

ANÁLISIS DOCUMENTAL DE SISTEMAS DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA LA
OBTENCIÓN DE ENERGÍA EN ZONAS RURALES NO INTERCONECTADAS DE
COLOMBIA

ANDRÉS LEONARDO TRIANA PINZÓN
BRAHIAN FERNEY NIETO CHÁVEZ

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA – UNIAGRARIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECATRÓNICA
BOGOTÁ
2024

ANÁLISIS DOCUMENTAL DE SISTEMAS DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA PARA LA
OBTENCIÓN DE ENERGÍA EN ZONAS RURALES NO INTERCONECTADAS DE
COLOMBIA

ANDRÉS LEONARDO TRIANA PINZÓN
BRAHIAN FERNEY NIETO CHÁVEZ

Monografía de revisión bibliográfica para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico e
Industrial

Director asignado: Ing. Carlos Andrés Ulloa Robayo

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA – UNIAGRARIA
FACULTAD DE INGENIERIA MECATRÓNICA
BOGOTÁ
2024

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá 22 de Julio de 2024

DEDICATORIA

A nuestras queridas madres Amanda Pinzón y Virgelina Chaves, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser nuestra fuente de inspiración diaria. Su guía y sacrificio han sido el sostén que nos ha permitido llegar hasta aquí, y sin su aliento inquebrantable, nada de esto habría sido posible.

Para nuestros padres Wilfredo Triana y Ángel Nieto, por su sabiduría, su orientación y por enseñarnos el valor del esfuerzo y la perseverancia. Su presencia en nuestras vidas ha sido esencial para alcanzar este logro, y sus enseñanzas han sido faros que han iluminado nuestro camino hacia el éxito.

Nuestros abuelos Flor Alba de Triana, Olga Nieto y Sofonías Chaves, por ser la base sólida de nuestras familias. Sus ejemplos de fortaleza, dedicación y las innumerables lecciones de vida que nos han brindado han sido cruciales para que enfrentáramos los desafíos con valentía y determinación. Su legado ha sido la chispa que nos ha impulsado a seguir adelante, incluso en los días más oscuros en los que la rendición parecía una opción.

Este trabajo es un testimonio de los valores y enseñanzas que nos han transmitido a lo largo de nuestras vidas. Se lo dedicamos con todo nuestro amor y gratitud, reconociendo que, sin su ayuda y apoyo incondicional, no habríamos logrado alcanzar este punto. Gracias por ser nuestro pilar fundamental y nuestra mayor fuente de inspiración.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi sincero agradecimiento a toda nuestra familia, en especial a nuestros hermanos y tíos, quienes han sido un pilar fundamental en nuestro viaje. Su apoyo constante, sus palabras de aliento y su compañía incondicional han sido cruciales para mantenernos enfocados y motivados a lo largo de este proceso. Gracias por estar siempre presentes, compartiendo nuestras alegrías y desafíos, y por su amor inquebrantable.

A nuestros amigos y compañeros, con quienes hemos compartido momentos de estudio, reflexión y crecimiento. Su camaradería y apoyo han sido invaluable, juntos hemos superado obstáculos y celebrados logros. Agradecemos cada conversación, cada consejo y cada gesto de aliento que nos ha ayudado a avanzar y a perseverar en los momentos más desafiantes.

A los docentes que han sido parte esencial de nuestra formación. Su dedicación, pasión y enseñanza han sido la base sobre la cual hemos construido nuestro conocimiento y habilidades. Gracias por compartir su sabiduría, por guiarnos con paciencia y por inspirarnos a alcanzar nuestro máximo potencial. Sin su compromiso y esfuerzo, no habríamos llegado a este punto.

A todos ustedes, les debemos una profunda gratitud. Este logro es el resultado del apoyo y la inspiración que nos han brindado a lo largo de todo este tiempo. Gracias por ser parte de este camino y por contribuir de manera significativa a nuestra formación y éxito.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	9
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	10
2. JUSTIFICACIÓN.....	13
3. OBJETIVOS.....	19
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
4. MARCO REFERENCIAL	20
4.1 ESTADO DEL ARTE.....	20
4.2 MARCO HISTÓRICO	23
4.2 MARCO TEÓRICO	24
4.3 MARCO CONCEPTUAL.....	31
4.5 MARCO LEGAL.....	34
5. DISEÑO METODOLÓGICO.....	36
6. RESULTADOS	40
7. CONCLUSIONES	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1.	Características de los tipos de biodigestores implementados a pequeña escala	.25
Tabla 2.	Ventajas y desventajas de biodigestores implementados a pequeña escala26
Tabla 3.	Contenido de metano de varios sustratos27
Tabla 4.	Factores óptimos para la obtención del biogás28
Tabla 5.	Aproximación de usos de la energía en base a la cantidad de biogás disponible, casos de implementación.29
Tabla 6.	Composición química del biogás.31
Tabla 7.	Etapas del proceso de digestión anaerobia32
Tabla 8.	Recolección de Datos (Análisis técnico)41

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Índice NBI en ZNI.....	11
Figura 2. Densidad poblacional aproximada ZNI (2021).....	12
Figura 3. Ilustración de cómo funciona un sistema de biogás.....	14
Figura 4. Economía circular e implementación de biodigestores.....	15
Figura 5. Índice de cobertura de energía eléctrica (IEEE) en Colombia.....	17
Figura 6. Beneficios varios de la implementación de biodigestores.....	18
Figura 7. Potencial para recolección de materia orgánica, biofertilizantes y producción de biogás.	20
Figura 8. Proceso de biodigestión en la obtención de energía a gran escala.....	21
Figura 9. Proceso de conversión bioquímica (digestión anaeróbica).....	24
Figura 10. Secuencia para la producción de Biogás.....	32
Figura 11. Fases del ciclo de vida del biogás e instancias de política y normatividad requeridas en Colombia.....	35
Figura 12. Fases del diseño metodológico.....	36
Figura 13. Diagrama de rúbrica, desarrollo del problema y contenido general de las características del problema.....	37
Figura 14. Fase 2: Investigación y revisión Bibliográfica (Temas relevantes).....	38
Figura 15. Fase 3: Análisis técnico de datos.....	38
Figura 16. Fase metodológica 4: Características evaluadas.....	39
Figura 17. Relación entre conceptos predominantes y temas relevantes.....	40
Figura 18. Beneficios económicos y ambientales de la implementación de sistemas de obtención de biogás.....	44
Figura 19. Resultados evaluados.....	44

INTRODUCCIÓN

La energía, en sus múltiples formas, es un habilitador del bienestar humano, los hogares necesitan energía para ser funcionales y cómodos, permitiendo que las personas puedan realizar sus actividades diarias sin ningún percance. Una visión general del panorama energético en Colombia revela que, hasta ahora, se ha logrado una de las mejores coberturas de acceso a energía de la región, con un 97% de cobertura en energía eléctrica. Sin embargo, persisten desafíos importantes como asegurar no solo el acceso, sino también una buena calidad de energía, aspecto en el que existen grandes desigualdades; conseguir que el 9,7% de la población colombiana que aún no tiene suministro energético y que aun cocina con leña adopte alternativas energéticas adecuadas para suplir sus necesidades y proporcionar los medios para que más hogares y personas tengan acceso a dispositivos y otros medios para transformar la energía en bienestar (Promigas, 2023) .

En este contexto, las Zonas No Interconectadas (ZNI) en Colombia enfrentan desafíos significativos en términos de acceso a la energía, afectando el desarrollo social y económico de estas regiones. La falta de conexión a la red eléctrica convencional limita las oportunidades de progreso y mejora de la calidad de vida de sus habitantes. La implementación de sistemas de digestión anaeróbica para la generación de energía se presenta como una solución viable y sostenible para abordar estos retos (Santos, 2024).

El objetivo de este documento es analizar las características y beneficios de los sistemas de digestión anaeróbica, destacando su potencial para transformar los residuos orgánicos en biogás y biofertilizantes. Se pretende proporcionar una visión integral de cómo estos sistemas pueden contribuir a la autosuficiencia energética de las zonas rurales no interconectadas, promoviendo el desarrollo sostenible y mejorando la calidad de vida de las comunidades. A lo largo de este documento, se explorará el estado actual de la tecnología de biodigestores, se revisarán estudios de caso y se evaluarán las oportunidades y desafíos asociados con su implementación en Colombia. El lector encontrará un análisis detallado de los aspectos técnicos, económicos y ambientales de los sistemas de digestión anaeróbica, así como recomendaciones para su adopción y expansión en las ZNI.

Este estudio revisa características de digestores anaeróbicos para promover soluciones energéticas sostenibles en las zonas rurales de Colombia. A través de una revisión bibliográfica, se analiza el diseño, la gestión de residuos, factores químicos y la extracción de materia bioquímica de estos sistemas. Se espera que la adopción de digestores anaeróbicos impulse el desarrollo rural, mejore la seguridad energética y fomente prácticas agrícolas sostenibles, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible y la lucha contra el cambio climático.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El acceso a la energía eléctrica es un factor crucial para el desarrollo económico y social de cualquier región. En las zonas rurales, especialmente en los países en desarrollo, la falta de acceso a la electricidad representa una barrera significativa para el progreso. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), los hogares rurales que carecen de electricidad experimentan una pérdida significativa de ingresos potenciales, estimada en 30% o más (IEA, 2022).

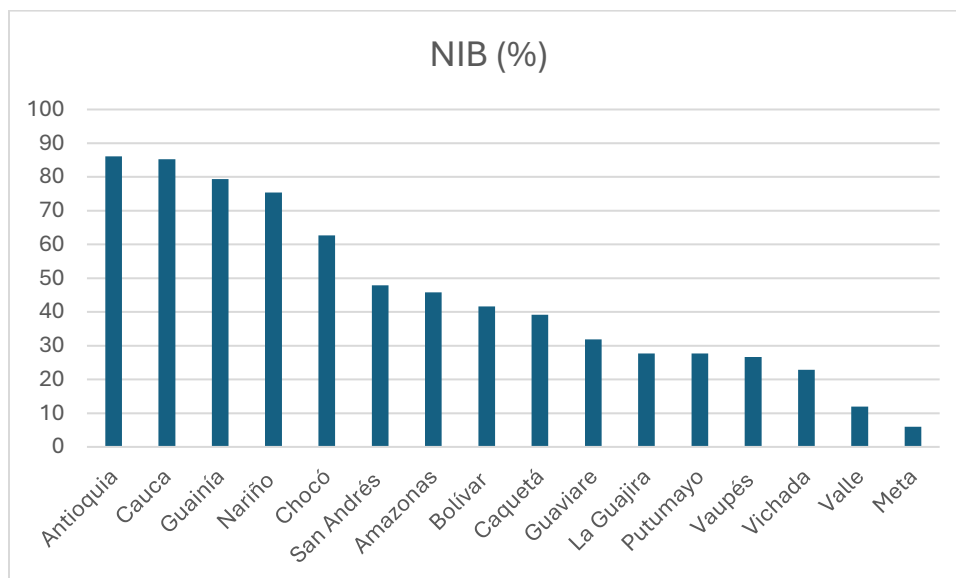
La falta de acceso a la red eléctrica convencional en áreas rurales resulta en interrupciones constantes en el suministro de energía, limitando las oportunidades de desarrollo económico y social, lo cual actúa como un freno significativo para el desarrollo económico local (Catuogno et al., 2019). Según Kanagawa y Nakata (2018), la electrificación rural está correlacionada directamente con el aumento de la productividad agrícola y la diversificación de las actividades económicas ya que la electrificación rural permite la introducción de maquinaria moderna y sistemas de riego eficientes, lo que resulta en un aumento significativo de la productividad agrícola, además, facilita el procesamiento y almacenamiento de productos agrícolas, aumentando su valor de mercado y extendiendo su vida útil. Sin electricidad, las comunidades rurales no pueden procesar ni conservar productos agrícolas eficientemente, reduciendo su valor de mercado y limitando las oportunidades de ingresos. A nivel global, millones de personas, principalmente en zonas rurales, carecen de este servicio básico. En 2020, aproximadamente 733 millones de personas no tenían acceso a la electricidad, concentrándose mayoritariamente en África subsahariana y Asia meridional (IEA, 2022). La dispersión geográfica de las comunidades y los terrenos difíciles aumentan significativamente los costos de extensión de la red eléctrica convencional (Palit & Bandyopadhyay, 2017).

Por otra parte, la inestabilidad en el suministro de energía eléctrica en las zonas rurales puede generar impactos negativos en la productividad económica y la competitividad de las comunidades, la afectación de esta inestabilidad en actividades comerciales da paso a una dependencia de fuentes de energía costosas y poco fiables con repercusiones referentes al aumento de la pobreza y la desigualdad en estas áreas, al limitar el acceso equitativo a servicios energéticos básicos (Almeida et al., 2020). En el ámbito educativo, la falta de acceso a la tecnología debido a la limitada disponibilidad de energía eléctrica en zonas rurales compromete el desarrollo educativo y, por ende, el desarrollo social de las comunidades rurales (Patiño-Ramírez, 2023). La falta de acceso a recursos educativos digitales y a iluminación adecuada para el estudio puede afectar el rendimiento académico de los estudiantes y limitar sus oportunidades de aprendizaje y crecimiento.

La brecha urbano-rural en el acceso a la energía eléctrica refleja desigualdades sociales que afectan el desarrollo y el bienestar de las comunidades rurales (Pedraza, 2023). Las personas en áreas rurales, especialmente aquellas con discapacidades, enfrentan desigualdades en el acceso a la salud y a servicios básicos debido a la falta de conexión a la red eléctrica (Terrazas, 2024).

De acuerdo con el informe presentado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios en el año 2021.

Figura 1. Índice NBI en ZNI

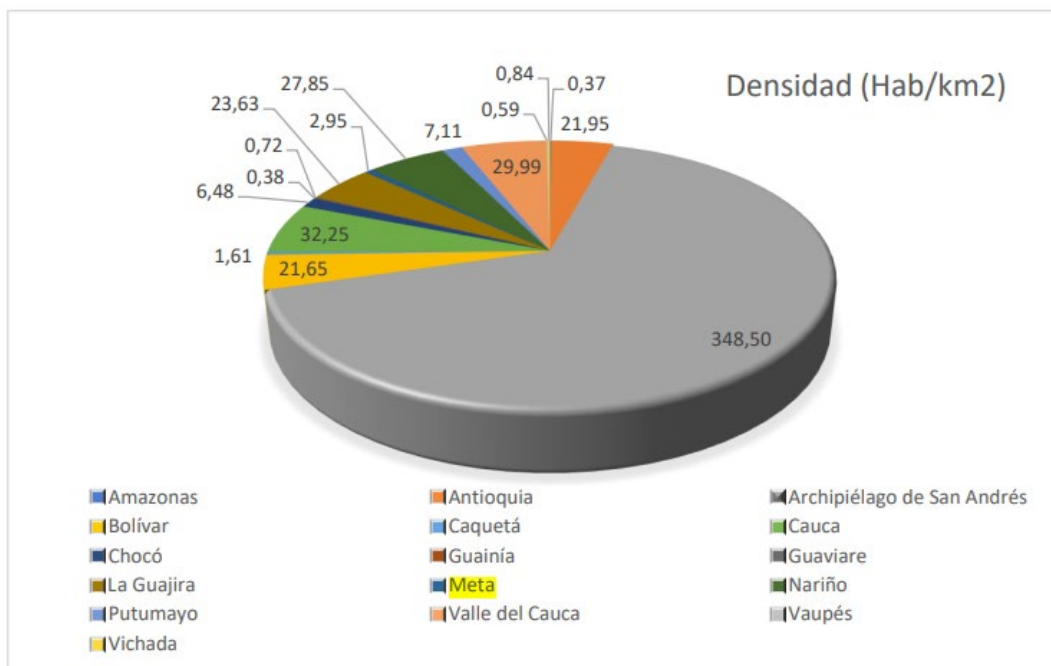


Fuente: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios

En la figura 1, el Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) en las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia refleja el porcentaje de la población en cada departamento que no tiene cubiertas sus necesidades básicas. Los departamentos con mayor NBI son Vaupés (86.14%), Guainía (85.26%), La Guajira (79.34%), Vichada (75.40%) y Chocó (62.73%). Estos departamentos presentan los índices más altos de necesidades básicas insatisfechas, con más del 50% de su población afectada (Informe Sectorial ZNI 2021).

En Colombia, el acceso a la energía en áreas como el Meta presenta un desafío significativo, debido a que este departamento con su diversidad geográfica y localidades remotas enfrenta dificultades para extender la red eléctrica nacional (Gobernación del Meta, 2020). Según datos del Ministerio de Minas y Energía, aproximadamente el 20% de la población del Meta vive en zonas no interconectadas, afectando la calidad de vida y el desarrollo económico de la región (Ministerio de Minas y Energía, 2019). La falta de infraestructura vial adecuada incrementa los costos y desafíos logísticos especialmente en épocas de lluvia cuando muchos caminos se vuelven intransitables. Esto causa que el transporte de equipos, materiales y personal técnico se convierta en una tarea compleja y costosa, junto con la dispersión de las comunidades debido a que en Colombia Las ZNI de abarcan aproximadamente el 52% del territorio nacional, equivalente a 1.141.748 km². Estas áreas presentan una notable dispersión geográfica y dificultades para conectarse con el Sistema Interconectado Nacional (SIN), además de tener una baja densidad demográfica, como se observa en los datos de la figura 2 de los departamentos correspondientes (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2021).

Figura 2. Densidad poblacional aproximada ZNI (2021)



Fuente: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios

El departamento del Meta tiene una densidad poblacional de 6.48 habitantes por kilómetro cuadrado esto causa que los proyectos de interconexión al SIN eleven los costos y la complejidad de cualquier proyecto de electrificación. La falta de carreteras adecuadas y otras infraestructuras de transporte también dificulta el acceso a estas áreas, lo que agrava aún más el problema. El acceso a la energía en las ZNI está restringido, lo que provoca notables consecuencias económicas. La ausencia de electricidad dificulta las oportunidades de emprendimiento y el crecimiento de actividades productivas impactando la economía local. Las industrias agrícola y ganadera, predominantes en la zona, dependen de la energía para las operaciones de equipos y procedimientos de producción. Sin un suministro energético confiable, estos sectores no pueden maximizar la eficiencia ni ampliar su alcance (Garzón 2020).

Además, depender de fuentes de energía no convencionales como los generadores diésel genera mayores gastos operativos e impacta la eficiencia de los fabricantes locales. Este escenario sostiene un patrón de pobreza y progreso inadecuado, ya que el acceso insuficiente a la energía obstaculiza la expansión económica, mientras que los ingresos limitados inhiben la adopción de alternativas energéticas adecuadas (Rodríguez & Martínez, 2021). Ante esta problemática, surge la pregunta: ¿Cómo pueden los sistemas de digestión anaeróbica ser una alternativa económica para a la generación de energía y al desarrollo sostenible en las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia? Esta interrogante guía la presente investigación, buscando explorar el potencial de los biodigestores como solución a los desafíos energéticos y de desarrollo en estas regiones.

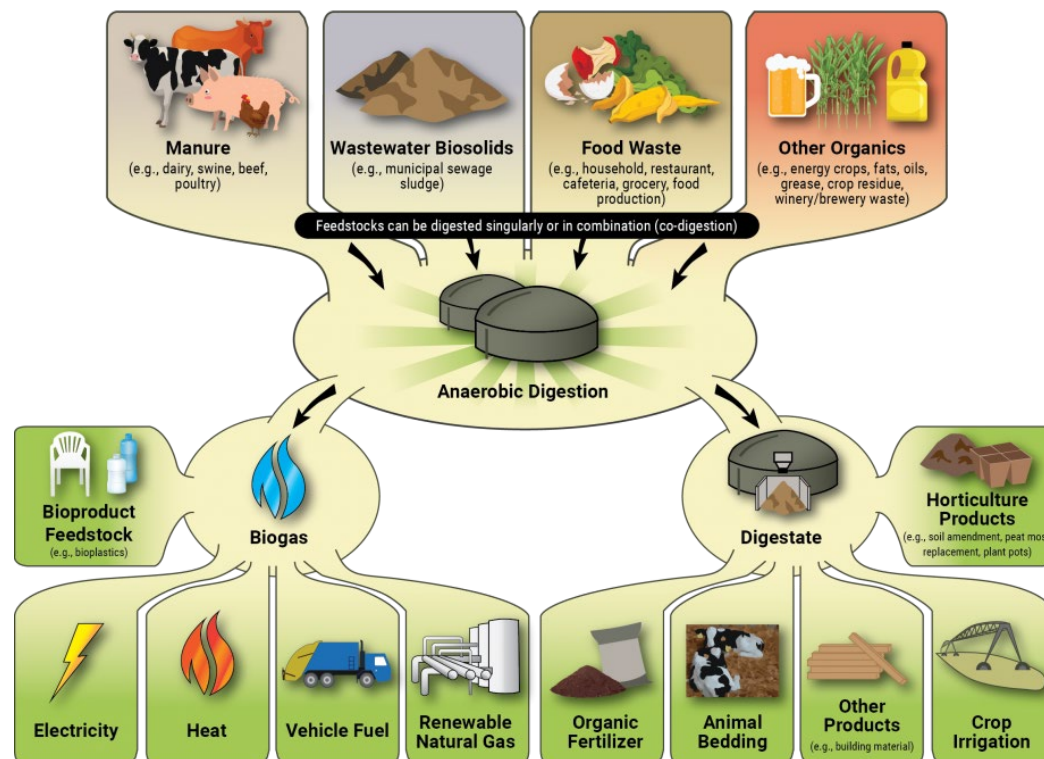
2. JUSTIFICACIÓN

La generación de energía con biodigestores ofrece numerosas ventajas que contribuyen al desarrollo sostenible y a la preservación del medio ambiente. Los biodigestores, en particular los sistemas de digestión anaeróbica proporcionan una fuente de energía renovable al convertir los residuos orgánicos en biogás, que puede utilizarse para cocinar, calentar y generar electricidad Andreazzi et al. (2017), este proceso ha despertado un creciente interés debido a su capacidad para generar energía de manera sostenible y enfrentar desafíos energéticos en áreas remotas. Según la literatura científica, la digestión anaeróbica se considera una solución ingenieril eficaz para degradar desechos orgánicos y producir biogás, lo que la convierte en un método sostenible para el tratamiento de residuos y la producción de energía limpia, especialmente en zonas rurales (Qian et al., 2017).

Este proceso no solo ayuda en la gestión de desechos, sino que también permite la recuperación de materia orgánica, con diferentes tipos de residuos orgánicos como el estiércol de ganado, ya que ofrece una solución versátil de generación de energía que se puede aplicar en varios sistemas de producción (Paes et al., 2020). Independientemente de las prácticas agrícolas implementadas, los biodigestores pueden convertir de manera eficiente los residuos orgánicos en valiosos recursos energéticos, promoviendo un enfoque de economía circular y reduciendo los problemas de eliminación de desechos lo cual es un beneficio crucial en entornos rurales (Qian et al., 2017). De hecho, los sistemas de biogás podrían cubrir un abanico de necesidades energéticas en todo el mundo, a la vez que se reducen los flujos de residuos y se proporciona biofertilizante como producto derivado. Algunos analistas sugieren incluso que esta forma de bioenergía, beneficiosa para todos, podría aportar contribuciones significativas para conseguir los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU y ayudar a las naciones a alcanzar sus objetivos de emisiones según el Acuerdo climático de París (Salazar, 2022).

La tecnología para la producción de biogás es sencilla y se puede implementar de manera económica y eficiente mediante digestores a pequeña escala fáciles de usar y mantener. Estos biodigestores domésticos benefician a toda la sociedad, aun que tienen un impacto especial en las necesidades de los agricultores rurales, ya que pueden usar el gas producido para cocinar, iluminar, cargar baterías de generadores de biogás y fertilizar cultivos con los residuos resultantes (Salazar, 2022) como se ilustra en la figura 3.

Figura 3. Ilustración de cómo funciona un sistema de biogás



Fuente: Mongabay Noticias ambientales, 2020

También se ha evidenciado que el proceso de digestión anaeróbica puede aportar diversas ventajas a los entornos rurales. Entre estas se incluyen la disminución de gastos en combustibles para cocina e iluminación, el enriquecimiento de la tierra mediante el empleo de biofertilizantes, la mitigación de emisiones que contribuyen al efecto invernadero y la conservación de áreas boscosas (Gough, 2023). Adicionalmente, se ha destacado que la implementación de biodigestores en áreas rurales facilita el acceso a fuentes de energía modernas, lo cual es esencial para elevar el nivel de vida de estas poblaciones y fomentar un desarrollo que respete el medio ambiente (Silva-Martínez et al., 2020).

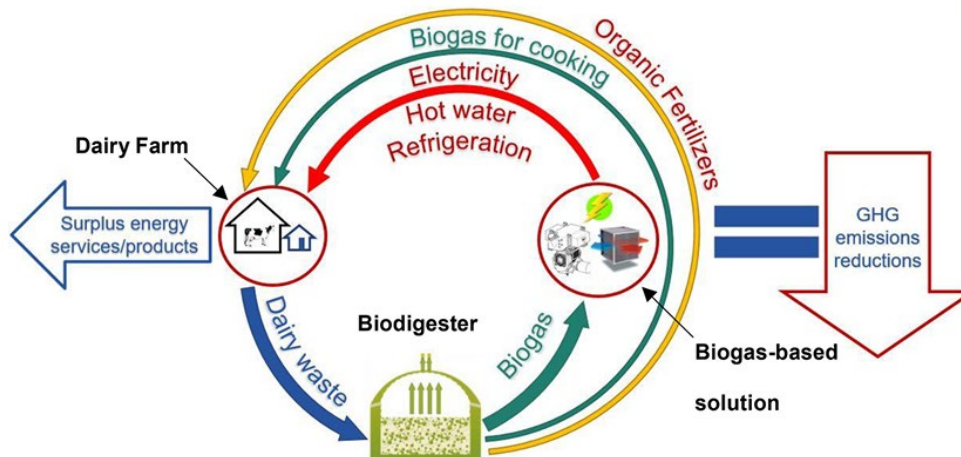
Esto sugiere que este proceso podría ser una solución atractiva para la producción de energía renovable a partir de residuos orgánicos en áreas rurales, asimismo, se ha destacado que la combinación de biodigestores con establos y baños puede facilitar la degradación de desechos orgánicos mediante la acción de bacterias en condiciones anaeróbicas, lo que resulta beneficioso tanto para el medio ambiente como para los agricultores (He et al., 2022).

Los biodigestores desempeñan un papel crucial en la promoción de la economía circular, especialmente en el ámbito agrícola. Como se ilustra en la figura 4 de una granja lechera, estos sistemas facilitan el cierre efectivo del ciclo de materiales orgánicos. Al procesar los desechos de la granja, el biodigestor genera biogás, una fuente versátil de energía renovable que se emplea para cocinar, generación de electricidad, agua caliente y refrigeración. Esta

transformación de residuos en recursos energéticos no solo satisface las necesidades locales, sino que también puede generar excedentes, potenciando así el desarrollo económico (Villarroel, 2022).

Más allá de la producción energética, el proceso de biodigestión produce fertilizantes orgánicos, reintegrando nutrientes valiosos al ciclo agrícola. Esta faceta del sistema encarna la esencia de la economía circular, donde los residuos de un proceso se convierten en insumos para otro. Adicionalmente, la implementación de biodigestores contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose con los objetivos de sostenibilidad y mitigación del cambio climático (Cortez, Cherri, Jugend, Jesus, & Bezerra, 2022). La integración de biodigestores en entornos agrícolas no solo optimiza la gestión de residuos y la eficiencia energética, sino que también fomenta prácticas agrícolas más sostenibles. Este enfoque holístico hacia la producción y el consumo de recursos ilustra cómo los biodigestores pueden ser instrumentos efectivos para impulsar la transición hacia una economía más circular y ambientalmente responsable en el sector agrícola climático (Cortez, Cherri, Jugend, Jesus, & Bezerra, 2022).

Figura 4. Economía circular e implementación de biodigestores



Fuente: (Villarroel, 2022)

La implementación de biodigestores portátiles a escala doméstica representa una solución práctica y accesible para convertir los residuos orgánicos en valiosos recursos energéticos, como el biogás y los biofertilizantes (Wijaya, 2023). Al adoptar innovaciones en biodigestores portátiles, los hogares pueden contribuir a prácticas sostenibles de gestión de residuos y, al mismo tiempo, generar energía renovable para su propio uso, promoviendo la autosuficiencia y la gestión ambiental. Esto es especialmente relevante en las Zonas No Interconectadas (ZNI) en zonas rurales de Colombia, donde las desventajas significativas en torno al desarrollo social y económico se ven exacerbadas por la falta de acceso a una red de energía, información actualizada y recursos suficientes para invertir en sistemas de energía alternativa (Ferdous, 2020; Singh, 2019; Yudha, 2020).

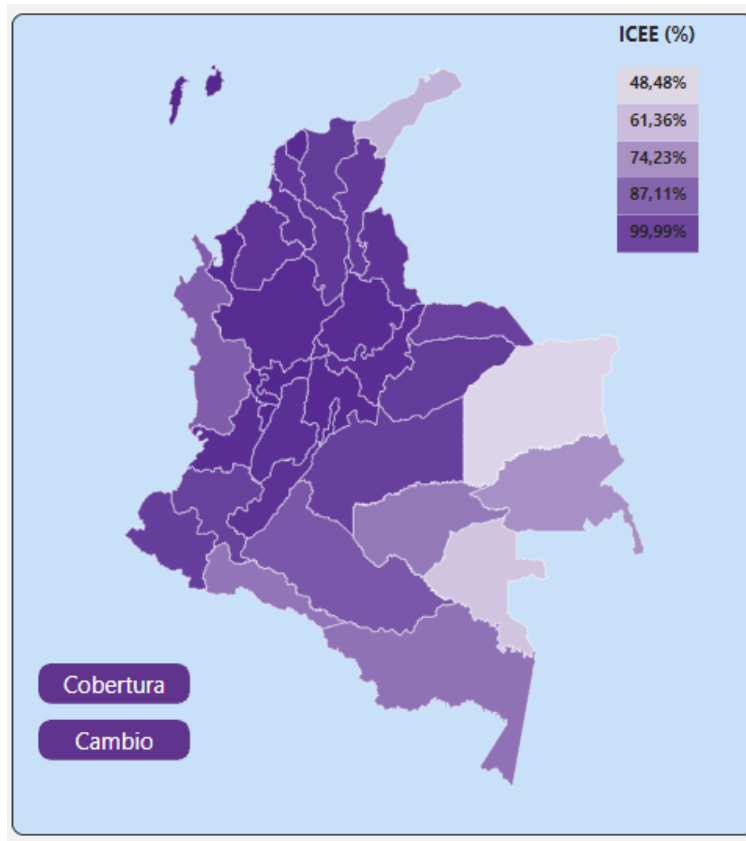
La implementación de sistemas de digestión anaeróbica en estas áreas puede contribuir significativamente a la transición hacia una economía circular, promoviendo la producción de biometano y compost a partir de desechos orgánicos (Bux, 2023). Estos enfoques no solo generan energía renovable, sino que también fomentan la producción de abono orgánico de alta calidad, lo que puede mejorar la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental en las zonas rurales (Bolzonella et al., 2023). Este desarrollo es fundamental para el progreso económico de cualquier nación, ya que busca mejorar la calidad de vida de los pobladores, el progreso de las comunidades y fortalecer la producción local.

Acorde a las guías ambientales elaboradas por el Ministerio del Medio Ambiente (MMA), en contados casos, se sugiere el manejo recomendado para la biomasa residual resultado de procesos productivos agropecuarios con el fin de evitar olores ofensivos y disminuir los impactos por contaminación en suelo y agua, se hace referencia únicamente al uso de técnicas como el compostaje, digestión anaerobia (Rincón y Castiblanco, 2021). Por otra parte, Según Fernandes, M.M et al., (2021) concluye que “los biodigestores son una alternativa importante al saneamiento rural” “Las diferentes características de cada tecnología permiten concluir que existen biodigestores alternativos para diferentes necesidades” la implementación de estos sistemas depende de las necesidades, presupuesto y tipo de la energía producida, en este sentido el trabajo realiza la compilación documental de los actuales sistemas implementados, resaltando las principales diferencias y semejanzas entre ellos.

Este documento realiza una comparativa del uso de biodigestores a menor escala implementados en la actualidad lo cual beneficia a pequeños agricultores (ubicados en zonas rurales no interconectadas) que busquen darles un uso a los residuos orgánicos e incursionarse en la implementación autónoma de sistemas de generación de energías alternativas (Biodigestores) con el objeto de mejorar su calidad de vida. El informe generado tiene una utilidad metodológica, ya que puede aportar a el desarrollo de futuras investigaciones referentes a la utilización de energías alternativas, permitiendo usar metodologías similares y/o compatibles, así mismo comparar las implementaciones ya realizadas teniendo una base sólida sobre las características a tener en cuenta en futuros empleos de sistemas de digestión anaeróbica.

Es necesario reconocer el potencial que tienen las energías renovables actualmente en base a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que Colombia plantea, más específicamente en materia de energía asequible y no contaminante, como se observa en la figura 5, el Índice de cobertura de energía eléctrica (IEEE) en Colombia abarca varios departamentos con tasas muy bajas de conexión desde un 74,23%, 61,36% y 48,48%, complementando lo anterior el informe pretende contribuir a los estudios y/o investigaciones a nivel nacional en cuanto a las características de diseño a tener en cuenta como base para nutrir información necesaria sobre el estado actual del avance en energías alternativas en zonas rurales.

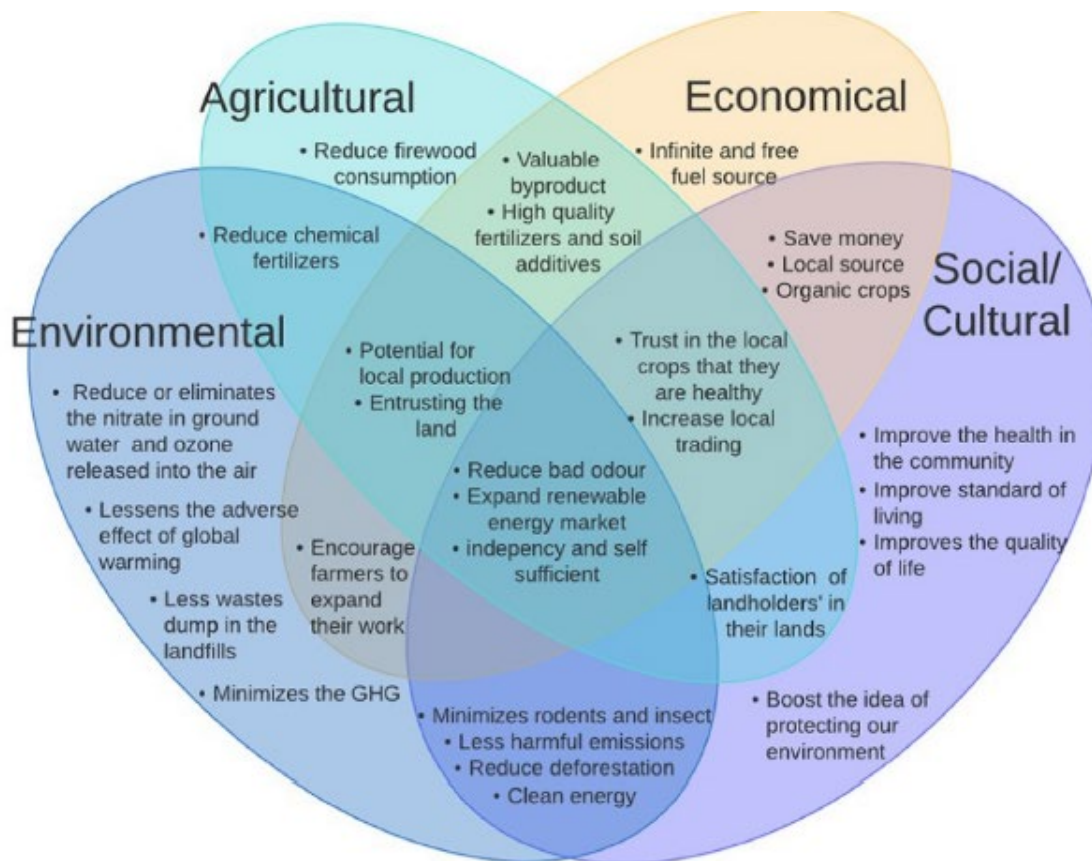
Figura 5. Índice de cobertura de energía eléctrica (IEEE) en Colombia



Fuente: Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)

El impacto de la implementación de biodigestores se ve reflejado en la economía, en el ambiente, la agricultura y en lo social, como se puede observar en la figura 6, es necesario resaltar el beneficio económico: bajos costos, social/cultural: satisfacción de los terratenientes en sus tierras, además del ánimo de los agricultores para expandir su trabajo, aumento del potencial de la producción local, disminución de emisiones nocivas. Independencia/autosuficiencia en cuanto a energía, y por último la expansión del mercado de energías renovables.

Figura 6. Beneficios varios de la implementación de biodigestores



Fuente: Aridi & A. Yehya, (2024)

Según Achuri y Herrera (2023), es esencial plantear estrategias de mejora para la adopción de energías alternativas en zonas aisladas, optimizando el uso de residuos generados en unidades productivas bajo parámetros de sostenibilidad. Se deben implementar procesos de sensibilización para fomentar la adopción efectiva de recursos energéticos complementarios. Este documento contribuye significativamente a las estrategias futuras para proyectos de energías alternativas, especialmente en la obtención de energía mediante digestión anaeróbica.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las características respecto al diseño e implementación de sistemas de digestión anaeróbica en zonas rurales no interconectadas como fuentes de generación de energía limpia mediante una revisión sistemática documental.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

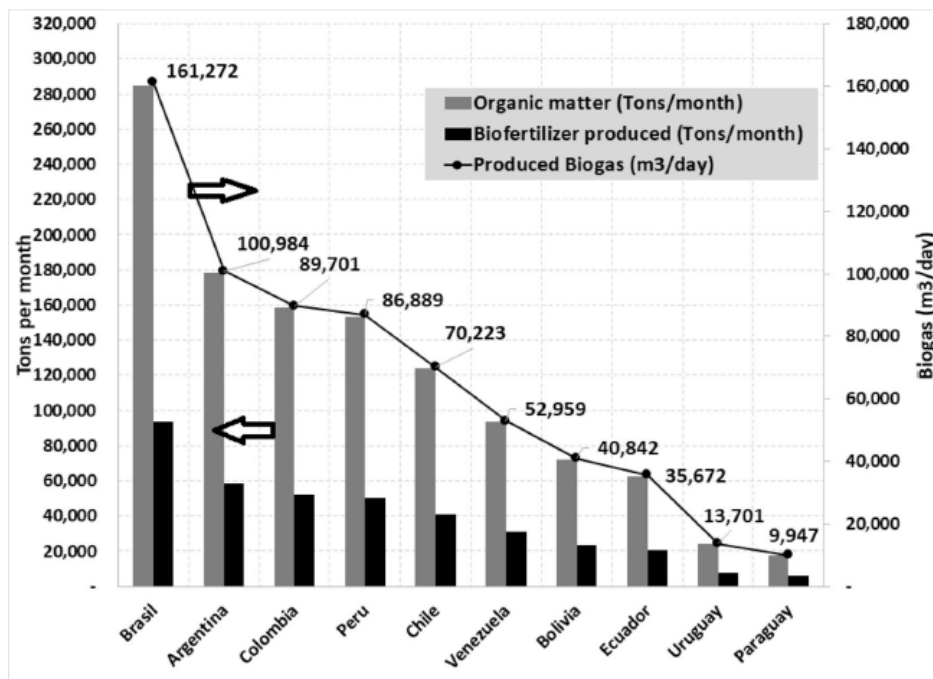
- Recopilar información detallada sobre sistemas de generación de energías limpias con digestores anaeróbicos, teniendo en cuenta la viabilidad y beneficios en zonas rurales no interconectadas.
- Examinar características relevantes de digestores anaeróbicos en cuanto a diseño, gestión de residuos orgánicos, factores químicos y la extracción de materia bioquímica para la generación de energía.
- Evaluar los beneficios de la integración de sistemas de biodigestión al sector rural en los aspectos social, económico y ambiental como una alternativa sustentable en la generación de energía.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ESTADO DEL ARTE

Acorde a Gómez et al., (2024) el potencial de recolección de materia orgánica en Colombia es uno de los más altos comparados con países latinoamericanos Figura 7, en este contexto el autor analiza la viabilidad de integración a una economía circular la cual podría cambiar la economía del campo, tratando de hacer rentable la agricultura orgánica para los pequeños y medianos productores, además agrega la proporcionalidad que existe entre la cantidad de materia orgánica disponible y la cantidad de biogás producida por día.

Figura 7. Potencial para recolección de materia orgánica, biofertilizantes y producción de biogás.

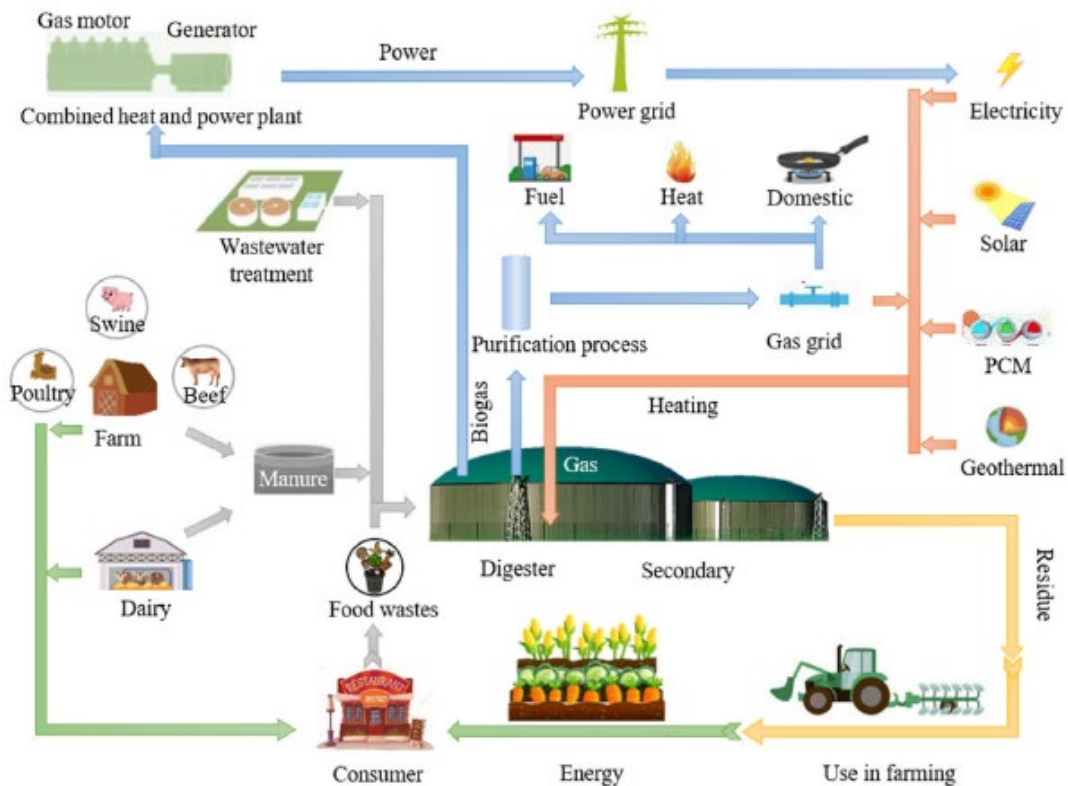


Fuente: (Gómez et al., 2024)

La capacidad de un biodigestor a escala doméstica es relativamente menor que la de un biodigestor industrial, un digestor doméstico es más fácil de construir, más fácil de implementar en lugares de alta densidad y aún puede proporcionar suficiente electricidad o calor para varios hogares circundantes. Thanh, H. (2023), en contraste, los biodigestores a pequeña escala, especialmente frecuentes en las zonas rurales de los países de ingresos bajos y medianos, convierten la materia orgánica en biogás para la iluminación y la cocina, y el subproducto restante se utiliza como fertilizante orgánico Aridi & A. Yehya, (2024); en este sentido las implementaciones de biodigestores recalcan la viabilidad que tienen como alternativa energética en zonas rurales no interconectadas de Colombia.

Se define que la cantidad de biogás producido por los procesos de digestión anaeróbica depende de un número de factores operacionales incluyendo pH, la tasa de carga orgánica (OLR), el tiempo de retención hidráulica (TRH), temperatura, el tamaño del tanque, el tipo de materia prima utilizada, el patrón de alimentación y la relación carbono/nitrógeno (C/N), Sharma et al. (2023) . Es importante considerar los factores que pueden estar involucrados en la recopilación de información documental.

Figura 8. Proceso de biodigestión en la obtención de energía a gran escala



Fuente: Aridi & A. Yehya, (2024)

Explica Spyridon Achinas et al., (2020) la digestión anaeróbica (DA) es un proceso para producir biogás y sirve como un método potencial de conversión de residuos en energía ((Waste to energy)WtE), transformando los residuos orgánicos en combustible de biogás gaseoso consumible en ausencia de oxígeno. La implementación a gran escala del proceso de una planta biodigestora (ver figura 8) contribuye a una economía circular, ya que mediante el uso de diversos materiales de desecho se produce biogás (Aridi & A. Yehya, 2024)." Se observa en la figura 8 la utilización de varios desechos orgánicos como lo son las heces de ganado, desechos de aves de corral, y de cerdos, por otra parte, se emplean de igual manera los desechos orgánicos diarios de la actividad humana como: cascaras, vegetales, restos de frutas y verduras, hojarasca entre otros.

El biogás se compone principalmente de 2 elementos, el metano CH_4 y el dióxido de carbono CO_2 , mientras que el CO_2 no puede ser usado para generar electricidad o energía, el CH_4 es un gas valioso que puede ser utilizado para procesos de calefacción y generación de electricidad. El porcentaje de CH_4 en el biogás, derivado del estiércol, varía según el tipo de ganado. En el caso de ganado lechero este porcentaje oscila entre el 50 % y el 70 %, aves de corral entre 50 % y el 70 % y por último el de cabras u ovejas oscila entre 40% y 50% Thanh Hung Nguyen et al. (2024), actualmente los desechos orgánicos más usados en la generación de biogás se inclinan al ganado lechero por su alta producción de CH_4 .

Acorde a Pradeshwaran et al. (2024) la composición del alimento utilizado como materia orgánica para la obtención de biogás en especial aquellos ricos en carbohidratos y fibra como el arroz juegan un papel importante en la cantidad de gas producido, en paralelo se analiza y se obtiene que la cantidad de producción de metano fue mayor dentro de los 28 días de tiempo de retención hidráulica, además, ve necesario el investigar más a fondo el tema ya que la actividad microbiana a lo largo de la DA es un factor vital en la estabilidad del proceso y la producción de biogás. Se requiere investigación tecno económica diaria para transformar los desechos de alimentos en biomasa utilizando unidades de digestión más pequeñas. Para abordar con éxito las preocupaciones ambientales gemelas de la gestión del desperdicio de alimentos y la satisfacción de la demanda de energía, los digestores a pequeña escala deben funcionar adecuadamente.

4.2 MARCO HISTÓRICO

El conocimiento sobre la digestión anaeróbica tiene sus primeras menciones en textos antiguos. Por ejemplo, el médico persa Al-Razi documentó la formación de gas a partir de residuos animales en su obra *Kitab al-Hawi* (Lagerkvist, 2020). Sin embargo, el estudio sistemático de este proceso comenzó con las observaciones de Jan Baptist van Helmont en el siglo XVII, quien notó la producción de gases a partir de materiales en descomposición (Chen et al., 2008). Estos microorganismos, como los que se encuentran en el rumen de los animales, han evolucionado para descomponer la biomasa vegetal y sus carbohidratos complejos en azúcares solubles que pueden fermentarse y convertirse en metabolitos y nutrientes utilizados por el animal huésped Hagen et al. (2020).

A lo largo de la historia, la digestión anaeróbica ha evolucionado como una tecnología eficaz para el tratamiento de residuos orgánicos y la producción de biogás, alcanzando un punto crucial durante la crisis energética de la década de 1970 (inflex Aridi & A. Yehya, 2024). Este período de escasez y altos precios del petróleo catalizó un renovado interés en fuentes alternativas de energía, posicionando la digestión anaeróbica como una opción prometedora. Esto impulsó una ola de investigaciones y desarrollo de tecnologías avanzadas para optimizar la producción de biogás y mejorar la eficiencia del proceso (Weiland, 2010). Los avances significativos en la comprensión de los procesos bioquímicos involucrados en la digestión anaeróbica han permitido su aplicación en diversos sectores, desde el tratamiento de aguas residuales hasta la generación de energía a partir de residuos orgánicos (Tanor et al., 2021). La investigación ha demostrado que la digestión anaeróbica es una solución valiosa para el tratamiento de una amplia gama de residuos orgánicos, ya que ofrece ventajas como la reducción del volumen de los residuos y la producción de energía renovable (Polizzi et al., 2017).

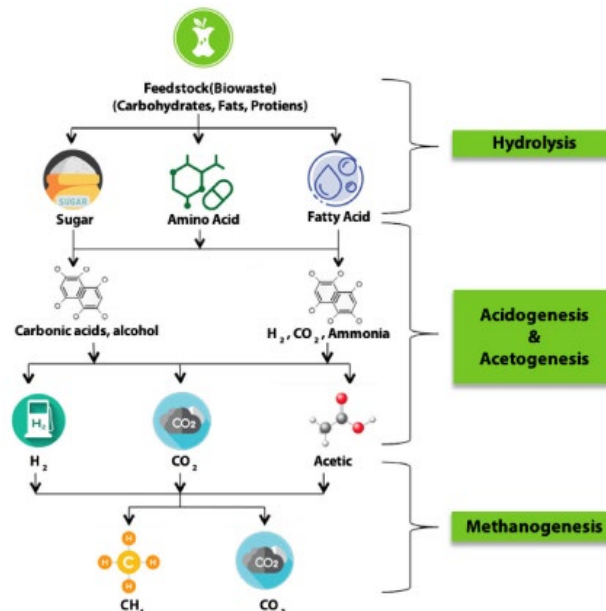
A lo largo del siglo XX, se realizaron mejoras significativas en el diseño de los digestores. La introducción del tanque Imhoff en 1906 por Karl Imhoff fue un hito importante, proporcionando un sistema más eficiente para la separación de sólidos y la digestión anaeróbica. Este diseño permitía una mayor retención de sólidos y mejoraba la eficiencia del proceso de digestión. En las décadas de 1950 y 1960, la tecnología de digestión anaeróbica se benefició de avances en la comprensión de la microbiología del proceso. Investigaciones detalladas sobre las comunidades microbianas involucradas y sus interacciones permitieron optimizar las condiciones de operación, como la temperatura, el pH y la carga orgánica, para maximizar la producción de biogás (McCarty, 1964).

4.2 MARCO TEÓRICO

El desarrollo de un digestor depende de varios parámetros, como los materiales y su disponibilidad, las condiciones climáticas de la ubicación de la planta, y los factores geográficos e hidrológicos (Glivin y Sekhar, 2016). En cuanto a los tipos de sistemas de digestión anaeróbica actualmente existen varios tipos de biodigestores implementados acorde a su diseño y tipo de operación, la clasificación principalmente se divide en dos, el tipo fijo y el tipo flotante. Los factores que influyen en los diversos tipos de digestores de biogás en todo el planeta son la hidrodinámica de los sustratos, los aspectos mecánicos como la resistencia de los materiales, el costo de los diversos componentes, la complejidad de la planta y la accesibilidad de los materiales (N. Kalaiselvan et al., 2022), en este documento no se tendrá en cuenta la hidrodinámica de los sustratos.

En la figura 9 se muestra el proceso de digestión anaeróbica, que en su primer paso incluye la etapa de hidrólisis. En esta etapa, los polímeros insolubles se descomponen debido a la acción de las bacterias que liberan enzimas hidrolíticas (Hussain et al., 2021). Los hidratos de carbono, lípidos y proteínas se transforman en azúcares, ácidos grasos de cadena larga y aminoácidos, respectivamente. Durante la acidogénesis, las moléculas solubles se convierten en CO_2 y H_2 , junto con ácido acético, ácido propiónico, etanol y otros alcoholes. En la última etapa, la metanogénesis, se generan metano, hidrógeno y ácidos grasos (Fagundes et al., 2020).

Figura 9. Proceso de conversión bioquímica (digestión anaeróbica)

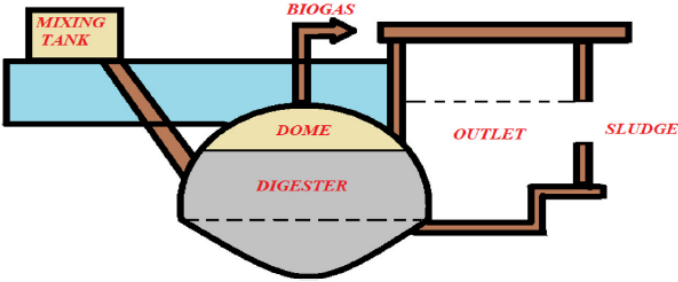
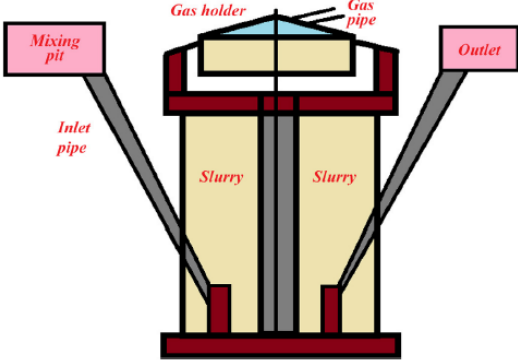


Fuente: N. Kalaiselvan et al., (2022)

Como se puede observar en la Tabla 1 los tipos de biodigestores implementados a pequeña escala comprenden modelos: a) Chino, b) Hindú y c) Taiwán (Tubular), cada uno posee ciertas ventajas y desventajas basados en su diseño, estas características se reflejan en la tabla 2.

En cuanto al tipo de operación de los biodigestores anteriormente mencionados, los tres operan bajo carga continua, esto hace referencia a que los desechos orgánicos utilizados para el proceso de digestión anaeróbica son continuamente introducidos por el caño de entrada a la cámara de digestión, por lo general estos biodigestores acumulan los sedimentos del sustrato en la parte inferior de la cámara para posteriormente ser utilizados como abono o biofertilizante, en cuanto a la operación del tipo de biodigestor estacionario, se suministran los desechos en lote (Batch) lo cual implica desocupar el biodigestor y posteriormente volverlo a alimentar, en esta ocasión no se tiene en cuenta esta última configuración.

Tabla 1. Características de los tipos de biodigestores implementados a pequeña escala

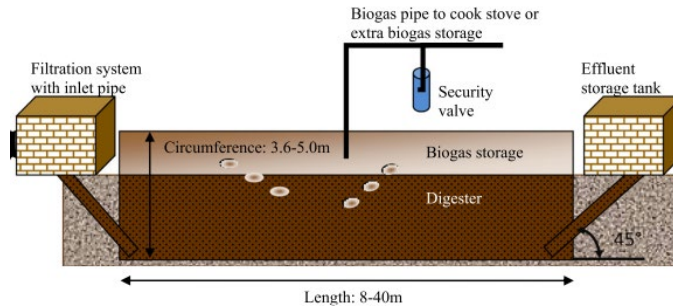
Tipo de biodigestor	Características de diseño	Esquemático
Chino	Cúpula fija	
	Buen sello hermético	
	Diseño semiesférico	
	Concreto reforzado	
	Fabricado con ladrillos	
(Prashant Baredar et al., 2020)		
Hindú	Incorpora campana o cámara de gas flotante	
	Contiene materiales metálicos	
	Parte baja del digestor cónica	
	Presión constante a la salida del tubo de escape de gas	
(Prashant Baredar et al., 2020)		

Taiwán (tubular)

Construcción horizontal

Requiere áreas con espacio mayor

Materiales plásticos



(Kinyua et al., 2016)

Fuente: (Elaboración propia, 2024)

Tabla 2. Ventajas y desventajas de biodigestores implementados a pequeña escala

Tipo de biodigestor	Ventajas	Desventajas
Tipo chino	Costo bajo de manufactura	Fluctuación de la presión del biogás
	Partes no movibles	Dificultad de reparación
	implementación en espacios reducidos, bajo suelo	Depende de la composición del terreno
Tipo hindú	Fácil operación	Costo más elevado
	Volumen de gas visible	Corrosión en las partes de acero
	Presión de biogás constante	Vida útil menor
		Costos más elevados de mantenimiento
	Costo bajo de implementación	Vida útil relativamente corta
Taiwán (tubular)	Fácil de construir	Susceptible a fallo mecánico

Ofrece temperaturas altas en climas cálidos

Requiere de peso extra para aumentar la presión del biogás

No se puede remover el lodo restante

Fuente: (Elaboración propia, 2024)

Los tipos de sustrato utilizados en sistemas de digestión anaeróbica comprenden los desechos de heces/estiércol de animales, desechos de comida, desechos de heces humanos y lodos de depuradora. El estiércol es un material comúnmente utilizado para la digestión anaeróbica DA por varias razones, principalmente porque tiene un pH neutro, una alta capacidad amortiguadora y contiene una mezcla de microbios responsables de la DA de forma natural (H.M. Mahmudul et al., 2021); en la tabla 3 se pueden observar las cantidades aproximadas de metano CH₄ que contienen los diferentes tipos de desechos de materia prima.

Tabla 3. Contenido de metano de varios sustratos

Sustrato/desecho	Contenido de metano
Desechos de cerdos	00.250–00.500 m^3 /kg
Desechos de ganado bovino	00.200–00.300 m^3 /kg
Desechos de comida de pollo	00.350–00.600 m^3 /kg
Desechos humanos	00.030 $m^3 /persona$
Desechos vegetales	00.250–00.500 m^3 /kg
Desechos de comida	00.500–00.600 m^3 /kg
Hojas de plantas	00.100–00.300 m^3 /kg

Fuente: Bhandari et al. (2017)

Para la obtención óptima de biogás, se deben considerar los factores principales presentados en la tabla 4, que reflejan las implementaciones realizadas para mejorar la eficiencia en la producción de metano CH₄.

Tabla 4. Factores óptimos para la obtención del biogás

Factor	Rango óptimo	Autor
pH	6.8–7.4	(Mao et al., 2015)
	6.8–7.2	(Ning et al., 2019a,b)
Tasa de carga orgánica (OLR)	1.2–12.0 kg /m ² sólidos volátiles /día	(Guo et al., 2014)
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	Mínimo 10 días	(Guo et al., 2014)
Temperatura	Mesófila (30–40°C) Termófila (50–60 °C)	(Zaharin et al., 2017)

Fuente: (Elaboración propia, 2024)

Los residuos del sustrato de biodigestores se depositan en la cámara o tanque de salida ubicado al costado contrario del tanque de entrada, este tipo de residuos se conocen como: fertilizante orgánico (a menudo denominado biofertilizante (Bio-slurry)) que resulta de la producción de biogás; la utilización del fertilizante es muy valorada en la agricultura por su contenido de nutrientes, un uso generalizado de fertilizantes orgánicos (nitrógeno N, Fosforo P, Potasio K y otros nutrientes reciclados contenidos en el biofertilizante) puede permitir ahorros adicionales de emisiones de CO₂. En ese caso se evitarían las emisiones de CO₂ relacionadas con la producción de fertilizantes sintéticos. Por otro lado, utilizar nitrógeno (N) orgánico en lugar de nitrógeno sintético también reduciría las emisiones de óxido nitroso (J. Villarroel-Schneider et al., 2022).

Los usos de la energía transformada varían según el volumen de biogás obtenido en el digestor. La tabla 5 muestra la relación entre los diferentes tipos de utilización de energía y la cantidad de ganado disponible para la recolección de estiércol, evidenciando tres tipos de implementaciones: a) fincas con 15 a 50 vacas, b) 50 a 100 vacas, y c) 100 a 500 vacas (J. Villarroel-Schneider et al., 2022)

Tabla 5. Aproximación de usos de la energía en base a la cantidad de biogás disponible, casos de implementación.

Tipo de sustrato	Implementación	Uso del biogás	Sistema de transformación de energía	Uso de la energía transformada
		Biogás para calentar agua	No aplica	No aplica
	Biodigestor tubular de bajo costo (zonas cálidas)	Biogás para cocinar		
Estiércol de ganado bovino (Vacas)	Biodigestor tubular (zonas cálidas)	Biogás para calentar agua	Generador eléctrico	Electricidad para refrigeración, actividades domésticas y equipos electrónicos
		Biogás para cocinar		
	Biodigestor, hindú, o chino (Zonas frías)	Biogás para calentar agua	Sistema de energía combinado (generadores, calentadores)	Electricidad para refrigeración, actividades domésticas y equipos electrónicos, calefacción, sistemas de refrigeración.
		Biogás para cocinar		

Fuente: J. Villarroel-Schneider et al. (2022)

El biogás ofrece beneficios económicos directos tales como fertilizantes, energía y aumento en la productividad de los cultivos para los propietarios de tierras (Prasad Kaparaju & Rintala, 2013). Además, los sistemas de digestión anaeróbica (DA) proporcionan importantes beneficios ambientales produciendo biogás neutro en carbono, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (N. Kalaiselvan et al., 2022). Asimismo, la digestión anaeróbica fomenta la producción distribuida de electricidad, que no depende de combustibles fósiles importados ni está sujeta a factores externos como la luz solar o el viento, garantizando una energía continua (Aridi & A. Yehya, 2024).

El desarrollo de tecnologías eficientes para el manejo del biogás, la mejora de los sistemas agroforestales y la implementación de centrales eléctricas a pequeña y gran escala, basadas en este sistema pueden jugar un papel crucial en el desarrollo rural, ya que podría contribuir a la modernización de la economía agrícola con la energía derivada del biogás (Prashant Baredar et al., 2020).

Los sistemas también benefician a la agricultura y la salud humana al reducir la contaminación del aire y el agua, con estudios que muestran una reducción de hasta el 80-90 % en el olor de los lodos agrícolas o camas/vertederos de desechos y heces. Los residuos resultantes del proceso de DA sirven como una alternativa ecológica a los fertilizantes químicos, mejorando la calidad del aire, aumentando la eficiencia de la producción de cultivos y fomentando sistemas alimentarios sostenibles. Los biodigestores procesan eficientemente los desechos de alimentos de diversas fuentes, reduciendo los depósitos en vertederos y mejorando la eficiencia del digestor (Tamburini et al., 2020).

En cuanto a los beneficios sociales según Aridi & A. Yehya, (2024), se resumen en tres componentes energéticos principales, los cuales hacen parte del desarrollo de las comunidades y del sector agrícola en zonas rurales no interconectadas, estos son:

1. **Energía competitiva:** Al ofrecer energía limpia y de bajo costo a partir de materiales de desecho gratuitos, los biodigestores reducen las emisiones y fomentan la creación de empleo en los sectores de tecnología y apoyo relacionados.
2. **Energía sostenible:** Satisfacer las necesidades energéticas de forma sostenible, mejorando la seguridad del suministro de energía y la competitividad del mercado, con agricultores generando su propia energía a partir del estiércol disponible.
3. **Equidad energética:** Ampliar el acceso a la energía limpia para todos, incluidas las comunidades desfavorecidas, abordando la desigualdad energética.

4.3 MARCO CONCEPTUAL

La digestión anaeróbica es un proceso biológico en el que microorganismos descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno. Este método se utiliza para gestionar diversos residuos biológicos provenientes de municipios, hogares, instituciones e industrias. Además de la disposición de desechos, la digestión anaeróbica genera biogás, una mezcla gaseosa derivada de la descomposición de materia orgánica en condiciones anaeróbicas, el cual está compuesto principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), con pequeñas cantidades de otros gases como sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3), como se muestra en la tabla 6. El metano, siendo un potente gas de efecto invernadero, se utiliza como una fuente de energía renovable. La producción de biogás ocurre en biodigestores, donde los desechos orgánicos son degradados por microorganismos en un ambiente controlado (Mahmudul et al., 2021).

Tabla 6. Composición química del biogás.

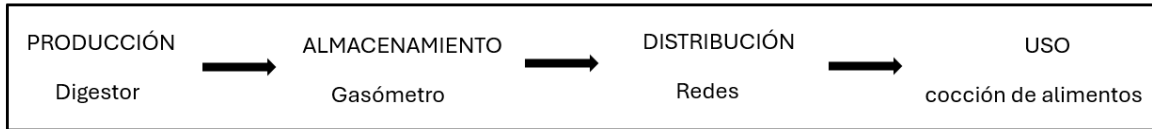
Componentes	Fórmula Química	Porcentaje (%)
Metano	CH_4	60-70
Gas Carbónico	CO_2	30-40
Hidrógeno	H_2	1.0
Nitrógeno	N_2	0.5
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxígeno	O_2	0.1
Ácido Sulfúrico	H_2S	0.1

Fuente: García y Samir (2022)

El metano, componente principal del biogás, determina su valor como fuente de energía. En zonas rurales no interconectadas, la producción de biogás ofrece una solución sostenible para el manejo de residuos y la generación de energía limpia. Este proceso no solo reduce el

volumen de desechos, sino que también proporciona una fuente de energía versátil. Para la producción de biogás se sigue la secuencia de la figura 10.

Figura 10. Secuencia para la producción de Biogás.



Fuente: García y Samir (2022)

El proceso de producción de biogás a través de la digestión anaerobia implica la transformación biológica del material orgánico usado como sustrato. Este proceso se desarrolla en cuatro fases secuenciales como se puede ver en la tabla 7: comienza con la hidrólisis, seguida por la acidogénesis, continúa con la acetogénesis y culmina en la metanogénesis. Cada una de estas etapas es crucial para la conversión efectiva de la materia orgánica en biogás.

Tabla 7. Etapas del proceso de digestión anaerobia

Etapa	Descripción del proceso
Hidrólisis	Polímeros orgánicos complejos como: proteínas, lípidos y carbohidratos se convierten en monómeros disueltos como: ácidos grasos de cadena larga, azúcares y aminoácidos.
Acidogénesis	monómeros se convierten en ácidos grasos volátiles y alcoholes. En esta etapa también se forman hidrógeno y dióxido de carbono.
Acetogénesis	Mediante los microorganismos acetogénicos, los ácidos orgánicos se convierten en acetato, dióxido de carbono e hidrógeno.
Metanogénesis	Los microorganismos metanogénicos convierten el acetato, hidrógeno y dióxido de carbono en metano y dióxido de carbono.

Fuente: Mariani y Rajin (2018)

La fase mesófila de la digestión anaeróbica opera a temperaturas entre 20 °C y 40 °C, con una temperatura óptima alrededor de 35 °C. En esta fase, la actividad microbiana es moderada y estable, permitiendo una conversión eficiente de la materia orgánica en biogás. Las bacterias

mesófilas son más robustas y tienen una mayor resistencia a las fluctuaciones en las condiciones del digestor, como cambios en el pH y la carga orgánica. Esto hace que la digestión mesófila sea una opción común en muchas instalaciones de biogás debido a su equilibrio entre la eficiencia de producción y la estabilidad operativa controlado (Mahmudul, H. M., et al. 2021).

4.5 MARCO LEGAL

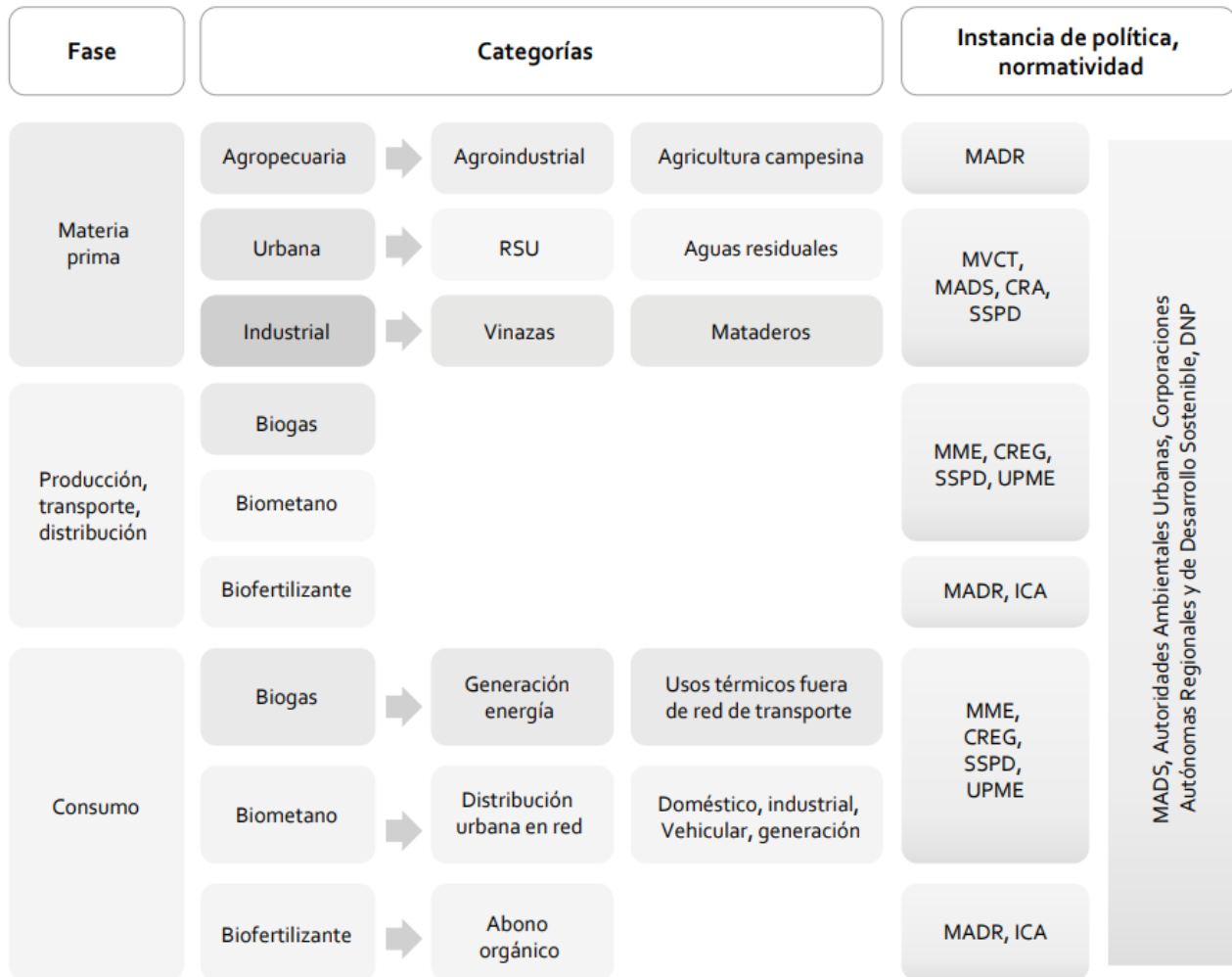
En Colombia, el marco legal para la promoción de energías alternativas, incluyendo los biodigestores, ha evolucionado significativamente en las últimas décadas, con el objetivo de diversificar la matriz energética del país y reducir la dependencia de los combustibles fósiles y promover el desarrollo sostenible. La Ley 1715, promulgada en 2014, es una de las normativas más relevantes en el ámbito de las energías renovables en Colombia. Esta ley regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, promoviendo su uso tanto en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) como en las Zonas No Interconectadas (ZNI). La ley establece incentivos fiscales y financieros para proyectos de energía renovable, incluyendo exenciones de IVA, deducciones de renta y depreciación acelerada de activos. Sin embargo, el enfoque principal ha sido en la energía solar fotovoltaica y eólica, mientras que los biocombustibles, particularmente el biogás, han recibido menos atención (Rincón y Castiblanco, 2021).

El Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2014-2018, aprobado a través de la Ley 1753, incluyó la suscripción de la Declaración de Crecimiento Verde, influyendo en las políticas socioeconómicas futuras. En el artículo 170 de esta ley se establece la necesidad de formular una política de crecimiento verde a largo plazo, coordinada por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). La misión de crecimiento verde desarrollada entre 2016 y 2018 incluyó la promoción de energías renovables, destacando la importancia del uso eficiente de recursos y el aprovechamiento de residuos hacia una economía circular. El CONPES 3918, aprobado en 2018, establece la estrategia para la implementación de los ODS en Colombia, destacando la importancia de las energías renovables en la agenda nacional. Este documento refuerza la necesidad de promover fuentes de energía limpia, como los biodigestores, que pueden contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y al desarrollo sostenible de las comunidades rurales (Rincón y Castiblanco, 2021).

A pesar de los avances legislativos, la implementación de proyectos de biogás ha sido limitada. El biogás, como fuente no convencional de energía renovable, tiene un gran potencial en Colombia debido a la abundancia de residuos orgánicos disponibles para su producción. Sin embargo, el marco normativo actual podría estar limitando su uso. Es necesario un análisis más detallado de las políticas y normativas que impactan las fases del ciclo de vida del biogás y los biofertilizantes para identificar y superar las barreras existentes (Rincón y Castiblanco, 2021). Según datos de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), entre 2016 y 2021, se han presentado pocos proyectos de generación con biomasa, lo que indica la necesidad de políticas más específicas y de un trabajo conjunto entre el gobierno y las fuentes potenciales de producción y uso de biogás. La promoción de estos proyectos es crucial para aprovechar el potencial energético de los residuos orgánicos y contribuir a la sostenibilidad energética del país (UPME, 2021). Como se puede ver en la figura 11 se ilustra el flujo y las categorías de producción, transporte, distribución y consumo de biogás en Colombia, destacando las fases de manejo de materia prima, producción y transporte de biogás, biometano y biofertilizantes, y su posterior consumo en generación de energía, usos térmicos, distribución urbana y como abono orgánico. Además, identifica las instancias de política y normatividad responsables en

cada etapa, incluyendo entidades como el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), el Ministerio de Minas y Energía (MME), y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), entre otros.

Figura 11. Fases del ciclo de vida del biogás e instancias de política y normatividad requeridas en Colombia



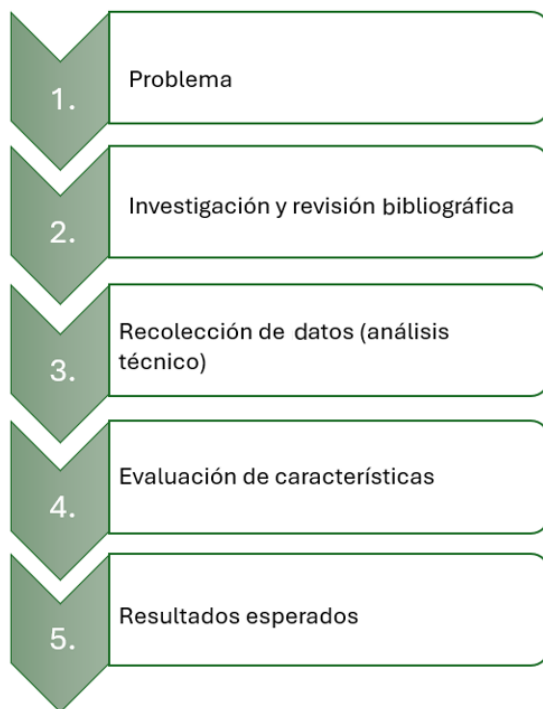
Fuente: Rincón y Castiblanco, 2021

5. DISEÑO METODOLÓGICO

El diseño metodológico realizado se basa en un enfoque de investigación documental con una metodología cualitativa para responder a la pregunta de investigación: ¿Cómo pueden los sistemas de digestión anaeróbica ser una alternativa económica para a la generación de energía y al desarrollo sostenible en las Zonas No Interconectadas (ZNI) de Colombia?, toda la recopilación de la investigación realizada es de tipo exploratorio-descriptivo. La fase exploratoria se centra en identificar y comprender los aspectos fundamentales de los sistemas de digestión anaeróbica y su implementación en zonas rurales no interconectadas. La fase descriptiva se enfoca en detallar las características y beneficios específicos de estos sistemas, así como su impacto potencial en el desarrollo socioeconómico y ambiental de las ZNI.

El diseño metodológico de esta monografía se estructura en cinco etapas clave, representadas en la figura 12, donde se ilustra el flujo del proceso metodológico, comenzando con la identificación del problema, seguido de una revisión de la literatura existente para fundamentar teóricamente el estudio. Posteriormente, se recopilan datos relevantes utilizando bases de datos como ScienceDirect, Scopus y Scielo, entre otras. Estos datos se analizan para evaluar la viabilidad y el impacto de los biodigestores. Para finalmente formular las conclusiones y recomendaciones basadas en los hallazgos. Este enfoque asegura una evaluación completa y estructurada de las soluciones energéticas sostenibles para las comunidades rurales.

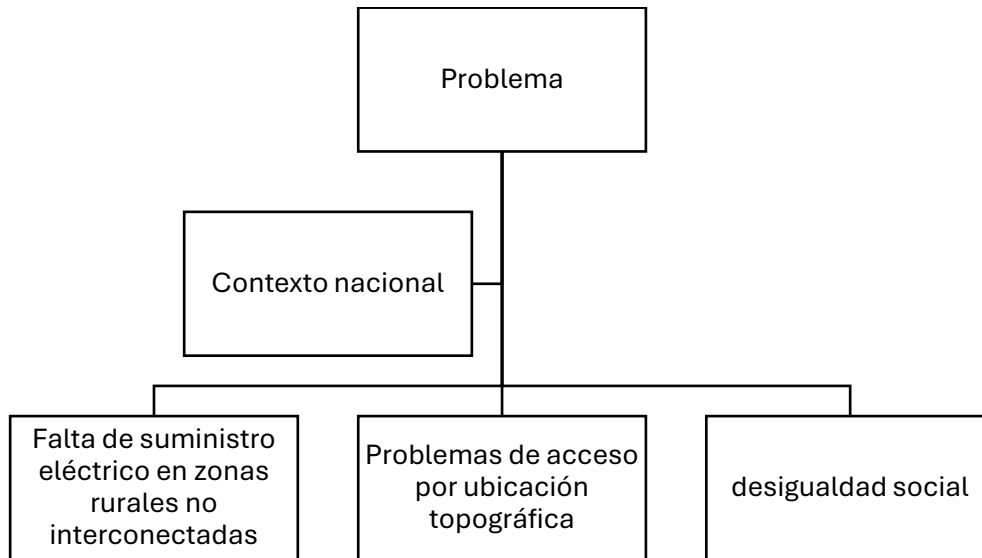
Figura 12. Fases del diseño metodológico



Fuente: (Elaboración propia, 2024)

1. Fase 1. Problema: En esta primera etapa, se realiza un análisis general de referentes nacionales respecto a las dificultades de acceso a la energía en zonas rurales no interconectadas, contrastando factores como: falta de suministro eléctrico, dificultad de acceso a zonas por la ubicación topográfica ejemplificada en el departamento del Meta y, por último, el impacto en cuanto a la desigualdad social que esto conlleva. En la figura 13 se ilustra como se estableció el objetivo principal de la investigación.

Figura 13. Diagrama de rúbrica, desarrollo del problema y contenido general de las características del problema



Fuente: (Elaboración propia, 2024)

- 1.1 Falta de suministro eléctrico en zonas rurales no interconectadas: En la literatura se tuvo en cuenta la importancia del acceso a la energía en cualquier zona, se hace hincapié en las consecuencias en cuanto al desarrollo social y económico de las zonas no interconectadas, en especial las zonas rurales, por otra parte, se evidencia las desventajas productivas en la tecnificación de los productos y la cantidad de personas sin acceso a la electricidad.
- 1.2 Problemas de acceso por ubicación topográfica: Para la obtención de información de esta característica, se tuvo en cuenta el difícil acceso a las zonas rurales de Colombia, ejemplificando el departamento del Meta, llanuras, piedemonte y áreas montañosas, La falta de infraestructura vial adecuada, costos y desafíos logísticos de llevar electricidad a estas áreas remotas, además de la dispersión de las comunidades y la baja densidad poblacional en las ZNI.
- 1.3 Desigualdad social: En esta sección se indagaron documentos sobre la falta de acceso a la electricidad en áreas rurales, la limitación de las oportunidades económicas, educativas y de desarrollo para las comunidades, la afectación de la

falta de energía en la productividad agrícola relacionada con el acceso a servicios de salud y educación.

2. Fase 2, Investigación y revisión Bibliográfica: Esta etapa consiste en la recopilación y análisis de literatura científica y técnica relevante sobre sistemas de digestión anaeróbica, generación de biogás, y su aplicación en contextos rurales. Se revisan artículos académicos, informes técnicos, y estudios de caso que proporcionen un marco teórico sólido y antecedentes importantes para la investigación. (Figura 14)

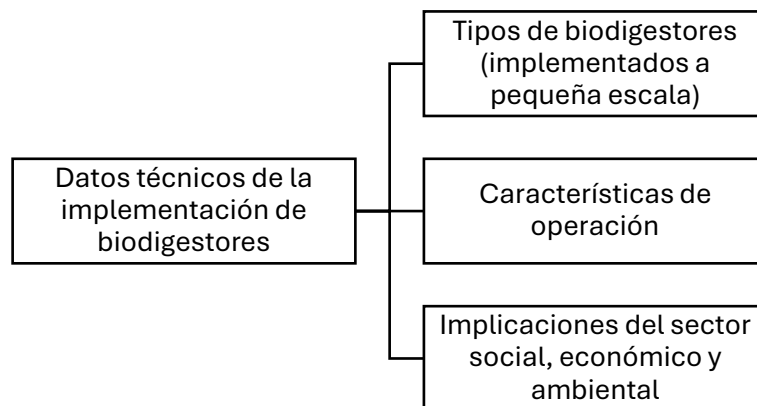
Figura 14. Fase 2: Investigación y revisión Bibliográfica (Temas relevantes)



Fuente: (Elaboración propia, 2024)

3. Fase 3. Recolección de Datos (Análisis técnico): En esta fase, se recogen datos específicos que pueden incluir estadísticas, estudios de caso locales, experiencias de implementación de biodigestores en otras regiones similares, y datos técnicos sobre el rendimiento y la eficiencia de los sistemas de digestión anaeróbica. El proceso de recolección de datos significativos se observa en la figura 15.

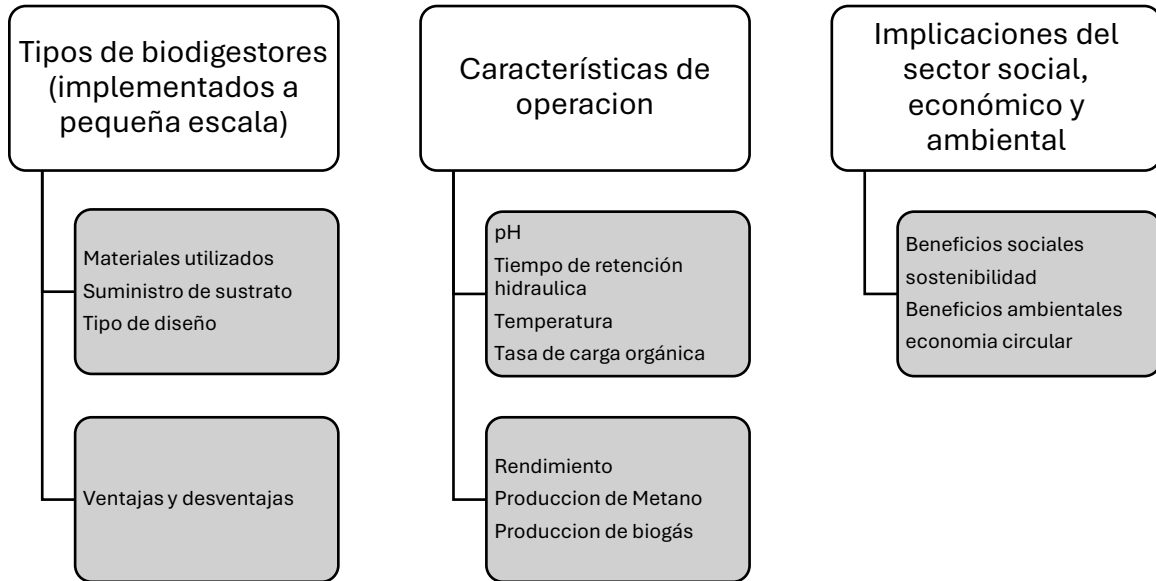
Figura 15. Fase 3: Análisis técnico de datos



Fuente: (Elaboración propia, 2024)

4. Fase 4. Evaluación de las características: En este apartado se toma como base los datos técnicos recolectados que se ilustran en la figura 15, se analizan utilizando el método cualitativo para evaluar la viabilidad y el impacto de los sistemas de digestión anaeróbica a pequeña escala. Se examinan los aspectos técnicos, económicos y ambientales de estos sistemas, así como su potencial para mejorar la autosuficiencia energética y la sostenibilidad en las zonas rurales no interconectadas (Figura 16).

Figura 16. Fase metodológica 4: Características evaluadas



Fuente: (Elaboración propia, 2024)

5. Fase 5. Resultados esperados: En la etapa final, se presentan las conclusiones derivadas del análisis de datos, destacando los beneficios y las limitaciones de los sistemas de digestión anaeróbica en zonas rurales, afectaciones al sector social, económico y ambiental.

6. RESULTADOS

A continuación, se desarrollarán cada una de las fases de la metodología propuestas para este proyecto, donde inicialmente se abordará de manera sintetizada la necesidad identificada, en segunda instancia se detallará el proceso de investigación en donde se presentan algunos de los documentos significativos relacionados con la revisión de la literatura, características de implementaciones de biodigestores a pequeñas escalas, características de operación, factores químicos relacionados con el rendimiento óptimo de la producción de biogás, y por último una descripción de los beneficios de la integración de sistemas en cuanto a el sector económico-social y ambiental.

6.1 Fase 1 (problema): Se delimitan los puntos clave de la investigación de la problemática los cuales engloban las necesidades de acceso a la energía: falta de suministro eléctrico en zonas rurales no interconectadas Problemas de acceso por ubicación topográfica y desigualdad social.

6.2 Fase 2 (Investigación y revisión bibliográfica): Se realiza una revisión y filtrado de los principales artículos académicos, informes técnicos, y estudios de caso que proporcionen un marco teórico sólido y antecedentes importantes, en este sentido los conceptos predominantes son: Proceso de digestión anaeróbica, implementaciones a gran escala, biodigestores, digestión anaeróbica, Implementaciones a pequeña escala, zonas rurales y economía circular, entre otros; lo anterior se relaciona con los temas relevantes propuestos en la metodología (figura 17).

Figura 17. Relación entre conceptos predominantes y temas relevantes



Fuente: (Elaboración propia, 2024)

6.3 Fase 3 (Recolección de Datos - Análisis Técnico): En esta fase se realiza una recopilación y análisis del contenido tomando en cuenta los datos relevantes, basándose en lo realizado de la fase 2. Se sintetizan los documentos más significativos, los cuales se presentan en la tabla 8 de la siguiente manera

6.3.1 sección 1 (color azul): se relaciona la literatura que contiene información sobre Sistemas de digestión anaeróbica y generación de biogás.

6.3.2 Sección 2 (color naranja): Se relaciona la literatura que contiene información sobre aplicaciones en contextos rurales, beneficios y economía circular.

Tabla 8. Recolección de Datos (Análisis técnico)

Estudios	Resultados
Sección 1	
Zhang, Lee; Yao, Dingding; Tsui, ToHung; Loh, Kai-Chee; Wang, Chi-Hwa; Dai, Yanjun; Wah, Yen (2022)- SCOPUS	Se implemento un sistema híbrido biológico y térmico para convertir los desechos de alimentos que contienen plástico (PCFW) en energía renovable, centrándose en la evaluación del rendimiento, el análisis de la comunidad microbiana y la evaluación del balance energético.
Daniel, F., Sekar, M., Gavurová, B., Chandramohan Govindasamy, Krishnan Moorthy R, Boomadevi P, & R, P. T. (2023).	El autor realiza un estudio donde evalúa el efecto del pretratamiento en la producción de biogás a partir del jacinto de agua, utilizando lodo de aguas residuales y estiércol de vaca como sustratos. Los resultados mostraron que el pretratamiento aumentó significativamente la producción de biogás y metano en comparación con las muestras no tratadas.
Hossain, Shahadat; Karim, Tahmid; Onik, Mahade; Kumar, Deepak; Rahman, Anisur; Yousuf, Abu; Uddin, Mohammad (2022)- SCOPUS	La producción de biogás con una importante cantidad de CH ₄ justifica el uso del proceso DA para la generación de energía (biogás) a partir de materia prima de biomasa ampliamente disponible, lo que ofrece diversas ventajas para el medio ambiente.
Abdolvahhab Fetanat, Mohsen Tayebi, & Mehran Moteraghi, (2023) ScienceDirect	El documento presenta una comparativa entre los modelos de biodigestores tales como el modelo pragatti, Deenbandhu, Janata, estos tipos de tecnología se basan en los modelos de biodigestores chino e hindú por otra parte se menciona las ventajas que tiene la economía circular contribuyendo al desarrollo del cambio climático

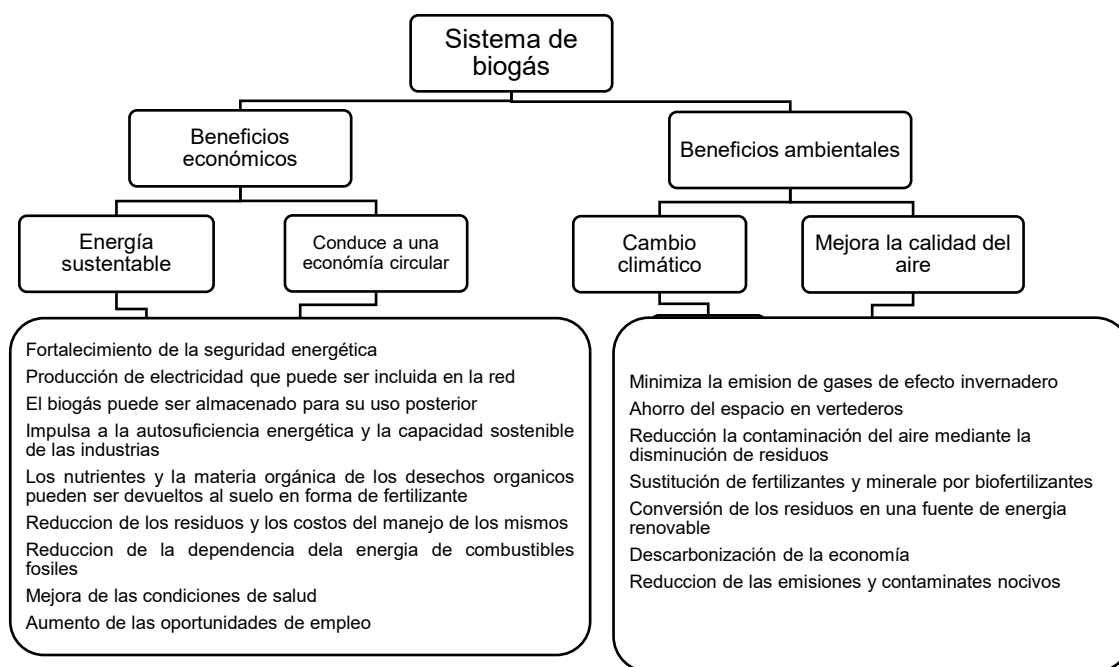
Steven Kuba Nuhu, James Ali Gyang, & Joel James Kwarbak, (2021) ScienceDirect	Se evalúa el rendimiento de un tipo de biodigestor doméstico, en el se comparan rendimientos de metano en la utilización de desechos de aves, desechos de comida y fragmentos orgánicos, el modelo tiene en cuenta parámetros de eficiencia de producción de metano, valor de pH y temperatura
HASSAN, M., et al. 2020	Eficiencia mejorada en la generación de metano y biodegradación del estiércol de ganso mediante el pretratamiento de sonicación térmica y la gestión de carga orgánica en CSTR.
Liyanage, T.; Babel, S. (2022) - SCOPUS	Se llegará a utilizar como método para aumentar la producción de metano. Desde un punto de vista económico, es más adecuado para materias primas menos digeribles, como desechos de jardín o desechos agrícolas, que los desechos de alimentos, ya que requiere energía
Pablo, Yoisdell Castillo Alvarez, Ruane, & Fernando Henrique Lermen, 2024 ScienceDirect	Se propone un modelo económico circular basado en el diseño de biorrefinerías utilizando biomasa reciclada de áreas urbanas, se ahonda en los beneficios del biofertilizante, paralelamente se contrasta la cantidad de materia orgánica producida por cada país en Latinoamérica
L Gómez-Muñoz et al.,(2024) CellPress	Se presenta un experimento doméstico utilizando biodigestores estacionarios con sustratos obtenidos de desechos caninos, de cabras, y de conejos, se evalúan los valores de pH y temperatura presentados en 30 días, los resultados muestran una variación de temperatura mínima en cuando a los desechos de animales.
Sección 2	
Zheng, H., et al. (2022)- SCOPUS	Se llega a reducir la contaminación ambiental, además se estimula el desarrollo sostenible de las granjas porcinas y se promueve la neutralidad del carbono y el desarrollo económico a través de la producción efectiva de bioenergía

<p>Pablo, Yoisdal Castillo Alvarez, Ruane, & Fernando Henrique Lermen, (2024) ScienceDirect</p>	<p>Se realiza una introducción al concepto de biogás, tipos de desechos orgánicos, historia en la implementación de los sistemas y las ventajas y desventajas en cuanto a las impurezas, biofertilizantes y usos en áreas metropolitanas</p>
<p>Aridi & A. Yehya,(2024) ScienceDirect</p>	<p>Se presentan los beneficios que pueden generar las implementaciones de sistemas de digestión anaeróbica en cuando a la dimensión social, económica y ambiental en zonas con clima trópico y clima un poco más gélido se evidencia el potencial del biogás en zonas rurales</p>
<p>Thanh Hung Nguyen et al., (2024) ScienceDirect</p>	<p>El estudio evalúa los beneficios ambientales sobre el uso del biogás como sustituto de fuentes de energía convencionales, así como la viabilidad económica de los biodigestores a pequeña escala y ofrece recomendaciones. Además, se hace referencia al potencial eléctrico que podría generarse en futuras implementaciones.</p>
<p>Nidia Yaneth Rincón-Velásquez, & Carmenza Castiblanco-Rozo. (2021)</p>	<p>El autor compila las políticas, normas, instituciones involucradas y expone las limitaciones que enfrenta el impulso del biogás como fuente de energía renovable en Colombia</p>
<p>Sharma, V., Sharma, D., Tsai, M.-L., Guanga, G., Yadav, A., Parushi Nargotra, Chen, C.-W., Sun, P.-P., & Dong, C.-D. (2023)</p>	<p>El autor explora en el artículo el potencial de los residuos agroindustriales, como los residuos de cultivos y alimentos, en pro de la producción sostenible de biogás. Se realiza un enfoque el cual se alinea con los principios de la economía circular al reducir los residuos y las emisiones de gases de efecto invernadero.</p>
<p>Mendieta, O., Castro, L., Vera, E., Jader Rodríguez, & Escalante, H. (2021)</p>	<p>Se realiza el estudio hacia la adopción de tecnologías basadas en biodigestores de bajo costo como un caso de estudio en los productores de azúcar en Colombia, se evaluó la aceptación de esta tecnología por medio de encuestas a productores con resultados positivos a la implementación y desarrollo.</p>

Fuente: (Elaboración propia, 2024)

Para terminar esta fase, se agrega que implementación de sistemas de obtención de energía por medio de digestión anaeróbica impulsa el desarrollo rural y la economía circular, paralelamente la auto sustentabilidad que brindan los digestores promueve la energía competitiva, energía sostenible y equidad energética; lo anterior complementa la comparativa de la figura 18.

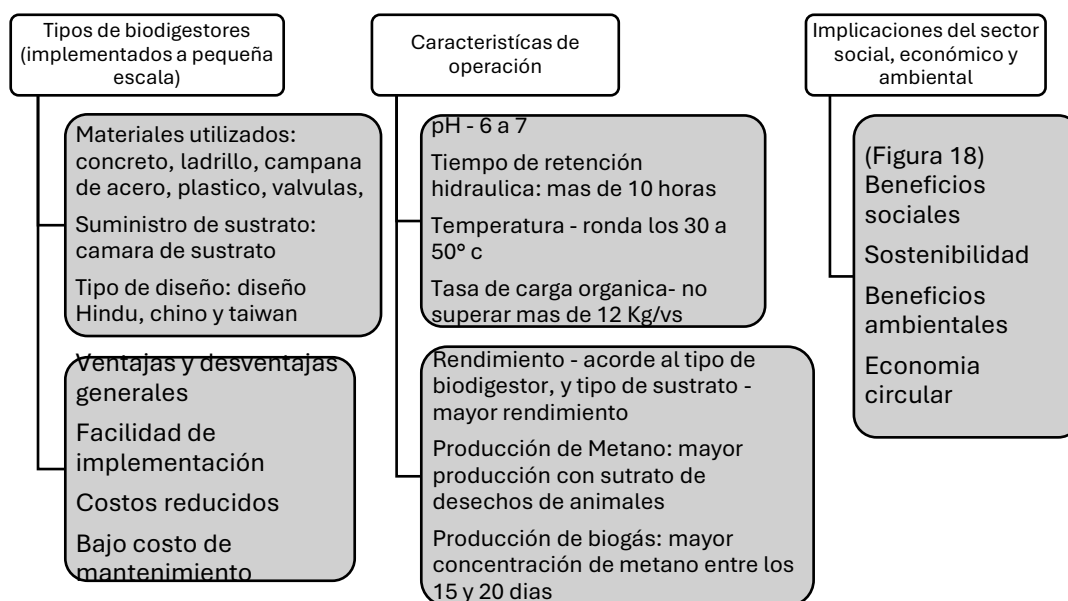
Figura 18. Beneficios económicos y ambientales de la implementación de sistemas de obtención de biogás.



Fuente: (H.M. Mahmudul et al., 2021).

6.4 Fase 4 (Evaluación de características): se realiza un cuadro general de los resultados evaluados frente a las características más comunes implementadas en zonas rurales, partiendo desde las características de la metodología propuesta (figura 19).

Figura 19. Resultados evaluados



Fuente: (Elaboración propia, 2024)

6.5 Fase 5 (resultados esperados): En la última fase se agrupan todos los datos obtenidos, se realiza una síntesis concreta en base al análisis técnico y evaluación de características.

Se determinaron los principales factores químicos influyentes en el proceso de DA incluyendo pH promedio de 6 a 7, la tasa de carga orgánica (OLR no mayor a 12Kg/m³ sólidos volátiles/día), el tiempo de retención hidráulica (TRH no menor a 10 días), temperatura (fase mesófila de 30 a 40 °c y fase termófila de 50 a 60°C), el tipo de materia prima utilizada (acorde a los desechos utilizados evidenciando una mayor producción de metano con heces de animales puesto que el pH de este sustrato es propenso a permanecer estable) y el patrón de alimentación (Patrón de alimentación tipo continuo por los beneficios en la generación de biogás constante).

Se logra realizar la recopilación y análisis de literatura científica y técnica relevante sobre sistemas de digestión anaeróbica, generación de biogás, y su aplicación en contextos rurales, las revisiones de implementaciones de sistemas de biogás, biodigestores y digestores incluyen investigaciones en medio oriente, Vietnam, China e India. Por otra parte, en Latinoamérica el aprovechamiento de estos sistemas se centra en países como Brasil, Bolivia y Colombia, siendo el primero el principal productor de desechos orgánicos.

Los residuos del sustrato suelen ser utilizados como biofertilizantes, en este sentido el concepto de economía circular es fundamental para la reutilización de estas materias, por otra parte, la generación de energía eléctrica, energía para calentar y biogás para cocinar depende principalmente de la cantidad de sustrato disponible diario, en cuanto al diseño del biodigestor este se basa en el alcance económico que tenga el agricultor, el diseño tipo tubular es recomendado para climas cálidos-templados, pues debido a los materiales de construcción este pierde temperatura en las noches por ende la producción de biogás no es eficiente, para climas fríos se recomiendan los tipos chino e hindú.

7. CONCLUSIONES

- Los sistemas de digestión anaeróbica a pequeña escala son técnicamente viables y altamente beneficiosos para las zonas rurales no interconectadas. Estos sistemas permiten la producción de biogás a partir de residuos orgánicos, lo que contribuye significativamente a la gestión de desechos y a la reducción de la contaminación ambiental. La implementación de biodigestores facilita el tratamiento adecuado de residuos agrícolas y ganaderos, transformándolos en biogás y en un subproducto, además, el digestato puede ser utilizado como fertilizante orgánico, mejorando la fertilidad del suelo y reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos. Además, al disminuir la cantidad de residuos que se descomponen de manera inadecuada, se reduce la emisión de metano, un gas de efecto invernadero potente, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y mejorando la calidad del aire en las comunidades rurales.
- La implementación de sistemas de digestión anaeróbica en áreas remotas y de difícil acceso ofrece ventajas significativas para los campesinos a nivel energético. Estos sistemas proporcionan una fuente de energía renovable y constante, que reduce la dependencia de combustibles fósiles y de fuentes de energía no sostenibles, que suelen ser costosas y difíciles de obtener en zonas aisladas. Al generar biogás a partir de residuos locales, los campesinos pueden disponer de una fuente de energía accesible y económica para cocinar, calentar agua e incluso generar electricidad. Esto no solo mejora la calidad de vida al garantizar un suministro energético fiable, sino que también promueve la autosuficiencia y la resiliencia energética, permitiendo a las comunidades rurales enfrentar mejor las limitaciones y fluctuaciones en el suministro energético externo.
- Es crucial establecer programas de capacitación para las comunidades rurales sobre la operación y el mantenimiento de los biodigestores. Esto garantizará una operación eficiente y prolongará la vida útil de los sistemas, maximizando los beneficios económicos y ambientales

BIBLIOGRAFÍA

Catuogno, S., Pecori, B., & Giorgi, F. (2019). Off-grid electrification for rural areas: A review of technological, economic, and social challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 128-140. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.016>

Santos, C. (2023, agosto 9). Mercado energético en Colombia: Avances, dificultades y tensiones en la transición. *Data Center Dynamics*. <https://www.datacenterdynamics.com/es/features/mercado-energ%C3%A9tico-en-colombia-avances-dificultades-y-tensiones-en-la-transici%C3%B3n/>

Agencia Internacional de Energía (IEA). (2022). *SDG7: Data and Projections*. <https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections>

Palit, D., & Bandyopadhyay, K. R. (2017). Rural electricity access in South Asia: Is grid extension the remedy? A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1505-1515. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.034>

Kanagawa, M., & Nakata, T. (2018). Assessment of access to electricity and the socio-economic impacts in rural areas of developing countries. *Energy Policy*, 36(6), 2016-2029.

Almeida, A., Calheiros, A. J. P., Albrecht, R. I., Machado, L. R. M., Santos, R., & Neto, H. L. (2020). A distribuição espacial das descargas elétricas na região central da bacia amazônica e o uso da árvore de decisão em dados de radar meteorológico para sua classificação. *Anais Do Workshop De Computação Aplicada À Gestão Do Meio Ambiente E Recursos Naturais (WCAMA 2020)*. <https://doi.org/10.5753/wcama.2020.11023>

Severo Patiño-Ramírez, & Yoni Mateo Valiente-Saldaña. (2023). Identificación de factores que determinan el desarrollo rural en comunidades campesinas, 2018-2023: Revisión sistemática. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 8(1), 242–256. <https://doi.org/10.35381/r.k.v8i1.2783>

Bernal Pedraza, A. Y. and Licon Calpe, W. (2023). Transformaciones en el espacio urbano-rural en Colombia y su impacto en el suministro de agua. *Territorios*, (50). <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.12222>

Linares Terrazas, D., Luna Barrón, B., & Taboada López, G. (2024). Desigualdades en el tiempo hasta el diagnóstico del síndrome de Down en Bolivia. *Salud Colectiva*, 20, e4710. <https://doi.org/10.18294/sc.2024.4710>

Ministerio de Minas y Energía. (2019). Informe anual de cobertura eléctrica en Colombia. Recuperado de: https://www.minenergia.gov.co/documents/7099/Informe_Gestion_MME_Definitivo.pdf

Gobernación del Meta. (2020). Plan de desarrollo departamental 2020-2023. Recuperado de: <https://obsgestioneducativa.com/download/plan-de-desarrollo-departamental-meta-2020-2023/>

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2021). Informe sectorial de Zonas No Interconectadas (ZNI). Recuperado de https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_sectorial_zni_2021%20%281%29.pdf

Garzón, L. (2020). Impacto económico de la falta de energía en el sector agrícola del Meta. *Revista de Economía Rural*, 45(3), 123-135.

Rodríguez, P., & Martínez, S. (2021). *Energía y desarrollo en las zonas rurales de Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Marcia Aparecida Andreazzi, Adriano Rogério Mendes, Volpe, K., & De, M. (2017). Energy management: a synthesis of scientific publications on biodigestion for waste management. *Revista Ambiente & Água*, 12(6), 964–964. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1911>

Paes, J. L., Alves, S., Leonardo, de, A., & Valentina. (2020). USE OF INOCULUM IN BIODIGESTERS WITH CATTLE MANURE UNDER CONVENTIONAL AND ORGANIC PRODUCTION SYSTEMS. *Engenharia Agrícola*, 40(2), 146–153. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p146-153/2020>

Cortez, S. C., Cherri, A. C., Jugend, D., Jesus, & Bezerra, B. S. (2022). How Can Biodigesters Help Drive the Circular Economy? An Analysis Based on the SWOT Matrix and Case Studies. *Sustainability*, 14(13), 7972–7972. <https://doi.org/10.3390/su14137972>

Wijaya, O., Apriyanto, N. P., & Widodo, W. (2023). Innovation adoption of household-scale portable biodigester to reduce the impact of food waste in bangunjiwo village, bantul district. *Proceeding International Conference of Technology on Community and Environmental Development*, 1(2). <https://doi.org/10.18196/ictced.v1i2.53>

Effects of Percolate Recirculation on Dry Anaerobic Co-digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Corn Straw. (2017). Retrieved July 16, 2024, from ACS Publications website: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.7b01869>

Mendieta, O., Castro, L., Vera, E., Jader Rodríguez, & Escalante, H. (2021). Toward the Adoption of Anaerobic Digestion Technology through Low-Cost Biodigesters: A Case Study of Non-Centrifugal Cane Sugar Producers in Colombia. *Water*, 13(18), 2566–2566. <https://doi.org/10.3390/w13182566>

Qian, M., Zhang, Y., Li, R., Nelles, M., Stinner, W., & Li, Y. (2017). Effects of percolate recirculation on dry anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste and corn straw. *Energy & Fuels*, 31(11), 12183-12191. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01869>

Silva-Martínez, R. D., Sanches-Pereira, A., Ortíz, W., Gómez, M. F., & Coelho, S. T. (2020). The state-of-the-art of organic waste to energy in latin america and the caribbean: challenges and opportunities. *Renewable Energy*, 156, 509-525. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.056>

Políticas y normas sobre energías renovables para el desarrollo de biogás en Colombia. Una revisión | Semantic Scholar. (2021). Retrieved July 16, 2024, from <https://www.semanticscholar.org/reader/5ae67350b8e28f5957096a5e49a53580fae18013>

Bux, C., Cangialosi, F., & Amicarelli, V. (2023). Biomethane and compost production by anaerobic digestion of organic waste: suggestions for rural communities in southern italy. *Sustainability*, 15(21), 15644. <https://doi.org/10.3390/su152115644>

Bolzonella, D., Bertasini, D., Coco, R. L., Menini, M., Rizzioli, F., Zuliani, A., ... & Pesante, G. (2023). Toward the transition of agricultural anaerobic digesters into multiproduct biorefineries. *Processes*, 11(2), 415. <https://doi.org/10.3390/pr11020415>

Ferdous, J. (2020). Rural development in Bangladesh: An assessment of training, research and action research of Bangladesh academy for rural development (BARD). *Journal of Community Positive Practices*, 20(4), 25–40. <https://n9.cl/chcdp>

He, P., Lovo, S., & Veronesi, M. (2022). Social networks and renewable energy technology adoption: empirical evidence from biogas adoption in china. *Energy Economics*, 106, 105789. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105789>

Maxmuller, M., Fernandes, Ferreira, A., & Giuliano Girão, E. (n.d.). BIODIGESTORES: A IMPLEMENTAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS NA ZONA RURAL DE HORIZONTE-CE BIODIGESTORS: THE IMPLEMENTATION OF DIFFERENT MODELS IN THE RURAL AREA OF HORIZONTE-CE. Retrieved from <https://www.sisgeenco.com.br/anais/endhas/2021/arquivos/ED05215553378-01.pdf>

Departamento Nacional de Planeación Colombia (DNP); Fedesarrollo; Global Green Growth Institute (GGGI), 2017. Evaluación de potencial de crecimiento verde para Colombia. Bogotá, DC.

Nidia Yaneth Rincón-Velásquez, & Carmenza Castiblanco-Rozo. (2021). Políticas y normas sobre energías renovables para el desarrollo de biogás en Colombia. Una revisión. *Gestión Y Ambiente/Gestión Y Ambiente*, 24(1), 98868–98868. <https://doi.org/10.15446/ga.v24n1.98868>

Valencia Achuri, P.A., & Abril Herrera, D. (2023). Implementación de Biodigestores para el aprovechamiento de residuos en pequeñas unidades productivas agropecuarias. *Publicaciones e Investigación*.

Sharma, V., Sharma, D., Tsai, M-L., Ortizo, R.G.G., Yadav, A., Nargotra, P., Chen, CW., Sun, P-P., Dong, C-D., (2023) Insights into the recent advances of agro-industrial waste valorization for sustainable biogas production, *Bioresource Technology*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129829>

Pablo, J., Yoisdal Castillo Alvarez, Ruane, & Fernando Henrique Lermen. (2024). A thermo-economic analysis of a circular economy model for biomass in South America producing biofertilizers and biogas from municipal solid waste. *Renewable Energy*, 225, 120254–120254. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120254>

Thanh, H. (2023). *Design and Evaluation of the Economic-Environmental Benefits from Livestock Waste and Food Waste Treatment by Small-Scale Biogas Digesters in Farming Communities for Sustainable Development in Central Vietnam*. Nii.ac.jp. <https://kitakyu.repo.nii.ac.jp/records/1089>

Spyridon Achinas, Vasileios Achinas, & Willem, J. (2020). Microbiology and biochemistry of anaerobic digesters: an overview. *Elsevier EBooks*, 17–26. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821264-6.00002-4>

Aridi, R., & A. Yehya. (2024). Anaerobic biodigesters heating sources: Analysis and recommendations. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 202, 114700–114700. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114700>

Thanh Hung Nguyen, Doan, Q.-V., Khan, A., Derdouri, A., Anand, P., & Dev Niyogi. (2024). The potential of agricultural and livestock wastes as a source of biogas in Vietnam: Energetic, economic and environmental evaluation. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 199, 114440–114440. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114440>

Vijayakumar Pradeshwaran, Chen, W.-H., Ayyadurai Saravanakumar, Rajadesingu Suriyaprakash, & Anurita Selvarajoo. (2024). Biocatalyst enhanced biogas production from food and fruit waste through anaerobic digestion. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 55, 102975–102975. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102975>

Godwin Glivin, & Sekhar, S. (2016). Experimental and Analytical Studies on the Utilization of Biowastes Available in an Educational Institution in India. *Sustainability*, 8(11), 1128–1128. <https://doi.org/10.3390/su8111128>

N. Kalaiselvan, Godwin Glivin, A.K. Bakthavatsalam, V. Mariappan, M. Premalatha, P. Saji Raveendran, S. Jayaraj, & S. Joseph Sekhar. (2022). A waste to energy technology for Enrichment of biomethane generation: A review on operating parameters, types of biodigesters, solar assisted heating systems, socio economic benefits and challenges. *Chemosphere*, 293, 133486–133486. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133486>

Ning, J., Zhou, M., Pan, X., Li, C., Lv, N., Wang, T., Zhu, G., (2019a). Simultaneous biogas and biogas slurry production from co-digestion of pig manure and corn straw: performance optimization and microbial community shift. *Bioresour. Technol.* 282, 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.122>.

Kinyua, M. N., Rowse, L. E., & Ergas, S. J. (2016). Review of small-scale tubular anaerobic digesters treating livestock waste in the developing world. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 58, 896–910. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.324>

Prashant Baredar, Khare, V., & Savita Nema. (2020). Biogas digester plant. *Elsevier EBooks*, 79–155. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822718-3.00003-4>

Prashant Baredar, Khare, V., & Savita Nema. (2020). Biogas energy system. *Elsevier EBooks*, 1–31. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822718-3.00001-0>

H.M. Mahmudul, Rasul, M. G., Akbar, D., Narayanan, R., & M. Mofijur. (2021). A comprehensive review of the recent development and challenges of a solar-assisted biodigester system. *Science of the Total Environment*, 753, 141920–141920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141920>

Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 45, 540–555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>

Guo, J., Wang, W., Liu, X., Lian, S., & Zheng, L. (2014). Effects of thermal pre-treatment on anaerobic co-digestion of municipal biowastes at high organic loading rate. *Chemosphere*, *101*, 66–70. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.007>

M.S.M. Zaharin, Abdullah, N. R., Najafi, G., H. Sharudin, & T. Yusaf. (2017). Effects of physicochemical properties of biodiesel fuel blends with alcohol on diesel engine performance and exhaust emissions: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *79*, 475–493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.035>

Bhandari, J., Premendra Mani Pradhan, & Rohit Kumar Choudhary. (2017). Experimental Investigation and Fabrication of Biogas Digester. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 485–493. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4286-7_48

J. Villarroel-Schneider, Höglund-Isaksson, L., Brijesh Mainali, J. Martí-Herrero, Cardozo, E., Malmquist, A., & Martin, A. (2022). Energy self-sufficiency and greenhouse gas emission reductions in Latin American dairy farms through massive implementation of biogas-based solutions. *Energy Conversion and Management*, *261*, 115670–115670. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115670>

Prasad Kaparaju, & Rintala, J. (2013). Generation of heat and power from biogas for stationary applications: boilers, gas engines and turbines, combined heat and power (CHP) plants and fuel cells. *Elsevier EBooks*, 404–427. <https://doi.org/10.1533/9780857097415.3.404>

Tamburini, E., Gaglio, M., Castaldelli, G., & Elisa Anna Fano. (2020). Biogas from Agri-Food and Agricultural Waste Can Appreciate Agro-Ecosystem Services: The Case Study of Emilia Romagna Region. *Sustainability*, *12*(20), 8392–8392. <https://doi.org/10.3390/su12208392>

Lagerkvist, A. (2020). Al-Razi's Comprehensive Book on Medicine. In *Encyclopedia of the History of Science* (online ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119130709>

Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, *99*(10), 4044-4064. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>

Hagen, L. H., Brooke, C., Shaw, C., Norbeck, A. D., Piao, H., Arntzen, M. Ø., ... & Hess, M. (2020). Proteome specialization of anaerobic fungi during ruminal degradation of recalcitrant plant fiber. <https://doi.org/10.1101/2020.01.16.907998>

Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *85*(4), 849-860. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2246-7>

Tanor, E. B., Lejone, I., Magama, S., & Lebofa, M. M. (2021). Assessment of the quality of liquid digestate from small-scale anaerobic biodigesters used for crop irrigation in urban and peri-urban maseru, lesotho. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 30-46. <https://doi.org/10.9734/cjast/2021/v40i431293>

Polizzi, C., Alatraste-Mondragón, F., & Munz, G. (2017). Modeling the disintegration process in anaerobic digestion of tannery sludge and fleshing. *Frontiers in Environmental Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00037>

McCarty, P. L. (1964). Anaerobic waste treatment fundamentals. *Public Works*, 95(9), 107-112. Recuperado de <https://www.seas.ucla.edu/stenstro/Anaerobic%20assignment.pdf>

García, G., Samir, J., Silva, I., Fernando, D., & Auccahuasi, A. (n.d.). Universidad César Vallejo FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Revisión Sistemática de la Eficiencia del Tratamiento Biológico de Residuos Agrícolas por Digestión Anaerobia y Nitrificación AUTORES. Retrieved from https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/97864/Gonzales_GJS-lpanaque_SM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

García, G., Samir, J., Silva, I., Fernando, D., & Auccahuasi, A. (n.d.). Universidad César Vallejo FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Revisión Sistemática de la Eficiencia del Tratamiento Biológico de Residuos Agrícolas por Digestión Anaerobia y Nitrificación AUTORES. Retrieved from https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/97864/Gonzales_GJS-lpanaque_SM-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Mariani Rajin. (2018). A Current Review on the Application of Enzymes in Anaerobic Digestion. *Green Energy and Technology*, 55–70. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8129-3_4

Rincón-Velásquez, N. Y. y Castiblanco-Rozo, C. (2021). Políticas y normas sobre energías renovables para el desarrollo de biogás en Colombia. Una revisión. *Gestión y Ambiente*, 24(1), 98868. <https://doi.org/10.15446/ga.v24n1.98868>

Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), 2021a. Balance energético colombiano BECO. Database, con corte a 2019, disponible en: <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECOConsulta.aspx>; consultado: 20 de agosto de 2021.

ZHANG, LEE, et al. Plastic-containing food waste conversion to biomethane, syngas, and biochar via anaerobic digestion and gasification: Focusing on reactor performance, microbial community analysis, and energy balance assessment. 2022. Singapore : *Journal of Environmental Management*, 2022, Vol. 306.

Daniel, F., Sekar, M., Gavurová, B., Chandramohan Govindasamy, Krishnan Moorthy R, Boomadevi P, & R, P. T. (2023). Recovering biogas and nutrients via novel anaerobic co-digestion of pre-treated water hyacinth for the enhanced biogas production. *Environmental Research*, 231, 116216–116216. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116216>

MPACT of temperature, inoculum flow pattern, inoculum type, and their ratio on dry anaerobic digestion for biogas production. HOSSAIN, Shahadat, [et al]. 2022. 1, NY : Scientific Reports, 2022, Vol. 12. 20452322. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-10025-1#citeas>

LIYANAGE, T. and BABEL, S. Mejora de la producción de metano en la digestión anaeróbica de residuos alimentarios mediante pretratamiento térmico. 2022. 1, s.l. : Environment and Natural Resources Journal, 2022, Vol. 20.

HASSAN, Muhammad, ZHAO, Chao y DING, Weimin. Enhanced methane generation and biodegradation efficiencies of goose manure by thermalsonication pretreatment and organic loading management in CSTR. *Energy* [en línea]. Mayo 2020. Vol. 198. [fecha de consulta: 14 de mayo de 2021]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117370>

Steven Kuba Nuhu, James Ali Gyang, & Joel James Kwarbak. (2021). Production and optimization of biomethane from chicken, food, and sewage wastes: The domestic pilot biodigester performance. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100298–100298. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100298>

L Gómez-Muñoz, C Morales-Morales, M Castro-Bello, A González-Lorence, Marmolejo-Vega, C. V., & Zagal-Barrera, S. R. (2024). Design of Experiments to Evaluate pH and Temperature Parameters with Different Inoculums in Domestic Biodigester. *Heliyon*, 10(9), e30542–e30542. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30542>

ZHENG, H., et al. Digestión anaeróbica en estado sólido de paja de arroz pretratada con efluente digerido de estiércol porcino, 2022. 131252, Guangzhou : Journal of Cleaner Production, 2022, Vol. 348.