nitrógeno en la producción de fertilizantes. Esto tiene el potencial de estabilizar los precios internos de los fertilizantes y mejorar la rentabilidad en la agricultura y ganadería, reduciendo la dependencia de insumos importados. En términos de abono, la producción local de abono orgánico a través de biodigestores podría abordar la dependencia de materias primas importadas para la fabricación de fertilizantes.

Las alianzas estratégicas son esenciales para aprovechar estas oportunidades. Empresas que ya lideran el uso de biomasa, como RefoEnergy y SmurfitKappa, podrían asociarse con aquellas interesadas en invertir en biodigestores para impulsar el crecimiento del sector. En este sentido, la colaboración con empresas distribuidoras de gas natural y productoras agrícolas podría facilitar la comercialización del biogás y abono.

En términos técnicos, el biodigestor tubular destaca como una solución eficaz y versátil para la generación de biogás y bioabono a partir de residuos orgánicos. Asimismo, al igual que otros tipos de biodigestores, el bioabono generado en este proceso puede ser aprovechado como un recurso valioso en la agricultura, contribuyendo al cierre del ciclo de nutrientes y promoviendo prácticas agrícolas más respetuosas con el medio ambiente. En última instancia, el biodigestor tubular emerge como una alternativa sólida y prometedora en la exploración de fuentes de energía renovable.

Al evaluar los requisitos de espacio para diferentes tipos de biodigestores, se identificó que al tener 60 cerdos como lo indica PorkColombia, para el biodigestor tubular se requiere un área de 105,63 m² para alcanzar la producción de 14,4 m³ de biogás y 21.600 kg bioabono. Por otro lado, tanto el biodigestor de tapa fija como el de campana flotante comparten un espacio más

compacto de 71,5 m². Es importante destacar que el biodigestor de campana flotante muestra una capacidad de producción diaria de biogás superior, con 21,6 m³, en comparación con el biodigestor de tapa fija que produce 14,4 m³. Aunque las dimensiones físicas pueden variar, es evidente que la elección del tipo de biodigestor puede influir en la eficiencia y capacidad de generación tanto de biogás como de bioabono, lo que, a su vez, puede impactar en la optimización del espacio y en la maximización de los beneficios del proceso de biodigestión. El análisis detallado de los tres tipos de biodigestores presenta diversas perspectivas en términos de viabilidad financiera. El biodigestor Tubular, con su inversión de \$199.584.000 COP, muestra una producción de gas natural menor en comparación con los otros tipos, generando 3.629 m³/año. A pesar de esto, su ahorro total estimado de \$319.804 COP/mes y su Valor Presente Neto (VPN) positivo de \$144.403.553 COP, sugieren que el proyecto podría ser viable económicamente.

No obstante, desde una perspectiva financiera, el biodigestor de tipo Campana emerge como la opción más favorable. Aunque su inversión inicial es mayor, alcanzando \$239.184.000 COP, su producción de gas natural de 5.443 /año resulta significativamente más alta, lo que conduce a un ahorro total estimado de \$479.706 COP/mes. A pesar de un período de recuperación de 4,5 años, ligeramente más extenso que el del biodigestor Tubular, la combinación de su producción robusta, eficiencia y ahorro total lo posiciona como la elección más sólida desde una perspectiva financiera.

En ciertos escenarios, el biodigestor Tubular puede ser atractivo para aquellos que buscan una inversión inicial más baja y una recuperación más rápida de sus fondos. Sin embargo, la elección entre el biodigestor Tubular y el de tipo Campana dependerá de las prioridades y objetivos específicos de los inversores, así como de las condiciones del entorno en el que se llevará a cabo el proyecto.

GLOSARIO

Biodigestor: un sistema anaeróbico diseñado para descomponer materia orgánica en ausencia de oxígeno y producir biogás y bioabono como subproductos [6].

Bioabono: un fertilizante orgánico generado como subproducto del proceso de biodigestión. Contiene nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y mejora la calidad del suelo [6].

Biogás: una mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de carbono, producida por la descomposición anaeróbica de materia orgánica. Puede ser utilizado como fuente de energía [6].

CAPEX: cálculo de los costos de inversión inicial necesarios para adquirir y construir los activos del proyecto, como los biodigestores y equipos asociados [59].

Comercialización de Gas Natural: la actividad de compra y venta de gas natural entre productores, comercializadores y consumidores finales, incluyendo la negociación de contratos y precios [63].

Comercializador de Gas: una empresa o entidad que compra gas natural a productores o distribuidores y lo vende a consumidores finales, gestionando la logística y comercialización del gas [63].

Digestión anaeróbica: proceso microbiano de descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno, que resulta en la producción de biogás y bioabono [6].

Eficiencia energética: relación entre la cantidad de energía producida y la energía invertida en el proceso de biodigestión, indicando la capacidad del biodigestor para convertir materia orgánica en biogás [6].

Energía renovable: energía obtenida de fuentes naturales y sostenibles, como el biogás producido por el biodigestor, que contribuye a reducir la dependencia de combustibles fósiles [6].

Flujo de caja: registro de los flujos de efectivo entrantes y salientes del proyecto a lo largo del tiempo, utilizado para evaluar la liquidez, la rentabilidad y la viabilidad financiera [59].

IVA (Impuesto al Valor Agregado): un impuesto sobre el consumo que se aplica al valor agregado en cada etapa de la producción y distribución de bienes y servicios [60].

Indexación: el proceso de ajustar los valores de precios o tarifas utilizando un índice de referencia, como el IPC, para tener en cuenta la inflación o cambios en los costos [60].

IPP: un indicador que mide los cambios en los precios de los bienes y servicios en el nivel de producción o fabricación antes de que lleguen al consumidor final [60].

IPC: un indicador que mide los cambios en los precios de un conjunto de bienes y servicios que los consumidores comúnmente compran durante un período de tiempo determinado [59].

LCOE (Levelized Cost of Electricity - Costo Nivelado de Electricidad): una medida del costo promedio por unidad de electricidad generada durante la vida útil de un proyecto de energía, teniendo en cuenta los costos de inversión, operación, mantenimiento y financiamiento [62].

Mantenimiento: conjunto de actividades periódicas realizadas para asegurar el funcionamiento óptimo del biodigestor, incluyendo limpieza, revisión de componentes y reparaciones [46].

MMBTU (Millones de Unidades Térmicas Británicas): una medida de energía utilizada en la industria energética para expresar la cantidad de calor o energía térmica.

Payback (Periodo de Recuperación): el período de tiempo necesario para recuperar una inversión inicial a través de los flujos de efectivo generados por esa inversión [60].

Regulaciones locales: normativas y requisitos establecidos por las autoridades gubernamentales en relación con la instalación, operación y seguridad del biodigestor [56].

Sustrato: material orgánico que se introduce en el biodigestor para la descomposición anaeróbica y la producción de biogás y bioabono [6].

Tiempo de retención hidráulica: período durante el cual el material orgánico permanece en el biodigestor para la descomposición anaeróbica. Afecta la eficiencia del proceso y la producción de biogás [6].

Tasa Interna de Retorno (TIR): tasa de rendimiento que iguala el valor presente neto de los flujos de efectivo futuros del proyecto a cero, indicando el rendimiento económico del proyecto [59].

Transporte de Gas Natural: la transferencia de gas natural a través de tuberías de alta presión desde los puntos de producción hasta las instalaciones de distribución o centros de consumo [63].

VNA (Valor Neto Actual): el valor presente de los flujos de efectivo futuros descontados a una tasa de descuento específica. Se utiliza para evaluar la rentabilidad de una inversión o proyecto [56].

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Consultoría en apoyo a la misión de transformación energética en los temas de abastecimiento, comercialización, transporte, almacenamiento, regasificación, demanda, aspectos institucionales y regulación de gas natural. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/9184/Foco_2_-_Informe_Final.pdf.
- [2] Planta de Regasificación en el Pacífico Colombiano. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/PromocionSector/Paginas/Planta-Regasificacion-pacifico-Colombiano.aspx>.
- [3] Resolución CREG 240 de 2016. Disponible en: https://regimenjuridico.grupovanti.com/ver_leyes.php?id=751.
- [4] Colombia concentra la mitad de usuarios sin acceso al gas en cuatro departamentos. Disponible en: <https://n9.cl/d72ic>
- [5] Revista Semana, (2012). "Así es la Colombia rural." Semana. Disponible en: <https://especiales.semana.com/especiales/pilares-tierra/asi-es-la-colombia-rural.html>.
- [6] Siddhartha Roa,Z. et al, (2020). "Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia." Disponible en: <https://n9.cl/de6sm>
- [7] Martínez Plaza,W. E., (2016). "Análisis de un biodigestor para producir combustibles ecológicos en la comunidad de Patala -Pucara." Disponible en: <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4492/Martinez%20P.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [8] V. F. Pesántez Angulo, "Proyecto de factibilidad para la creación de una empresa de entretenimiento con vehículos monoplaza (Karting) en el cantón Rumiñahui," Jan 1, 2012.
- [9] McGraw Hill Education, "La oferta, la demanda y el mercado." Disponible en: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448181042.pdf>.
- [10] Consorcio Energético Corpoema, (2010). "Formulación de un plan de desarrollo para las Fuentes No Convencionales de Energía en Colombia (PDFNCE)." Disponible en: http://www.upme.gov.co/sigic/documentosf/vol_1_plan_desarrollo.pdf.
- [11] Ministerio de Minas y Energías, "Fuentes No Convencionales de Energía Renovable - FNCER." Disponible en: <https://n9.cl/qjyk0>
- [12] Arcila González,B. O., (2020). "Importancia de la formulación de un modelo financiero para la empresa "Belton alimento BARF". Disponible en: <https://dspace.tdea.edu.co/bitstream/handle/tdea/1600/Modelo%20Financiero.pdf?s>

equence=1&isAllowed=y.

- [13] Rodríguez Fernández,S., (2021). "Análisis del marco normativo de la contratación bilateral de energía para plantas de generación renovable." Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/93518/fichero/TFG-3518+RODR%C3%8DGUEZ+FERN%C3%81NDEZ%2C+SARA.pdf>.
- [14] Cruz Chávez,P. et al, (2016). "Metodología para medir la rentabilidad de un proyecto de inversión: estudio de caso de agua." Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5746482.pdf>.
- [15] Kougias,P. G. and I. Angelidaki, (2018). "Biogas and its opportunities—A review." *Front. Environ. Sci. Eng.* Disponible en: <https://journal.hep.com.cn/fese/EN/10.1007/s11783-018-1037-8>. DOI: 10.1007/s11783-018-1037-8.
- [16] Guía para el tratamiento de las aguas residuales porcinas. Disponible en: http://www.imta.gob.mx/gobmx/DOI/libros/2021/manual_tratamiento_aguas_residuales_porcinas_IMTA.pdf.
- [17] Consumo per cápita de carne de cerdo en Colombia. Disponible en: <https://porkcolombia.co/download/50747/?tmstv=1690241141>.
- [18] Censo Porcino en Colombia. Disponible en: <https://n9.cl/pauq2>
- [19] Listados de empresas dedicadas a Cría de ganado porcino . Disponible en: https://www.informacolombia.com/directorio-empresas/actividad/0144_CRIA-DE-GANADO-PORCINO.
- [20] Serie de estudios sectoriales Carne de cerdo (Porcino). Disponible en: <https://bolsamercantil.com.co/sites/default/files/2022-07/Estudio%20Sector%20Porcino%2015-9-2020.pdf>.
- [21] Los 5 grupos que manejan la distribución de gas en Colombia. Disponible en: portafolio.co/negocios/empresas/los-5-grupos-que-manejan-la-distribucion-de-gas-en-colombia-563154.
- [22] Política nacional para la racionalización del componente de costos de producción asociado a los fertilizantes en el sector agropecuario. Disponible en: <https://www.ica.gov.co/getattachment/b527d0c9-e862-4c26-8347-e5076fd9b1a9/2009CP3577.aspx>.
- [23] ¿Cómo es el mercado de fertilizantes en Colombia? Disponible en: <https://www.abonamos.com/blog/2020/4/20/fertilizantes-en-colombia>.
- [24] Proyecciones de demanda. Disponible en: <https://n9.cl/qhbxq>

- [25] Nuestra Operación. Disponible en: <https://tebsa.com.co/nuestra-operacion/>.
- [26] Gran Encuesta Integrada de Hogares - GEIH - 2021. Disponible en: <https://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/701/study-description>.
- [27] Informe del sector de Gas Natural Colombia - Cifras 2021. Disponible en: <https://www.promigas.com/InformeSectorGas2022/Paginas/Cifras-del-sector.aspx>.
- [28] Comercialización. Disponible en: <https://n9.cl/4epmhg>
- [29] ¿Cuántos m³ de gas consume una casa en promedio? Disponible en: <https://n9.cl/428mj>
- [30] Guía de biogás para el sector porcícola en Colombia. Disponible en: https://porkcolombia.co/wp-content/uploads/2020/06/Guia-Biogas-sector-porcicultor_Porkcolombia.pdf.
- [31] Encuesta nacional agropecuaria (ENA). Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena>.
- [32] Molina, K., L. Caicedo and C. Duque, (1999). "Tratamiento de las excretas de cerdo mediante un reactor anaeróbico SCFBR a nivel de banc." Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4808868.pdf>.
- [33] MINENERGIA et al, (2011). "Manual de Biogás." Disponible en: <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>.
- [34] Asociación Colombiana de Porcicultores, (2002). "Guía ambiental para el subsector porcícola." Disponible en: <https://www.porkcolombia.co/wp-content/uploads/2018/07/GUIA-AMBIENTAL-PORCICOLA-opt.pdf>.
- [35] Rajendran, K., S. Aslanzadeh and M. J. Taherzadeh, (2012). "Household Biogas Digesters—A Review." Disponible en: <https://search.proquest.com/docview/1537070766>.
- [36] Sistema Biobolsa, "Manual de BIOL." Disponible en: <https://n9.cl/qf6q2>
- [37] Zegers M., G. et al, (2021). "Elaboración y usos del BIOL en la producción sostenible de alimentos." Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/68062>.
- [38] Andino Bermúdez, R. I. and K. A. Martínez Arcia. 2015. "Biodigestores: "Una Alternativa De Innovación Socio – Económica Amigable Con El Medio Ambiente"."
- [39] FAO, (2019). "Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores ." Disponible en: <https://www.fao.org/3/ca5082es/ca5082es.pdf>.
- [40] Nunez Lenin, (2017). "Modelamiento y control de proceso de digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos y/o aguas residuales." Disponible en: <https://n9.cl/sa10g>

- [41] De La Torre, N. And U. Ruiz-Rivas, (2008)."Digestion anaerobia en comunidades rurales ." Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11627/PFC_Nadia_deLaTorre_Caritas.pdf.
- [42] Soria,M. d. J. et al, (2001)."Produccion de biofertilizantes mediante biodigestion de excreta liquida de cerdo." Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/573/57319408.pdf>.
- [43] Rivas,O., M. Faith and R. Guillén, (2009)."Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad." Disponible en: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/132/131.
- [44] Montijo,E., (2018)."Diseño e implementación de biodigestores automatizados para producción de biogás en Sonora." Disponible en: <https://n9.cl/wpfxh>
- [45] Recopilación de aspectos teóricos sobre las tecnologías de producción de biogás a escala rural. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852020000200303.
- [46] Subsecretaría de Energías Renovables Santa Fe, (s.fs.f)."Curso operación y mantenimiento de sistemas de biodigestión de pequeña y mediana escala." Disponible en: <https://n9.cl/f5mh1>
- [47] Sandoval,K. and E. Wuiza, (2021)."Diseño teórico de un biodigestor para la producción de biogás partiendo de la gallinaza producida en la finca “La Victoria” ubicada en la vereda los ejidos en Vélez Santander." Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8663/1/6162012-2021-2-IQ.pdf>.
- [48] García,J. and E. León, (2015)."Diseño y construcción de un biodigestor hindú anaerobio en la finca “Los Cuencanos” de la parroquia García Moreno." Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4863/1/236T0166.pdf>.
- [49] Olaya,Y., (2009)."Fundamentos para el diseño de biodigestores: Módulo para la asignatura de Construcciones Agrícolas." Disponible en: <https://n9.cl/rtvwg>
- [50] Reyes,C., (2015)."Producción de biogás en digestor tubular para la sostenibilidad energética y mejorar la calidad de vida en la provincia de Yungay- distrito de Huashao." Disponible en: https://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2017/12/Reyes-Carlos_Huashao-Ancash.pdf.
- [51] Marti,J., (2019)."Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación." Disponible en:<https://n9.cl/jmdx3>
- [52] Índice de precios al consumidor (IPC). Disponible en: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/indice-precios-consumidor-ipc>.

- [53] Información junio 2023. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc/ipc-informacion-tecnica>.
- [54] Índice de Precios del Productor (IPP). Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-del-productor-ipp>.
- [55] UPME, (2014)."Ley 1715 de 2014." Disponible en: http://www.upme.gov.co/normatividad/nacional/2014/ley_1715_2014.pdf.
- [56] CREG, (2021)."COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS." Disponible en: https://www.creg.gov.co/sites/default/files/creg174-2021_compressed.pdf.
- [57] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, "Modelo de Evaluación Ambiental de la Ganadería Mundial (GLEAM)." Disponible en: <https://www.fao.org/gleam/results/es/>.
- [58] Mora Navarro, D. C. and J. M. Hurtado Liévano, .2004."Guía Para Estudios De Prefactibilidad De Pequeñas Centrales Hidroeléctricas Como Parte De Sistemas Híbridos." .
- [59] P. A. Gutiérrez Tamayo y C. C. Rodríguez Torres, "Propuesta de mejora del proceso de producción de biogás en Jerusalén (Cundinamarca)", 2018.
- [60] R. Vera, "Reseña de la metodología de construcción de los indicadores más utilizados en Colombia: IPC, IPP, ITCR, IGBC", 2005.
- [61] A. Alberca et al., "Evaluación de proyectos de inversión: Análisis comparativo mediante VPN, TIR y PAYBACK descontado en dos empresas privadas de Quito", 2017. [En línea]. Disponible en: https://tambara.org/wp-content/uploads/2017/08/Paper_9_Andino.pdf.
- [62] D. Morales y D. Ramirez, "Propuesta de una metodología para el cálculo del costo nivelado de energía (lcoe) en proyectos de generación renovable, basado en el flujo de caja financiero", 2020. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/3w5bd>
- [63] Management Solutions Spain, "La gestión logística en la comercialización del gas natural", 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.managementsolutions.com/sites/default/files/publicaciones/esp/Comercializacion-gas.pdf>.
- [64] GTZ-Energía, "Biodigestores Familiares Manual de Instalación". [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/p81hl>
- [65] "Leasing", Bancolombia. [En línea]. Disponible en:

- <https://www.bancolombia.com/empresas/productos-servicios/leasing/leasing-verde>.
- [66] “Nitroextend® Xp Urea Mejorada Nitrogeno Para Plantas X 50kg”, Com.co. [En línea]. Disponible en: <https://n9.cl/yibej>
- [67] Y. Sandoval, “Así se impulsa la producción de biogás y biometano en Colombia”, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.valoraanalitik.com/2023/07/06/asi-se-impulsa-la-produccion-de-biogas-y-biometano-en-colombia/>.
- [68] BioEnergy, “Etanol y Comercialización”. [En línea]. Disponible en: <http://www.bioenergy.com.co/SitePages/UnidadNegocio.aspx>.
- [69] E. Espectador, “Puerto Carreño, primera ciudad abastecida con energía renovable”, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.elespectador.com/economia/puerto-carreno-primera-ciudad-abastecida-con-energia-renovable/>.
- [70] “Smurfit Kappa invertirá US\$100 millones para construcción de caldera de biomasa”, La República, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/empresas/smurfit-kappa-invertira-us-100-millones-para-smurfit-kappa-invertira-us-100-millones-para-construccion-de-una-caldera-de-biomasa-de-una-caldera-de-biomasa-3469703>.
- [71] Visionarios Magdalena, “Proyectos de biomasa en Colombia y lo que nos enseñan”, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://visionariosmagdalena.com/proyectos-biomasa-colombia-que-nos-ensenan/>.
- [72] Minambiente, “De la práctica a la análisis de las barreras a la inversión en biogás en Colombia y las medidas para abordarlas, a partir de la experiencia de los desarrolladores y otros actores relevantes”, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://ledslac.org/wp-content/uploads/2021/08/Informe-final-biogas-Colombia-v.06082021-final.pdf>.
- [73] “La producción local de fertilizantes sigue siendo baja y cubre solo 5% de la demanda”, La República, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/empresas/la-produccion-local-de-fertilizantes-sigue-siendo-baja-y-cubre-solo-5-de-la-demanda-3562683>.
- [74] “Perspectivas del Comercio Internacional de América Latina y el Caribe”, Naciones Unidas CEPAL, 2021. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/48650/1/S2200846_es.pdf.
- [75] “¿Qué es la urea y por qué Colombia no la produce?”, Periodico UNAL, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://periodico.unal.edu.co/articulos/que-es-la-urea-y-por-que-colombia-no-la-produce/>.

- [76] M. C. Cañón Ramírez, “¿Qué hace falta para que Colombia sea autosuficiente en insumos para el agro?”, 09-abr-2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.elspectador.com/economia/macroeconomia/que-hace-falta-para-que-colombia-sea-autosuficiente-en-insumos-para-el-agro/>.
- [77] “Manual de Construcciones Porcícolas”, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.porkcolombia.co/wp-content/uploads/2021/03/Manual-Construcciones.pdf>.

ANEXO 1

RECOMENDACIONES

En caso de seguir adelante con el desarrollo del proyecto, desde la perspectiva del mercado, se sugiere enfocarse en uno de los mercados potenciales. Esto podría implicar el suministro de gas natural a empresas del sector, la venta de gas natural a entidades encargadas de la comercialización en el mercado de gas natural y/o a empresas de fertilizantes en Colombia. Esta recomendación se basa en la amplitud de la perspectiva de mercado presentada en el documento, la cual podría ser aprovechada de manera más efectiva al concentrarse en áreas específicas.

En el aspecto técnico, es fundamental considerar tanto el rango mínimo como el máximo de cerdos que pueden alojarse, así como las condiciones ambientales del lugar donde se planea instalar el biodigestor. Estas condiciones, especialmente la temperatura, pueden tener un impacto significativo en la producción de biogás. Por lo tanto, es esencial evaluar cuidadosamente estos factores para determinar la capacidad de generación de biogás del sistema.

La elección del tipo de biodigestor adecuado también es un aspecto crítico. Puede optar por el biodigestor tubular si busca un alto rendimiento y versatilidad en la producción de biogás. Alternativamente, puede considerar el biodigestor de campana flotante o tapa fija si enfrenta limitaciones de espacio o si la inversión inicial es una preocupación prioritaria. La elección del tipo de biodigestor debe basarse en las necesidades específicas del proyecto y en la disponibilidad de recursos para garantizar el éxito del sistema.

Desde el punto de vista financiero, se tomaron las condiciones iniciales del mercado ajustadas al año 2023. Por lo tanto, factores como el Índice de Precios al Consumidor (IPC) y el Índice de Precios de Producción (IPP) deben adaptarse a las condiciones específicas de cada país y al año en cuestión. Asimismo, las Tasas de Interés, la Tasa Representativa del Mercado (TRM) y otras variables similares, que dependen del banco seleccionado para el Leasing financiero y el plazo de amortización del estudio, deben ser tomadas y actualizadas según se requiera.

La Tasa de Descuento se calcula generalmente a partir de proyectos de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FN CER), con un valor comúnmente utilizado del 14%. No obstante, para empresas con información financiera detallada, se recomienda calcular y/o emplear otros factores financieros, como el Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC), que se usa para valorar proyectos con niveles de riesgo económico y financiero similares a inversiones previas.

Otra consideración de importancia recae en el Valor de Inversión (CAPEX) y los Gastos Operativos (OPEX), los cuales deben calcularse específicamente para satisfacer las necesidades de cada proyecto. Los valores presentados en este proyecto son meramente una referencia en términos de orden de magnitud. Asimismo, es posible ajustar el porcentaje de ingresos calculados sobre el CAPEX, que normalmente se establece en un 20% para proyectos, pero puede variar según los requisitos de cada cliente.