



**ESTUDIO DE VIABILIDAD EN LA APLICACIÓN DE UN BIODIGESTOR ANAEROBIO
PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN LAS INSTITUCIONES EDUCATIVAS
UBICADAS EN LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA**

ALEJANDRO GUERRERO VARGAS

LAURA DANIELA CARVAJAL CASTAÑEDA

JULIAN ENRIQUE DAVILA PERTUZ

TUTOR: JULIEN GWENDAL CHENET

PROYECTO DE GRADO

Universidad EAN

Facultad de ingeniería

Bogotá, Colombia

2021

RESUMEN

La energía eléctrica ha pasado a ser parte fundamental de la sociedad y del desarrollo humano, no obstante, en Colombia se encuentran un gran número de poblaciones y/o comunidades que no tienen acceso a este servicio básico. Estos territorios son denominados como Zonas No Interconectadas (ZNI). Ante esto, se han empezado a desarrollar y utilizar diversas tecnologías para suministrar el servicio de energía a las ZNI, dentro de las cuales, la producción de biogás se ha convertido en una importante tecnología de generación de energía por tener una excelente capacidad de adaptación a las ZNI. El biogás puede ser producido a base de los residuos orgánicos y los desechos de su producción pueden ser aprovechados en la formación de abono. Es por ello que el presente proyecto de estudio plantea la producción de biogás mediante un biodigestor anaerobio, para suministrar energía a las instituciones educativas pertenecientes a las ZNI del país.

Palabras clave: Energías renovables, biodigestor, biogás, biol, estiércol, digestión anaerobia.

ABSTRACT

Electricity has become a fundamental part of society and human development, however, in Colombia there are a large number of populations and / or communities that do not have access to this basic service. These territories are referred to as Non-Interconnected Zones (NIZs). Given this, various technologies have begun to be developed and used to supply the energy service to the NIZs, within which, the production of biogas has become an important power generation technology due to having an excellent capacity to adapt to the NIZs. Biogas can be produced from organic waste and waste from its production can be used in the formation of fertilizer. That is why the present study project proposes the production of biogas through an anaerobic biodigester, to supply energy to the educational institutions belonging to the NIZs of the country.

Keywords: Renewable energies, biodigester, biogas, biol, manure, anaerobic digestion.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
2. OBJETIVOS.....	9
3. DEFINICION DEL PROBLEMA	9
4. JUSTIFICACION.....	13
5. MARCO REFERENCIAL	15
5.1 ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI):.....	15
5.1.1 Zonas no interconectadas (ZNI):.....	15
5.1.2 Normativas y regulaciones para las ZNI:	17
5.2 Residuos orgánicos:.....	18
5.2.1 Beneficios del aprovechamiento de residuos orgánicos:.....	19
5.2.2 Clasificación de los residuos orgánicos:	20
5.3 Biodigestor:.....	21
5.3.1 Partes básicas de un Biodigestor:.....	21
5.3.2 Tipos de Biodigestores	22
5.4 Digestión anaerobia	25
5.4.1 Etapas de la digestión anaerobia.....	25
5.5 El biogás:	27
5.5.1 Aplicaciones del biogás	27
5.6 Bioabono:.....	28
6. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS Y/O ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	28
7. ANÁLISIS DE RESTRICCIONES.....	34
7.1 Normatividad	34
7.2 Ambiental / social.....	36
7.3 Económico.....	37
7.4 Topográfico.....	37
8. METODOLOGIA PARA LA SELECCION Y DESARROLLO DEL DISEÑO	37
8.1 Justificación de la selección del diseño:.....	37
8.2 Diseño:	39
8.2.1 Biodigestor tubular:	39
8.2.2 Volumen:.....	40
8.2.3 Relación carbono/nitrógeno:	43

8.2.4 Niveles de solidos totales:.....	44
8.2.5 Producción de energía:.....	44
8.3 Costos:.....	46
9. ANALISIS Y RESULTADOS	46
9.1 Análisis y resultados de diseño:	46
9.2 Análisis y resultados de costos:.....	57
9.2.1 Inversión:.....	57
9.2.2 Rentabilidad:	60
10. CONCLUSIONES.....	67
REFERENCIAS.....	69

TABLA DE FIGURAS

Gráfica 1. Toneladas de dióxido de carbono generadas en Colombia en 2019 dividida por sectores.....	10
Gráfica 2. Cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas	16
Gráfica 3. Diagrama esquemático de un biodigestor tubular de plástico de bajo costo	40
Ilustración 1. Representación del biodigestor discontinuo.....	23
Ilustración 2. Representación del biodigestor semidiscontinuo	24
Ilustración 3. Generación de biogás a partir de cuatro fases de degradación aeróbica.	25
Tabla 1. clasificación de los residuos orgánicos.....	21
Tabla 2. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural.....	32
Tabla 3. Líneas base de consumo de energía para edificios educativos según el tipo de clima	33
Tabla 4. Componentes del biodigestor del tipo taiwanés o Tubular	40
Tabla 5. cálculo de kilowatts por año.	47
Tabla 6. Conversión.....	47
Tabla 7. Cantidad de biogás necesario.....	47
Tabla 8. parámetros a, b y p, para cualquier radio de circunferencia	49
Tabla 9. Valores de los parámetros a, b y p	49
Tabla 10. Área de la zanja.....	49
Tabla 11. Volumen del liquido	50
Tabla 12. Cálculo de la carga diaria del biodigestor	50
Tabla 13. Residuos orgánicos y su producción de biogás	51

Tabla 14. Reorganizando datos de los residuos y su producción de biogás	52
Tabla 15. Densidad de la materia prima	53
Tabla 16. Cantidad de biogás en kg producido al día.....	54
Tabla 17. producción de biogás en volumen por día.....	55
Tabla 18. Conversión del biogás de día a hora	56
Tabla 19. Materiales y presupuesto estimado para la construcción del biodigestor tubular	57
Tabla 20. Preparación del terreno para la instalación del biodigestor	59
Tabla 21. Presupuesto de herramientas necesarias para la instalación del biodigestor	59
Tabla 22. Materiales adicionales que no tienen un costo específico	60
Tabla 23. Costo total del proyecto.....	60
Tabla 24. Conversión del biogás producido de hora a año	61
Tabla 25. Conversión del biogás producido de metro cubico a kilowatts.....	62
Tabla 26. Cálculo de las ganancias	64
Tabla 27. Cálculo de la rentabilidad	66
Ecuación 1. volumen liquido del biodigestor	41
Ecuación 2. Volumen total del biodigestor	41
Ecuación 3. Circunferencia y radio.....	41
Ecuación 4. diámetro del biodigestor	42
Ecuación 5. área de la zanja	42
Ecuación 6. volumen de la zanja y longitud	42
Ecuación 7. Relación entre Longitud - Diámetro	43
Ecuación 8. apotema	43
Ecuación 9. Perímetro	43
Ecuación 10. Relación de carbono/nitrógeno	44
Ecuación 11. Porcentaje de solidos totales diluidos	44
Ecuación 12. Productividad metanoica	45
Ecuación 13. Máxima generación de generación de metano.....	45
Ecuación 14. Cálculo del radio	48
Ecuación 15. Cálculo de la longitud	48
Ecuación 16. Cálculo del volumen del biodigestor	48
Ecuación 17. Ecuación de rentabilidad	61
Ecuación 18. Ecuación de ganancias	61

1. INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de la revolución industrial hasta la actualidad, se ha generado una dependencia al consumo de energía proveniente de fuentes convencionales, denominados combustibles fósiles, como lo son: el carbón, el petróleo y el gas natural. Sin embargo, estas fuentes de energía representan una amenaza para el planeta por ser generadoras de gases de efecto invernadero (GEI) (Agencia de protección ambiental [EPA], s.f.). Debido a esto, se han buscado nuevas alternativas para estas fuentes de energía, procurando tener características tomadas de los recursos renovables y que estas a su vez no generen GEI u otro tipo de contaminantes al medio ambiente. (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, [CEPAL], 2015).

El uso de fuentes de energía renovable es imprescindible para combatir el cambio climático y limitar sus efectos más devastadores (Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático [IPCC], 2011), según la Agencia Internacional de Energías Renovables, IRENA (2014), si la cuota de energías renovables en el panorama energético mundial es del 32% para el año 2030, traería consigo un incremento del 3.7% en el bienestar general de más de 24 millones de personas.

Según los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la organización de las naciones unidas (ONU) (s.f.), el acceso a la energía eléctrica corresponde a un factor fundamental para el desarrollo de la humanidad, no obstante, 1 de cada 5 personas de la población mundial, lo equivalente a 1200 millones de personas no tienen acceso al servicio básico de la energía y/o dependen de anticuadas formas de obtención. La necesidad de utilizar la energía eléctrica y térmica ha hecho que a través de los últimos años se implementen varias formas de producción de energía limpia y renovable, dentro de los que se encuentra el uso de los residuos orgánicos,

por ser fácilmente reutilizables y por su capacidad en la elaboración de nuevas alternativas a partir de estos. (Zamudio Loza y Gómez Aguilar, 2021; Chávez Sifontes, 2019).

Una de las muchas formas en las que se suelen aprovechar los residuos orgánicos en la producción de energía es la generación de biogás y, además, los residuos generados en su producción funcionan como abono orgánico. (Alvarado Turcios, 2017; Domínguez Velásquez, 2020). El biogás se produce en un ambiente natural mediante reacciones de biodegradación por medio de la acción de microorganismos, este proceso se le conoce como digestión anaeróbica (Alvarado Turcios, 2017; Ávila Hernández et al., 2018).

Para la producción del biogás y del abono orgánico, comúnmente se utiliza un biodigestor, el cual es un recipiente o tanque completamente hermético, en que se dispone la materia orgánica en condiciones anóxicas, para que se pueda llevar a cabo la biodegradación (López Martínez, 2017). El uso del biodigestor genera gran relevancia, debido a que se puede implementar fácilmente, genera energía de manera sencilla y es de bajo costo, además cuenta con la capacidad de adaptarse a zonas rurales o apartadas siempre y cuando se cuente con la disponibilidad de los residuos orgánicos. (Bernal Patiño y Suárez Ramírez, 2018).

En Colombia, la tecnología del biodigestor resulta conveniente debido a que en el país se presentan las denominadas zonas no interconectadas ZNI. (Congreso de Colombia, 2003). Las ZNI tienen diversos factores que juegan en contra a la hora de implementar los sistemas convencionales de electrificación, por lo que es necesario buscar otras alternativas para suministrar la energía eléctrica a estos sectores. En este sentido, el presente estudio pretende contribuir una pequeña parte a la energización de las ZNI mediante la aplicación de un biodigestor anaerobio adaptado para el aprovechamiento de los residuos orgánicos en las instituciones educativas, ya que estas instituciones como centros de formación y educación son fundamentales para el desarrollo de la población en sus diferentes categorías y estas suelen

verse afectadas por la falta de recursos, como por ejemplo la energía eléctrica. (Ministerio de educación nacional y gobierno de Colombia, 2018).

2. OBJETIVOS

Objetivo general:

Comprobar la viabilidad del diseño de un biodigestor anaerobio adaptado a las instituciones educativas de las zonas rurales de Cundinamarca, a modo de que su funcionamiento sea continuo y eficiente.

Objetivos específicos:

- En base a la literatura, analizar los diferentes diseños y/o tipos de biodigestores anaerobios que ayuden a la formulación y adaptación del diseño enfocado especialmente en a las instituciones educativas.
- Explicar el funcionamiento de un biodigestor anaerobio, identificando los factores químicos, físicos y energéticos que intervienen dentro de este proceso para garantizar un funcionamiento optimo.
- Determinar la forma de mantenimiento para la producción de energía mediante un biodigestor y las implicaciones de esta actividad.
- En base a los recursos que una institución educativa rural de Colombia podría disponer, establecer un diseño de biodigestor anaeróbico adaptado, para su utilización de manera eficiente y continua.

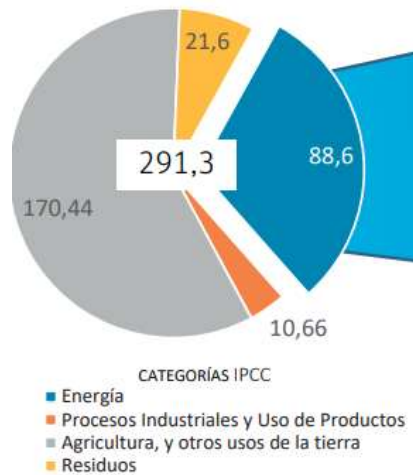
3. DEFINICION DEL PROBLEMA

Según la Organización de las Naciones Unidas (ONU) el 13 % de la población mundial no tiene acceso a los servicios de energía eléctrica, siendo aproximadamente más de 3000 millones de

personas dependientes de anticuadas formas de generación energía, como por ejemplo el carbón y la madera, representando alrededor del 60% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero.

Los principales Gases de efecto invernadero (GEI) en la atmosfera terrestre son el vapor de agua, dióxido de carbono, el metano, ozono y el óxido nitroso (Barchilón, 2020). En Colombia, se estima que se han generado 237 millones de toneladas de CO₂ cada año entre 1990 y 2014 (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM et al., 2018). Según el informe elaborado por IDEAM et al. (2016), para la Convención del Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), “se determinó que 16 departamentos lideran el 75% de las emisiones de gases de efecto invernadero en el país. Antioquia, Meta, Caquetá, Valle del Cauca, Santander, Boyacá, Bogotá D.C y Cundinamarca, emiten el 50% de las emisiones de CO₂ totales del país”.

Gráfica 1. Toneladas de dióxido de carbono generadas en Colombia en 2019 dividida por sectores.



Fuente: *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia.* (Ministerio de Minas y Energía, 2021)

“Las emisiones producidas en los procesos involucrados en el sector agrícola, la silvicultura y otros usos de la tierra son muy altas, ya que corresponden al 59% de las emisiones totales” (Hernández, 2021, p.527). La contaminación agrícola trae consecuencias importantes para el medio ambiente, por ejemplo: la degradación de los ecosistemas, la contaminación del agua, erosión / sedimentación del suelo y problemáticas producidas por el inadecuado manejo de los residuos orgánicos y el estiércol animal (Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura, FAO, 2018).

Las problemáticas ecológicas, ambientales y de la salud pública han sido objeto de debates, estudios y propuestas de investigación, dentro de las cuales, se encuentra la aplicación de tecnologías que tienen como objetivo principal el aprovechamiento de los recursos naturales para mitigar los efectos negativos producidos al medio ambiente, de esta forma, se pretende garantizar la perduración de nuestros ecosistemas para ofrecer una mejor calidad de vida para las futuras generaciones. (ONU, 2018)

En Colombia se les conoce como Zonas No Interconectadas (ZNI) a los territorios que carecen de la prestación del servicio eléctrico (Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG). La falta de energía en estas zonas, han creado barreras sociales que impiden el desarrollo de las comunidades y poblaciones rurales. Esto se evidencia en: la baja calidad de vida de las familias de las veredas, la inseguridad ocasionada por la falta de alumbrado público, el carente acceso a las nuevas tecnologías de comunicación e información, desventajas en la productividad, insuficiente servicio educativo lo que implica barreras en la educación, entre otros (Cusva García, 2020).

Las ZNI se encuentran en la zona rural de 18 de los 32 departamentos que conforma la división política de Colombia, los cuales equivalen al 52% del territorio nacional. (instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas para las Zonas No Interconectadas [IPSE]

2019). Sin embargo, la electrificación en las ZNI no es una tarea fácil de realizar si se utiliza las redes convencionales como el sistema interconectado nacional (SIN), ya que diferentes factores entran en contra de su aplicación, como, por ejemplo, la dificultad topográfica que pueda representar el sitio de implementación.

Las comunidades pertenecientes a las ZNI son dependientes de anticuadas formas de obtención de energía, como la leña y el carbón. (Unidad de planeación minero energética [UPME], 2019; UPME, 2015), no obstante, “Colombia presenta una amplia viabilidad para el desarrollo de energías renovables, considerando su ubicación geográfica que posee mucho potencial para generar energía solar fotovoltaica, eólica y de biomasa” (Molano y Ramírez, 2020), es por ello que en los últimos años se han incentivado y desarrollado estudios e investigaciones sobre la aplicación de diversas tecnologías de producción de energía para las ZNI (Superservicios, 2020).

Dentro de estas tecnologías, haremos especial énfasis en un biodigestor, ya que cuenta con la ventaja de generar energía de gran aprovechamiento y fácil implementación, en especial para las zonas rurales o sectores que cuenten con disponibilidad de residuos orgánicos, puesto que no sólo se hace uso del gas producido, sino que el biofertilizante obtenido como subproducto en la degradación de la materia orgánica mejora la disponibilidad de nutrientes para los cultivos, permitiendo una producción a bajo costo sin sobrecarga de sustancias químicas para el suelo. (Bernal Patiño y Suárez Ramírez, 2018).

Un punto a tener en cuenta es lo que esto representa para los institutos educativos, ya que se ha estimado que el 70% de los niños y jóvenes provenientes de las zonas rurales y apartadas de Colombia, no acceden a la educación, debido a que no cuentan con las condiciones elementales para disfrutar del sistema educativo (Matijasevic, 2014).

A partir de lo anterior nos preguntamos: **¿Qué tan viable puede llegar a ser la aplicación de un biodigestor anaerobio como tecnología verde para la producción de energía en una institución educativa ubicada en una zona rural de Colombia, a modo de que se pueda ayudar a reducir la actual brecha del acceso a la energía en los sectores rurales pertenecientes en las ZNI?**

4. JUSTIFICACION

El modelo productivo de bienes y servicios a nivel mundial se ha caracterizado por el uso excesivo de materiales y la sobreexplotación de los recursos naturales presentes en la tierra; “siendo la desmesurada cantidad de residuos, uno de los resultados generados por este modelo productivo desproporcionado” (Valdés López et al., 2019). La disposición final de los residuos es un problema global, debido a que producen un gran impacto sobre los ecosistemas y pueden representar un riesgo para el medio ambiente y la salud humana. (Saldaña Durán y Nájera González, 2019; Salinas, 2019).

Se ha popularizado la tendencia de implementar tecnologías que tienen como objetivo la disminución y el aprovechamiento de los residuos. Dentro de la gran variedad de residuos que se generan diariamente, podemos destacar y enfatizar los **residuos orgánicos**, ya que han demostrado su potencial para la elaboración de nuevos productos y nuevas formas de energía limpia. (Andersson et al., 2016).

“La digestión anaerobia tiene un alto potencial de tratamiento de los residuos orgánicos y ha tenido un creciente auge en los últimos años por ser una solución económicamente factible”. (Guardia Puebla, Rodríguez Ponce y Benítez Quintero, 2017). Cabe mencionar que la digestión anaerobia tiene varios beneficios ambientales, los que incluyen: la producción de energía renovable en forma de biogás, la posibilidad de recirculación de nutrientes, reutilización

de los subproductos como fertilizantes y la reducción de la contaminación por gases de efecto invernadero (Cubillos Sierra, Huertas y Contreras León, 2018).

Esta tecnología es una forma de energía limpia y renovable, que puede llegar a ser un buen sustituto de la energía convencional, sobre todo en las zonas rurales o en aquellos sectores que cuenten con la disposición de los residuos orgánicos (Acosta Pabuena y Pasqualino, 2014, p. 28; Reyes Aguilera, 2016, P.13). Lo que hace prometedor el uso del biodigestor sobre otras fuentes de energía renovable son dos aspectos fundamentales: la fácil obtención de materia prima (residuos orgánicos) y el bajo costo de elaboración del biodigestor. (Peláez Merchán, 2020).

En Colombia resulta conveniente la aplicación de las tecnologías alternativas para la implementación de biogás debido a que en el país se presentan zonas sin acceso a la energía, las cuales son denominadas como ZNI (*Zonas no interconectadas*), en donde se han caracterizado por la dificultad de aplicar los métodos convencionales de energía debido al intrincado acceso a estos lugares (Congreso de Colombia, 1994). Gracias a la adaptabilidad del biodigestor, su aplicación puede realizarse de manera sencilla y a bajo costo en los entornos de las ZNI, principalmente en los sectores rurales, ya que transforma residuos potencialmente peligrosos o generadores de GEI en una fuente de energía local de fácil acceso, permitiendo la integración con economías rurales como por ejemplo la ganadería, donde se utiliza el estiércol como materia prima en la producción de energía (Díaz Salazar y Torres Cortes, 2019).

Dar acceso a la energía en las ZNI es importante, porque la energía juega un papel fundamental en el ámbito social, económico y ambiental. El acceso a los servicios de energía de calidad representa un elemento clave en la lucha contra la pobreza, la marginación, la insalubridad, el analfabetismo y el bienestar de las personas (ONU, s.f.; Calvo et al., 2021).

Una de las maneras en las que se puede evidenciar los beneficios de la energización en las ZNI, es su aplicación en las instituciones educativas rurales, ya que cobran gran relevancia como mecanismo para educar a las comunidades de conocimientos que les permitan acceder a su derecho fundamental a una vida digna y proveerse de los medios para alcanzar el bienestar social en sus distintas esferas. (Aguilar Balam, En Yam, Alamilla Mojerón y Rodríguez Pech, 2019).

Sin embargo, en Colombia, las instituciones educativas rurales no cuentan con las condiciones fundamentales y se ven obstaculizadas por diversos factores, dentro de los que se encuentra la falta de recursos tales como la energía eléctrica y falta de infraestructura. (Ministerio de educación nacional y gobierno de Colombia, 2018). Debido a esto, el presente estudio busca analizar qué tan efectiva puede ser la aplicación de una tecnología renovable como el biodigestor en una institución de educación rural con el fin de evidenciar su pertinencia y comprobar su continuidad a largo plazo, para que al momento de utilizar estas tecnologías beneficien a las comunidades de las ZNI.

5. MARCO REFERENCIAL

Para comprender más la problemática que se está planteando en este proyecto, es necesario explicar y/o definir los conceptos fundamentales y normatividades vigentes que harán posible este proyecto de investigación.

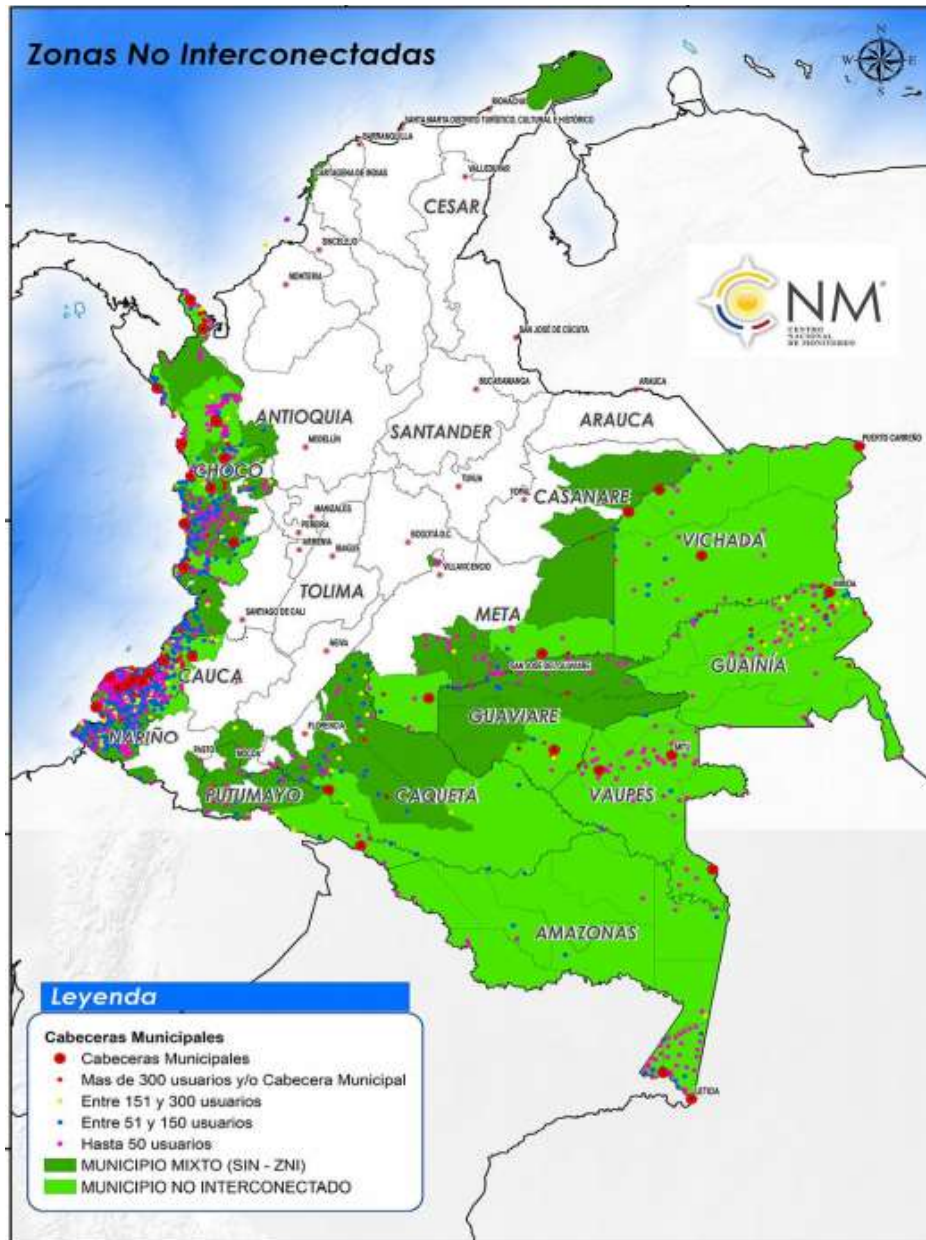
5.1 ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI):

5.1.1 Zonas no interconectadas (ZNI):

Son los municipios, corregimientos, localidades y hogares no conectados al Sistema Interconectado Nacional (SIN), estas zonas tienen un servicio deficiente y/o nulo de energía eléctrica, impidiendo el acceso a las tecnologías que permiten mejorar la calidad de vida,

ocasionando diversas dificultades para las personas que viven en estas zonas. (UPME, MinMinas y Colombia inteligente, 2017).

Gráfica 2. Cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas



Fuente: tomado de “Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región central”, (Región Central RAP-E y Universidad distrital francisco José de Caldas, 2020)

Las ZNI se caracterizan principalmente por presentar una baja densidad poblacional, una ubicación lejana de los centros urbanos, dificultad en el acceso y una gran riqueza de recursos

naturales. las ZNI comprenden el 52% del territorio colombiano, con una población estimada de 1.900.000 habitantes, estas zonas se encuentran compuestas por el departamento insular, el Archipiélago de San Andrés y Providencia, cuatro capitales departamentales que son Amazonas, Vichada, Guainía y Vaupés, 17 departamentos, 97 municipios 37 y 1.728 localidades (Departamento nacional de planeación [DNP] et. al, 2018). La integración de las zonas no interconectadas (ZNI) al sistema interconectado nacional (SIN) presenta múltiples inconvenientes, como por ejemplo el costo, instalación y/o adecuación, haciéndose necesaria la utilización de la generación combinada de energía, causando la dependencia de los combustibles convencionales, el alza de los costos de generación y los impactos ambientales que produce su uso (Región central RAP-E y Universidad distrital José de Caldas, 2020).

5.1.2 NORMATIVAS Y REGULACIONES PARA LAS ZNI:

5.1.2.1 Ministerio de minas y energía:

Decreto 517 de 2020: Por el cual se dictan disposiciones en materia de los servicios públicos de energía eléctrica y gas combustible, en el marco del Estado de Emergencia Económica, Social y Ecológica declarado por el Decreto 417 de 2020.

Decreto 457 de 2020, por el viceministro de Energía. “Para: Actores y usuarios de la cadena logística y productiva del Sector de energía, autoridades territoriales civiles, administrativas, de policía, y ciudadanía en general”.

Decreto 574 de 2020: “Por el cual se adoptan medidas en materia de minas y energía, en el marco del Estado de Emergencia Económica, Social y Ecológica”

5.1.2.2 CREG Comisión de Regulación de Energía y Gas:

Resolución CREG 118 de 2020: “Por la cual se adoptan medidas transitorias para el pago de las facturas del servicio de energía eléctrica en zonas no interconectadas”.

Resolución CREG 064 de 2020: “Por la cual se modifica y adiciona la Resolución CREG 058 de 2020 Por la cual se adoptan medidas transitorias para el pago de las facturas del servicio de energía eléctrica”.

5.1.2.3 Superservicios:

Circular Externa SSPD 20201000000084: 16 de marzo de 2020. “Medidas temporales para garantizar la prestación de los servicios públicos domiciliarios ante la declaratoria de emergencia sanitaria asociada al COVID-19.”

Circular externa SSPD 20201000000204 de abril de 2020 “Compilación normativa y comportamientos esperados por parte de los prestadores en la aplicación de la normatividad expedida por el Gobierno Nacional y las Comisiones de Regulación en el marco de la Emergencia Sanitaria”.

Circular Externa SSPD 20201000000104 de marzo de 2020. Indicaciones a gobernadores y alcaldes para permitir movilización de vehículos, funcionarios e insumos necesarios para garantizar la prestación de los SPD, para transferir recursos SGP oportunamente, y a coordinar con empresas el cumplimiento a la normativa

5.1.2.4 Congreso de Colombia:

Ley 2036 de julio de 2020: “Por medio del cual se promueve la participación de las entidades territoriales en los proyectos de generación de energías alternativas renovables y se dictan otras disposiciones”

Ley 2008 de 2019: “Por la cual se decreta el Presupuesto de Rentas y Recursos de Capital y Ley de Apropriaciones para la vigencia fiscal del 1° de enero al 31 de diciembre de 2020”.

5.2 RESIDUOS ORGÁNICOS:

Son todos los elementos provenientes de desechos cuyo origen sea orgánico, por ejemplo, los residuos de origen animal o vegetal, dentro de los cuales se encuentran: Los restos de frutas y verduras, sobras de comida, huesos, restos de carne, cartón, papel, corchos, cascara de huevo, aserrín, madera, maleza verde, estiércol, hojas de plantas y flores, etc., (Jaramillo Henao y Zapata Márquez, 2008). En Colombia, diariamente se generan más de 32.000 Ton de residuos sólidos urbanos, de los cuales más de 19.000 Ton son residuos orgánicos, aproximadamente, el 60 % de los residuos urbanos son residuos orgánicos. (UPME, 2018). Gracias a la vocación agrícola del país, se tiene un potencial muy grande para el aprovechamiento de los residuos orgánicos, debido a la facilidad para encontrarlos, estos pueden contribuir a la generación de energía eléctrica en las zonas no interconectadas, mediante el uso de biodigestores y tecnologías de aprovechamiento renovable para estos residuos. (Unidad administrativa especial de servicios públicos [UAESP] y grupo de investigación sistemas integrados de producción agrícola y forestal [SIPAF], 2018)

5.2.1 Beneficios del aprovechamiento de residuos orgánicos:

Ambientales:

- Se pueden transformar en materia prima para usarlos como fertilización ecológica para contribuir con la recuperación de suelos degradados.
- Facilitan la transición hacia modelos de agricultura y energía más limpios, mitigando las emisiones de gases de efecto invernadero al utilizar abonos orgánicos y generando energía limpia.
- Se tendrán más disponibilidad de sustratos ecológicos para cultivar plantas, aumentando la tasa de fijación de dióxido de carbono, lo que mitiga el calentamiento global.

- Facilitan la obtención de los alimentos orgánicos, estos alimentos están libres de contaminación, fomentando la alimentación sana como estrategia de salud preventiva.
- Minimizan la dependencia de los fertilizantes químicos, brindando sostenibilidad y autonomía para los agricultores y los recursos locales.
- Reemplazan los fertilizantes de síntesis química derivados del petróleo por abonos orgánicos.

Económicos:

- Posibilitan la consolidación de proyectos productivos para la generación de energía, abonos y alimentos orgánicos.
- Minimizan la dependencia externa de fertilizantes, así mismo, brindan una mayor sostenibilidad y autonomía para los agricultores al aprovechar los recursos locales Fortalecen el tejido social, al generar espacios para la integración de la comunidad y el intercambio de saberes.
- Preparan y ayudan a las comunidades de las ZNI al desarrollo humano y sostenible.

Sociales:

- Posibilitan la organización de las comunidades para la implementación de nuevos proyectos comunitarios energéticos y ambientales
- Facilitan la recuperación y adaptación de territorios en abandono los mismos.
- Generan cambios culturales ya que incentivan y promueven el uso y el aprovechamiento de los residuos sólidos.

5.2.2 Clasificación de los residuos orgánicos:

Tabla 1. clasificación de los residuos orgánicos.

Orgánicos	Reciclables	Ordinarios
<ul style="list-style-type: none"> -Residuos de cocina crudos. -Restos de comida cocinados. -Forestales. -podas Hojarasca. -Aserrín -Corte de césped. -Cáscaras y tubérculos. -Verduras. -Estiércoles. -Granos. -Cáscaras de huevo. -Cuncho de café. -Viruta de madera. -Papel. -Cartón. 	<ul style="list-style-type: none"> -Papel -Cartón -Plásticos -Vidrios -Metales -Textiles -caucho. 	<ul style="list-style-type: none"> -Papel higiénico -Papel absorbente -Servilletas -Papel de cocina -Pañales -Elementos sanitarios -Plastificado Papel -Carbón -papel y/o cartón -Papel metalizado -Cajas y colillas de cigarrillo -Demás Materiales reciclables que se encuentran contaminados, sucios y /o húmedos.

Fuente: adaptado de “aprovechamiento de los residuos orgánicos en Colombia” (Henao y Zapata Márquez, 2008)

5.3 Biodigestor:

Es un contenedor completamente hermético en la cual se lleva a cabo un proceso de fermentación anaerobia, que contiene en su interior, residuos orgánicos mezclados con un poco de agua. Un grupo de microorganismos presentes en los desechos orgánicos producen una reacción química conocida como digestión anaerobia, de la que se obtiene un gas que puede ser usado para la producción de energía y un subproducto que puede ser usado como abono. (Tóala Moreira, 2013; Osejos Merino et al., 2018)

5.3.1 Partes básicas de un Biodigestor:

En base al “manual del biogás” (FAO et al.,2011) las partes básicas constan de lo siguiente:

Cámara de carga: Se trata de un pequeño depósito donde se coloca la materia orgánica a procesar.

Cámara de descarga: Recibe los residuos provenientes del reactor, los cuales pueden utilizarse como abono y acondicionador del suelo.

Reactor: Es la parte en donde sucede todo el proceso químico de descomposición de los desechos, generalmente es un tanque alargado que se sitúa bajo tierra, conecta las cámaras de carga y de descarga por dos extremos diferentes.

Cubierta: Se coloca por encima del reactor y cumple dos funciones: impedir la entrada de aire al interior y evitar la fuga del gas producido, la cubierta debe de ser completamente hermética.

Tubería: Conduce el gas que se produce en el reactor, generalmente cuenta con una válvula de seguridad que impide que la presión al interior de la cubierta plástica rebase los niveles permitidos. **Llave de paso. Regula la salida del gas.**

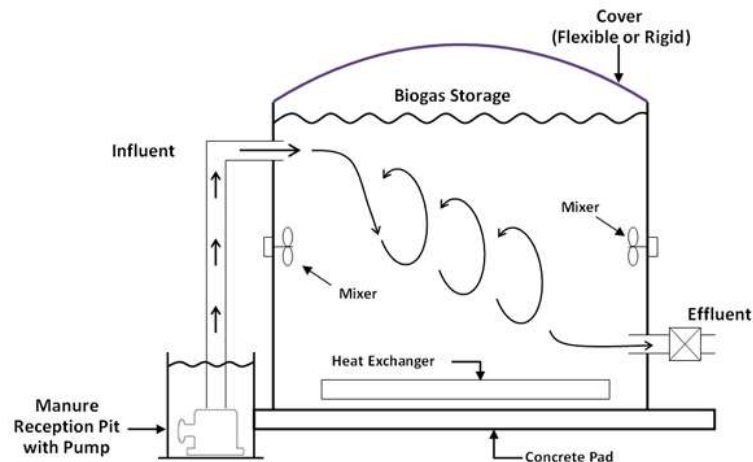
5.3.2 Tipos de Biodigestores:

Flujo continuo:

“En este tipo de biodigestores la alimentación es constante, se debe contar con una producción de biomasa diaria, y el tiempo de retención de los residuos es mucho más corto. Por esto se puede decir que el afluente es igual al efluente o descarga del digestor, y se espera que por tal motivo la producción de biogás sea uniforme en el tiempo. Normalmente estos digestores son de gran capacidad, por lo que es necesario emplear bombas para alimentarlos y otros equipos para proporcionar calor y agitación. Estos digestores son de mayor uso en la industria. Uno de los reactores químicos de este tipo más común es el CSTR” (Bernal Patiño y Suárez Ramírez, 2018)

Flujo discontinuo: Se cierra completamente el contenedor y no se vuelve abrir hasta que el proceso químico haya finalizado, con este tipo de biodigestor todo el biogás acumulado se extrae en un solo paso, principalmente se caracterizan por su bajo costo, fácil instalación y mantenimiento, así como por requerir sólo de materiales locales para su construcción. (Miranda, 2018).

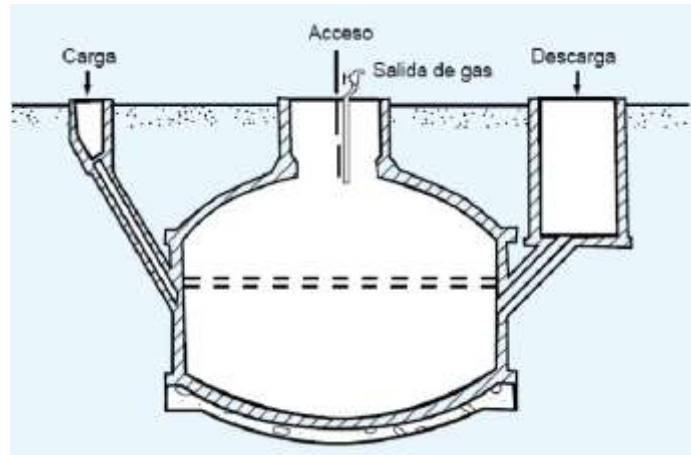
Ilustración 1. Representación del biodigestor discontinuo



Fuente: (EPA, s.f.)

Flujo semicontinuo: En comparación al anterior, este biodigestor permite añadir materia orgánica y extraer biogás durante el proceso químico, permitiendo un mejor manejo de los residuos y del biogás generado, este proceso se puede extender indefinidamente, teniendo una generación constante de biogás. (Miranda, 2018).

Ilustración 2. Representación del biodigestor semidiscontinuo



Fuente: Esquema de un biodigestor tipo chino. (FAO et al., 2011)

Los biodigestores constituyen una alternativa energética y económica, muy efectiva en comunidades que no tienen un buen suministro de energía eléctrica (Giroto y Stülp, 1989; Cervi, Esperancini y Bueno, 2011). Permitiendo satisfacer la demanda energética de estas poblaciones y al mismo tiempo proporciona una solución adecuada para los residuos de humanos y animales, ayudando al medio ambiente (Aguilar y Botero, s.f.).

“Estos biodigestores son alimentados diariamente con una carga relativamente pequeña en comparación al contenido total; esta se deposita en la cámara de carga, e igualmente se debe extraer de la cámara de descarga un volumen igual del efluente líquido para así mantener el volumen constante. Generalmente producen biogás casi permanentemente, gracias al suministro constante de nuevos nutrientes para las comunidades de bacterias”. (Miranda, 2018, p. 2)

“Una limitante importante es la disponibilidad de agua, debido a que la carga debe ser una mezcla de una parte del material orgánico y cuatro partes de agua (proporción 1:4)”. (Miranda, 2018, p. 2)

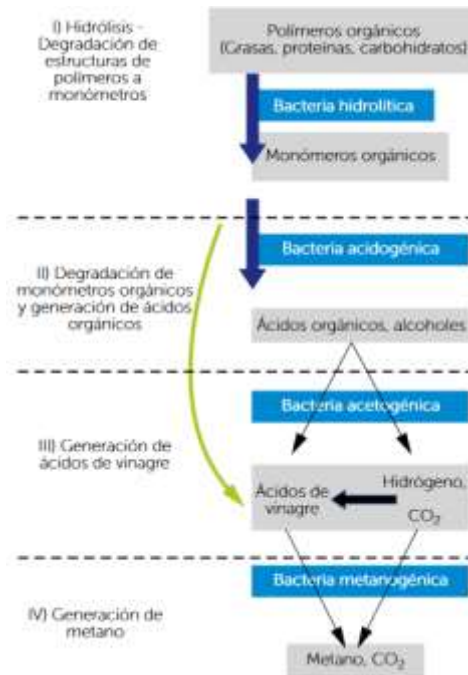
5.4 Digestión anaerobia: Es el proceso en donde los microorganismos descomponen material biodegradable, en este caso, desechos orgánicos en la completa ausencia de oxígeno. Las condiciones óptimas de los microorganismos, como lo es la intensidad y la duración del proceso anaeróbico, varían dependiendo de diversos factores, entre los que se destacan la temperatura, el pH, el contenido de sólidos, los nutrientes y la toxicidad (Hernández, 2009).

Este proceso genera en mayor parte metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), a esto se le denomina biogás, uno de los recursos más valiosos del proceso. El biogás producido puede llegar a contener hasta un 70% de metano, que puede utilizarse para la generación de energía térmica o eléctrica (FAO et al, 2011).

5.4.1 Etapas de la digestión anaerobia:

La digestión anaerobia consta de 4 etapas las cuales se muestran en la siguiente ilustración:

Ilustración 3. Generación de biogás a partir de cuatro fases de degradación aeróbica.



Fuente: Tomado de "Generación de biocarbón a partir del material sólido en la hidrólisis aeróbica - microbiológica.

(Mathias Schlegel et al., 2018)

1-Hidrólisis: Es una reacción química entre una molécula de agua y otra macromolécula, en la cual la molécula de agua se divide para actuar sobre otra sustancia para formar una o más sustancias enteramente nuevas (Drinking water technical y legal terms, 2009). Los factores que más afectan la velocidad y el grado de conversión de la hidrólisis son: temperatura del reactor, tiempo de residencia del sustrato, composición del sustrato, tamaño de las partículas, pH del medio, concentración de ácidos grasos volátiles, entre otros (De Lemos Chernicharo, 2007)

2- Acidogénesis: Proceso de degradación de las moléculas pequeñas, como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos, en ácidos orgánicos, bióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno. (Van Lier, Mahmoud y Zeeman, 2008) La acidogénesis es el paso más rápido en la cadena de reacciones anaerobias.

3-Acetogénesis: Es el proceso mediante el cual bacterias anaerobias producen acetato, hidrogeno y dióxido de carbono a partir de la transformación de ácidos grasos volátiles (Suárez Chernov, López Díaz y González,2019). Entre todos los productos metabolizados por las bacterias acetogénicas, sólo el hidrógeno y el acetato pueden ser directamente utilizados por los microorganismos, Sin embargo, por lo menos el 50 % de la Demanda química de oxígeno (DQO) biodegradable se convierte en ácidos propiónicos y butíricos los cuales, se degradan en ácido acético e hidrógeno, por la acción de las bacterias acetogénicas (De Lemos Chernicharo, 2007).

4- Metanogénesis: Es la formación de metano y dióxido de carbono a partir de los productos obtenidos de la acetogénesis (Mathias Schlegel et al., 2018; Suárez Chernov, López Díaz y González,2019). Es una forma de metabolismo microbiano muy importante y extendida. En la mayoría de los entornos, es el paso final de la descomposición de la biomasa, para usarla como energía. (Kepler et al., 2006).

5.5 El biogás:

Es el gas que se genera en medios naturales y/o en dispositivos específicos. Se realiza mediante las reacciones de biodegradación de los residuos orgánicos con la ayuda de microorganismos en la ausencia de oxígeno. La composición del biogás es una mezcla constituida por metano (CH_4) en una proporción que oscila entre el 50% al 70%, el dióxido de carbono (CO_2) entre el 30% al 40% y menos del 5% en conteniendo de pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno (H), nitrógeno (N), oxígeno (O) y sulfuro de hidrógeno (H_2S). (Gobierno de España, IDEA y BESEL S.A., 2007).

La producción de biogás por la descomposición anaerobia es útil para tratar residuos biodegradables ya que produce combustible sostenible además de generar un “residuo” que puede aplicarse como acondicionador de suelo o abono genérico. Este gas se puede utilizar para la producción de energía en forma eléctrica o térmica, que han llegado a ser implementado en turbinas, hornos, estufas, secadoras, calderas y otros sistemas de combustión a gas. (Barrena Gurbillón et al., 2019).

5.5.1 Aplicaciones del biogás:

Las aplicaciones del biogás pueden estar presentes a nivel doméstico, comunitario e industrial. En el **sector doméstico**, se pueden implementar biodigestores entre 2-16 m³ de capacidad, para utilizarlo en la iluminación, cocción y calefacción, especialmente en las zonas rurales y/o aisladas en las cuales se generan cantidades de residuos orgánicos (Surendra; Song, 2014). En el **sector comunitario** se pueden implementar biodigestores de mayores capacidades para suministrar el biogás para poblaciones compuestas por varias viviendas agrupadas, para edificios comunitarios como colegios o comedores, para suministro de servicios públicos como, por ejemplo, iluminación urbana y para comercios como los restaurantes. (UPME,2015).

En el **sector industrial** pueden ser utilizados como fuente de energía térmica, en plantas de ciclo combinado para cogeneración de calor y electricidad o como combustible de transporte, algunas de estas aplicaciones requieren la purificación del biogás para eliminar los gases diferentes del metano, este tipo de biodigestores pueden encontrarse en rellenos sanitarios, plantas de tratamiento de aguas residuales, industrias procesadoras de alimentos y las agroindustrias.(Arrieta, 2007; Conil, 2009), entre otras.

5.6 Bioabono:

En la producción de biogás se obtiene un subproducto, obtenido por ser aquella materia orgánica no atacada por los microorganismos, denominados efluentes y ha servido como un fertilizante de calidad. Los efluentes se pueden presentar en forma sólida denominada Biosol y forma líquida denominada Biol. (Garavito Ruas, 2018)

El Biol se define como un abono orgánico líquido, que se origina a partir de la descomposición de materiales orgánicos en ausencia de oxígeno y que contiene los nutrientes necesarios para un desarrollo adecuado de las plantas. Por otra parte, el Biosol es el equivalente al abono orgánico sólido, manteniendo sus propiedades benefactoras al desarrollo de las plantas (Cabos Sánchez et al, 2019).

6. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS Y/O ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

El presente proyecto se presenta con el propósito de llevar energía eléctrica a las ZNI mediante fuentes de energía limpias y renovables, con el fin de que estas ingresen al sistema interconectado nacional (SIN), disminuyendo la cantidad de personas que no tienen acceso a energía eléctrica, Para ello, se requiere tomar una serie de consideraciones a tomar en cuenta antes del desarrollo de la solución con el fin de limitar el alcance del proyecto.

Se establece que el diseño del biodigestor será aplicado para las instituciones educativas rurales, debido a que estas suelen presentar dificultades en el acceso a la energía eléctrica y representa un beneficio para las comunidades ubicadas en estas zonas por ser centros educativos.

Para efectos de este estudio, el diseño del biodigestor se toma en cuenta varios puntos, en primer lugar, se toma como referencia el consumo energético promedio de las instituciones educativas, en base a esto, el diseño del biodigestor tendrá la capacidad de generar energía para utilizarla según las necesidades de la institución. En segundo lugar, el biodigestor se establecerá en las zonas de Cundinamarca, que se sean óptimas para la implementación o adaptación del biodigestor y permita a su vez, llevar a cabo el funcionamiento del diseño a modo de que sea sencilla y optima, ya que cada zona posee requerimientos específicos o adecuaciones para que se implemente un biodigestor correctamente.

Para finalizar, en tercera parte, el diseño del biodigestor se basa teniendo en cuenta principalmente los residuos orgánicos disponibles, en las cuales se basó principalmente en la utilización de residuos provenientes de estiércol animal y residuos de plantas o restos de comida, debido a que estas pueden incorporarse con las economías rurales como lo es la ganadería y la agricultura. Se escogen estos tipos de residuos porque no todas las instituciones educativas tienen acceso a todos los residuos orgánicos necesarios para llevar el proceso anaerobio con eficiencia y facilidad.

Dentro de las especificaciones técnicas del biodigestor se tomaron en cuenta factores importantes que pueden alternar el rendimiento del biodigestor, como lo es: la temperatura, el pH, el tiempo de residencia, la alimentación y/o el tipo de biodigestor utilizado (Ávila Hernández et al., 2018), los cuales serán descritos a continuación:

- **Temperatura y tiempo de retención:** El rango de temperatura y el periodo de retención dentro del biodigestor, clasifican la fermentación de la siguiente manera (Alcayaga et al. 1999):
 - Fermentación psicrófilico, para un rango de temperatura entre 10°C y 20°C y más de 100 días de retención.
 - Fermentación mesofílica, para un rango de temperatura entre 20°C y 45°C y aproximadamente 30 a 60 días de retención.
 - Fermentación termofílica, para un rango de temperatura entre 45°C y 65°C y más de 10 a 15 días de retención.

La temperatura de operación del digestor, es considerada uno de los principales parámetros de diseño, debido a la gran influencia de este factor en la velocidad de digestión anaeróbica. “A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de los microorganismos y se acelera el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás” (FAO et al., 2011)

Sin embargo, las variaciones bruscas de temperatura pueden llegar a desestabilizar el proceso, para lo cual es imprescindible mantener una temperatura constante u homogénea (Mahmudul et al., 2021). Ante esto, se ha determinado que de los 3, el rango psicrófilico es el más estable, no obstante, es poco recomendado debido al tiempo de fermentación y al tamaño del reactor necesario, por otra parte, el rango termofílico, es el más eficiente de los 3, pero representa mayores riesgos al presentar mayor inestabilidad en su temperatura y por presentar toxicidad de algunos compuestos, debido a la alta temperatura (FAO et al., 2011).

Según con los datos registrados por el Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, IDEAM (2014), entre los años de 1981 y 2010, en Cundinamarca, se registraron temperaturas máximas entre 24°C y 26°C y una temperatura mínima menor de 8 °C; Por otro lado, los eventos climáticos provocados por el fenómeno del niño y de la niña que se presenta en el país, pueden hacer que varíen las temperaturas y por lo tanto incidir en la inestabilidad del biodigestor, ante esto el diseño se planteó en base al rango 2 y el rango 3, debido a que “Una técnica interesante es la combinación de dos fases de digestión, una primera termofílica de elevada carga orgánica y una segunda mesofílica con menor carga. Con este sistema se aprovechan las ventajas del sistema termofílico, pero se reducen los problemas de inestabilidad” (FAO et al., 2011).

- **Relación Carbono/Nitrógeno:** Toda materia orgánica sometida a fermentación anaeróbicas es capaz de producir biogás, en la cual su calidad y cantidad dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado (FAO et al., 2011). Las baterías formadas para la producción de biogás requieren de altos niveles de nutrientes, ante esto, el carbono y el nitrógeno funcionan como principales fuentes de alimentación; no obstante, debido a que estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, se considera una relación de 30:1 hasta 20:1 (Alcayaga et al., 1999).

No es recomendable aumentar la cantidad de carbono respecto al nitrógeno, por ejemplo, una relación superior 35:1, ocurre el proceso de producción de biogás más lentamente debido a la falta de nitrógeno; En el caso contrario, cuando es escaso el carbono, las baterías generan excesivamente amonio, la cual en grandes cantidades son tóxicas e inhibe el proceso. (FAO et al., 2011). Para el desarrollo del biodigestor del presente documento, se optó por mantener la relación recomendada de 30:1 ante esto es posible combinar diferentes materias primas para mantener estable la mencionada

relación, según lo descrito en el informe de la FAO, “Manual de biogás”. En tabla número 2 se presentan sustancias y su correspondiente relación carbono/nitrógeno de algunos residuos que podrían estar presentes en el medio rural, las cuales serán utilizadas para el desarrollo del diseño del biodigestor.

Tabla 2. Valores promedios aproximados de la relación carbono/nitrógeno de algunos residuos disponibles en el medio rural

Materiales	%C	%N	C/N	Materiales	%C	%N	C/N
Residuos animales				Residuos Vegetales			
Bovinos	30	1.30	25:1	Paja trigo	46	0.53	87:1
Equinos	40	0.8	50:1	Paja cebada	58	0.64	90:1
Ovinos	35	1	35:1	Paja arroz	42	0.63	67:1
Porcinos	25	1.5	16:1	Paja avena	29	0.53	55:1
Caprinos	40	1	40:1	Rastrojos maíz	40	0.75	53:1
Conejos	35	1.5	23:1	Leguminosas	38	1.5	28:1
Ganillas	35	1.5	23:1	Hortalizas	30	1.8	17:1
Patos	38	0.8	47:1	Tubérculos	30	1.5	20:1
Pavos	35	0.70	50:1	Hojas secas	41	1.00	41:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1	Aserrín	44	0.06	730:1

Fuente: (Guevara, 1996; Corace et al., 2006; Varnero y Arellano, 1990)

- pH:** está en función de la concentración de CO₂ en el gas, de la concentración de ácidos volátiles y de la propia alcalinidad de la materia prima (GTZ-CVC-OEKOTOP, 1987). El consorcio bacteriano que desarrolla la digestión anaerobia suele gustar de estar en ambientes con pH entre 6.5-7.5. Dentro del consorcio bacteriano, las bacterias que realizan la etapa de acidogénesis y acetogénesis trabajan mejor en el pH 55 y 65, mientras que las metalogénicas lo hacen en un rango 7.8 a 8.2 (Martí Herrero, 2019).

- **Alimentación y tipo de biodigestor:** La selección del tipo de alimentación y el tipo de biodigestor se basa en las restricciones ambientales / sociales, normativas, topográficas y económicas.

Por otra parte, dentro de las especificaciones técnicas de la zona de implementación, se establece la cantidad necesaria de energía que requiere un colegio de un tamaño determinado. Como referencia se adoptó el consumo energético a partir de una línea base para colegios de más de 1500 estudiantes, la cual se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3. Líneas base de consumo de energía para edificios educativos según el tipo de clima

Línea base de consumo (kWh/m ² por año) para edificios educativos según el clima	
Frio (18°C <)	Templado (18 – 24°C)
40	44

Fuente: adoptado de (Internacional finance corporation, IFC,2015; Consejo colombiano de construcciones sostenibles, CCCS, 2019)

En la tabla anterior solo muestra los datos aceptables para las temperaturas presentes en Cundinamarca, según lo mencionado anteriormente. Para determinar la cantidad necesaria de energía producida de biogás a fin de suplir con estas líneas base primero se establece un área (iguales para ambos casos), para luego determinar el consumo de kilowatts por año y realizar la correspondiente conversión para obtener una consistencia dimensional.

Para el área del colegio, se tomó como modelo idealizado, el aportado por el ministerio de educación de “El colegio 10” donde de las diferentes tipologías se optó por una estructura de 12 aulas de grado 0 a 11 (1 grupo por grado), donde se tomará como referencia el área del lote en general y la que será usada para la solución de ecuaciones es de 6135 m².

Se tomó esta tipología por ser un escenario teóricamente más cercano a la estructura de un colegio rural, ya que la tasa de tránsito de estudiantes es mínima, respecto a las cifras que

demuestra un aparente desinterés de continuar con la formación educativa, mostrando que el 13.8% de los niños entre los 12 y 15 años no estaban asistiendo a la educación, mientras que el 39.4% de los jóvenes entre los 16 y 17 años, estaban completamente desvinculados (DNP,2014; Mineducación, 2018).

7. ANÁLISIS DE RESTRICCIONES

El diseño del biodigestor se plantea teniendo en cuenta las limitaciones impuestas por diferentes factores, las cuales influyen en mayor medida en el desarrollo del estudio. Las limitaciones se describen a continuación:

7.1 Normatividad: Para el desarrollo del biodigestor, se toma en cuenta el marco legal vigente en Colombia, para el desarrollo de este estudio se tiene en cuenta las siguientes leyes y normas estipuladas en lo relacionado con los biodigestores y la energía renovable.

- **Ley 1715 de 2014:** El propósito de esta norma es de incentivar, producir y usar energías renovables, así mismo se instauran beneficios al sector privado que desarrollen estas tecnologías y se instaura las siguientes entidades públicas: Ministerio de ambiente y desarrollo social (MADS), Corporación autónoma regional (CAR), el ministerio de minas y energía, la comisión de regulación de energía y gas (CREG), unidad de planeación minero-energética (UPME), ministerio de hacienda y crédito público, autoridad nacional de licencias ambientales (ANLA), con el fin de regular todo lo relacionado con la energía. La ley también tiene la función de establecer el marco legal y los instrumentos necesarios para la promoción y el aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía (Ministerio de ambiente, s.f.).
- De acuerdo con la **resolución CREG 202 de 2013**, se permite la financiación de proyectos energéticos para las zonas rurales, siempre y cuando no sea con el propósito de expandir empresas. Por otra parte, específicamente para proyectos con biogás,

podrían aplicar a este tipo de fondos evaluando su factibilidad en la prestación de servicios energéticos aplicables a entidades como el Fondo Especial Cuota de Fomento “FECF” y el Sistema General de Regalías “SGR” (UPME, 2015).

- La **Ley 99 de 1993** define que el ministerio del medio ambiente a través de la consolidación del sistema nacional (SINA), dicta una política ambiental sobre los recursos renovables naturales que se centrará en el proceso de desarrollo económico y social del país, a través de proyectos vinculados al derecho de los seres humanos a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza de la protección de zonas como los páramos, los nacimientos de agua y zonas de recarga de acuíferos, garantizando la formulación de políticas ambientales que tengan en cuenta la investigación científica, a partir de la incorporación de costos ambientales por parte de estado y el uso de instrumentos económicos para la prevención, corrección y restauración del deterioro ambiental de los recursos renovables.
- **Resolución de UPME 703 del 2018**, establece el procedimientos y requisitos para la expedición de la certificación de beneficio ambiental para nuevas inversiones en proyectos de fuentes no convencionales de energías renovables y la gestión eficiente de la energía con el propósito de obtener beneficios tributarios según se establece en la ley 1715. (ministerio de minas y energía, s.f.)
- **El Plan nacional de desarrollo 2018-2022**, establece diversos actos relacionados con el desarrollo social, económico, cultural y productivo enfocado hacia la equidad. Dentro de los pactos se resalta la implementación de energías no convencionales, así como la importancia de los recursos minero-energéticos y la calidad y eficiencia en los servicios públicos (Gobierno de Colombia, 2018)
- A través de **la resolución 754 de 2014** se adopta la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los planes de La

gestión integral de residuos sólidos (ministerio de ambiente y desarrollo sostenible y ministerio de vivienda, ciudad y territorio, 2014).

- El **decreto 298** elaborado por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible en 2016, establece el funcionamiento del sistema nacional del cambio climático, en donde hace mención del tema de aprovechamiento de residuos sólidos para la generación de biogás.

7.2 Ambiental / social: Las limitaciones que se encuentran en este punto es referente al impacto al medio ambiente y a la salud. Dentro del aspecto del ambiente, según la información encontrada en el marco teórico se estima que un biodigestor no produce cantidades significativas de GEI, no obstante, se toma consideración, por otra parte, que se requiere del control en el manejo de los residuos orgánicos, sobre todo aquellos provenientes de las plantas, por lo que se requiere de una capacitación previa y definir unos límites respecto al uso de este residuo, para no provocar un deterioro de los ecosistemas con el afán de obtener energía por este medio.

En cuanto a las restricciones sociales, están divididas dos partes, la primera parte es el tema de salud, donde se espera no conllevar a cualquier tipo de afectaciones de salud, debido a por una parte, el tema del manejo del estiércol ya que, si no se realiza de la manera adecuada, se considera como una práctica poco recomendable debido a la generación de microorganismos que pueden llegar a ser focos de enfermedades infecciosas (Tay León, 2017) y por otra parte, el peligro por parte del biodigestor per se, por ser un generador de gas, existe el riesgo de los incendios, explosiones o asfixia. La segunda parte está orientada a prever y mantener la seguridad en todo lo referente con el biodigestor, ya que al estar ubicada en un ambiente con niños se requiere de evitar cualquier incidente que pueda generar afectaciones de algún tipo, con el fin de salvaguardar la integridad de todos los actores implicados en la institución educativa.

7.3 Económico: Es prescindible para el diseño del biodigestor que el monto de su elaboración sea a bajo costo, puesto que esto puede llegar a facilitar la construcción de varios biodigestores que puedan llegar a todos aquellos interesados en la obtención de este teniendo en cuenta que la implementación de estos se pretende hacer en una zona rural.

7.4 Topográfico: Para este factor se limita la aplicación del diseño del biodigestor para excluir aquellas zonas con pendientes demasiado pronunciadas y suelo “débil”, que puedan generar derrumbes o deslizamientos. Estos a su vez deben encontrarse cerca del lugar donde se deberá consumir el gas ya que la presión obtenible no permite el transporte a distancias mayores de 30 metros, por otra parte, debe estar ubicado en un lugar que permita el uso de los residuos o sea de fácil recolección, mantenerse alejado dentro de 10 o 15 metros de una fuente de agua, para evitar contaminaciones y estar ubicado en sitios donde preferentemente sea protegido de vientos fríos (FAO et al., 2011)

8. METODOLOGIA PARA LA SELECCION Y DESARROLLO DEL DISEÑO

8.1 Justificación de la selección del diseño:

Existen muchos tipos de biodigestores, y varios de estos fueron considerados para la realización de este proyecto, es por ello que la elección del tipo del biodigestor parte de las siguientes consideraciones: Facilidad de implementación, costos de elaboración y el mantenimiento.

Se consideran estos factores debido a que al tratarse de una zona rural, es posible que el acceso a este terreno o su implementación impidan de alguna forma la implementación de biodigestores, por otra parte se considera los costos de elaboración, ya que al tratarse de una zona rural, los recursos económicos suelen ser impedimentos al momento de implementar tecnologías complejas o solo por el hecho de poder acceder a estas y finalmente el mantenimiento, ya que los biodigestores al igual que otras cosas se desgastan con el tiempo y

el uso continuo y por lo tanto no perduraran toda la vida, además cabe mencionar las inminentes fallas o afectaciones que hacen de requerir un mantenimiento o reparación.

Teniendo en cuenta lo anterior, la selección se basa en las ventajas y desventaja que puede representar el seleccionar el biodigestor en base a los factores ya mencionados, a continuación, se mencionarán las ventajas y desventajas para mostrar la razón de la selección del biodigestor:

- Biodigestor de globo: tiene la ventaja de tener una fácil construcción, facilidad a la hora de transportarlo y costos bajos, sin embargo, tiene la desventaja de que tiene un tiempo corto de vida y se puede dañar con gran facilidad (Corona Zúñiga, 2007). Teniendo esto en cuenta y sumándole la zona donde será ubicado podemos notar que nuestro mayor inconveniente con este modelo es la facilidad con la que puede ser dañado, la cual no es nada conveniente.
- De domo fijo: tiene como ventaja que los costos de construcción son relativamente bajos, suelen ser resistentes y poseer larga vida útil (FAO, 2019), pero en caso de tener algún daño las pérdidas son bastante significativas y usualmente deben ser supervisados por técnicos experimentados en biogás por lo cual resulta ser poco conveniente (Corona Zúñiga, 2007).
- De tambor flotante: se puede ver el volumen acumulado de gas, la presión del gas es constante, su construcción es relativamente sencilla puesto que cualquier error en la construcción no tendrá mayor inconveniente. Sin embargo, tiene altos costos en la construcción, no tiene un tiempo largo de vida y su mantenimiento puede llegar a ser costoso y complicado (Corona Zúñiga, 2007), lo que lo descarta.

- Biodigestor tubular: Tiene una instalación rápida y los costos dependiendo del material son relativamente bajos y dependiendo de este también va la resistencia la cual en lo preferible debe ser resistente puesto que parte de esta estará a la intemperie, el gas es acumulado en la parte superior y almacena un 25% del volumen total. Puede llegar a tener una baja presión cerca de los 15 cm, sin embargo, colocando sobrepesos en el balón se puede aumentar. Este biodigestor se puede alimentar con todo tipo de materia orgánica que puede ser descompuesta anaeróbicamente con un tiempo de retención que puede variar entre 25 a 50 días. Una ventaja del plástico como material de construcción es que hace que la piel del digestor sea delgada haciendo fácil su calefacción por radiación solar. (García Zabaleta, Álamo Viera y Marcelo Aldana, 2017).

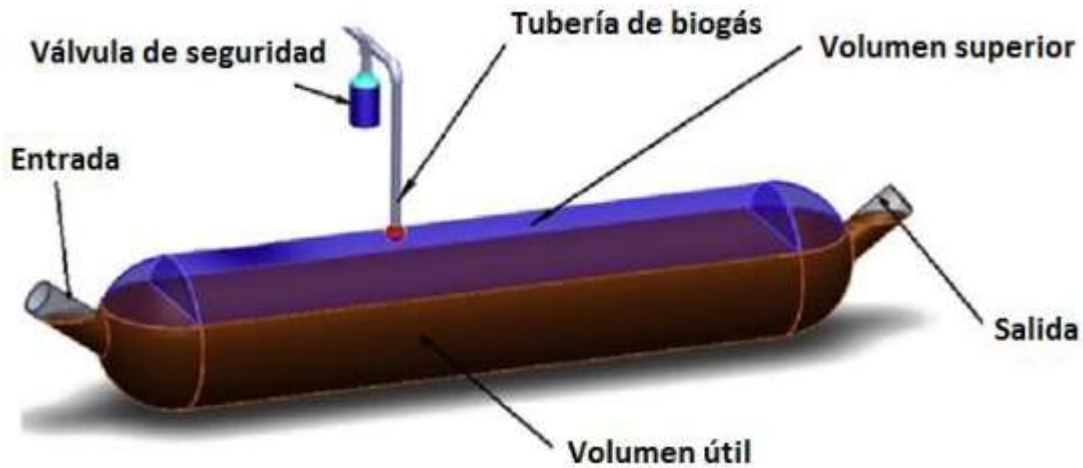
Ante esto la mejor opción la cual se considera es el biodigestor tubular, ya que puede adaptarse a los ambientes rurales, puede hacer uso de diversa materia orgánica, sus costos son accesibles y aunque puede ser menos resistente en comparación con otras opciones, tiene una reparación asequible y sencilla.

8.2 Diseño:

8.2.1 Biodigestor tubular:

Este modelo de biodigestor se alimenta diariamente (Flujo semicontinuo), con una adecuada mezcla de agua y material orgánico. El biodigestor es instalado en una zanja excavada en el suelo que funciona como aislante térmico, con un tubo de ingreso y otro tubo de salida de la materia orgánica; en el centro se le adiciona un tercer tubo que funciona para la salida del biogás. Este biodigestor también cuenta con una válvula de seguridad en el tercer tubo a modo de seguridad en caso de haber problemas con la presión ocasionadas por el exceso de producción de gas.

Gráfica 3. Diagrama esquemático de un biodigestor tubular de plástico de bajo costo



Fuente: (Ferrer, Garfí, Ferrer-Martí y Velo, 2011)

Los componentes con los cuales está conformado el biodigestor tubular, se muestra en la siguiente tabla tomada del artículo “Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región de Piura” de García Zabaleta, Álamo Viera y Marcelo Andana del año 2017.

Tabla 4. Componentes del biodigestor del tipo taiwanés o Tubular

Componente	Descripción	¿Obligatorio?
Reactor	No es más que una “bolsa” de plástico que contendrá toda la materia orgánica que atravesará el proceso de digestión. Suele estar fabricado de Polietileno (PE) o geomembrana de policloruro de vinilo (PVC), que es más sólida y por ende, más cara.	Sí
Tuberías	Son de PVC. Conducen el gas desde el reactor hasta la cocina o algún otro equipo que sirva para comprobar la obtención del biogás.	Sí
Invernadero	También se le conoce como carpa solar y protege al reactor de los daños que suelen ocasionar los rayos UV. Su uso es imprescindible en las regiones frías de la sierra o altiplano para poder elevar la temperatura del reactor y evitar el helamiento de la materia orgánica.	No
Válvulas	Se colocan en varios sitios de las tuberías, siendo la válvula de seguridad la de mayor importancia, ya que garantiza que la presión en el reactor sea más o menos constante. De esta manera, la válvula de seguridad impide que el reactor se dañe cuando el biogás producido no es utilizado durante un cierto tiempo y también, que el aire entre al biodigestor.	Sí
Manómetro	Nos da la posibilidad de poder controlar la producción de biogás.	No
Reservorio	Sirve para almacenar el biogás producido. Debe estar colocado de tal manera que sea fácil darle presión y no tan alejado de la instalación hará uso del biogás.	Sí

8.2.2 Volumen:

Para este proyecto se considera que la mejor opción es la construcción de un biodigestor tubular para el cual se tienen las siguientes consideraciones de diseño, teniendo en cuenta como una de las principales características el volumen de este. Las dimensiones de la zanja donde será ubicado el biodigestor son las que determinarán el volumen final del biodigestor pues al final, el volumen líquido deberá estar contenido en la zanja.

El volumen líquido de un biodigestor será el tiempo de retención multiplicado por la carga diaria. Esto nos estaría indicando cuantos días tardaríamos en llenar el biodigestor con esa cantidad de carga diaria. La ecuación del volumen líquido respecto al tiempo de retención y la carga diaria es la siguiente:

Ecuación 1. volumen líquido del biodigestor

$$V_L = T_R * CD$$

Fuente: (Martí Herrero 2019)

Donde VL es el volumen de líquido, TR el tiempo de retención y CD la carga diaria. Este, el volumen líquido es el volumen que hay que considerar en los cálculos para el tiempo, y no el volumen total. El volumen total del biodigestor será la suma del volumen líquido y volumen del biogás

Ecuación 2. Volumen total del biodigestor

$$V_T = V_L + V_B$$

Fuente: (Martí Herrero, 2019)

En la cual VT es el volumen total, VL el volumen del líquido y VB el volumen del gas. En un biodigestor tubular la circunferencia (C) del cilindro es determinada por la siguiente ecuación.

Ecuación 3. Circunferencia y radio.

$$C = 2 * \pi * r \rightarrow r = \frac{C}{2 * \pi}$$

Fuente: (Martí Herrero, 2019)

Donde C es la circunferencia del plástico y r el radio de la circunferencia del plástico. El diámetro (D) es el doble

Ecuación 4. diámetro del biodigestor

$$D = 2 * r$$

Fuente: (Martí Herrero, 2019)

Siendo D el diámetro y r el radio. Cuando un biodigestor tiene una relación entre su longitud y su diámetro entre 5 y 10 consideramos que tiene forma tubular, siendo así si relación optima de 7,5. Para poder encontrar el volumen de la zanja es necesario conocer el área del trapecio y posteriormente multiplicarlo por la longitud.

Ecuación 5. área de la zanja

$$A_{zanja} = p * \frac{a + b}{2}$$

Fuente: (Martí Herrero, 2019)

Donde Azanja es el área del trapecio de la zanja, p la profundidad, a el ancho inferior y b el ancho superior. Y el volumen de la zanja será determinado por:

Ecuación 6. volumen de la zanja y longitud

$$V_{zanja} = V_L = A_{zanja} * L$$

$$L = \frac{V_L}{A_{zanja}}$$

Fuente: (Martí Herrero 2019)

Siendo V zanja el volumen de la zanja, VL el volumen del líquido, L la longitud de la zanja. Una ecuación a tener en cuenta para la longitud es la relación de longitud con diámetro en la cual, si se encentra entre los valores 5 y 10, se considera como que el biodigestor es de forma tubular,

si la relación sale de dichos valores, tendría los efectos de perder eficiencia en el biodigestor o la acumulación de residuos dentro del biodigestor (Martí Herrero,2019).

Ecuación 7. Relación entre Longitud - Diámetro

$$\frac{L}{D} = [5 \text{ a } 10]$$

La relación optima entre la longitud y el diámetro para un biodigestor será de 7.5 (Martí Herrero,2019). Para poder calcular el perímetro de la zanja es necesario conocer la longitud de las paredes inclinadas del talud, que a nivel geométrico se llama apotema, la cual se calcula con la siguiente ecuación

Ecuación 8. apotema

$$\text{Apotema} = \sqrt{\left(\frac{b-a}{2}\right)^2 + p^2}$$

Fuente: (Martí Herrero, 2019)

El perímetro de la zanja será:

Ecuación 9. Perímetro

$$\text{Perímetro}_{zanja} = a + 2x\text{apotema} + b$$

Fuente: (Martí Herrero, 2019)

De este modo, la circunferencia de plástico debe ser mayor al perímetro.

8.2.3 Relación carbono/nitrógeno:

Para calcular la relación C/N de la mezcla se puede aplicar la siguiente formula (FAO et al., 2011):

Ecuación 10. Relación de carbono/nitrógeno

$$K = \frac{C1 * Q1 + C2 * Q2 + \dots Cn * Qn}{N1 * Q1 + N2 * Q2 + \dots Nn * Qn}$$

En la cual K es la relación carbono/nitrógeno de la mezcla de materias primas, C es el porcentaje de carbono orgánico contenido en cada materia prima, N el porcentaje de nitrógeno orgánico contenido en cada materia prima y Q es el peso fresco de cada materia prima (expresada en kilos o toneladas)

8.2.4 Niveles de solidos totales:

La materia orgánica está compuesta de agua y una fracción sólida llamada solidos totales. El porcentaje de estos solidos totales contenido en la mezcla que se carga al biodigestor es un factor importante a considerar para asegurar que el proceso funcione satisfactoriamente, ya que las bacterias metanogénicas, las cuales permiten la producción de biogás, se ven limitadas a medida que se aumenta el contenido de sólidos y por lo tanto afecta la eficiencia (FAO et al., 2011).

Para este caso que se tiene un biodigestor semicontinuo, se ha demostrado experimentalmente que tienen una capacidad entre 8% a 12% de solidos totales para un buen funcionamiento del proceso (FAO et al., 2011). De lo anterior se ha planteado una ecuación para calcular la relación entre el agua necesaria para diluir una cantidad de solidos totales a una carga determinada:

Ecuación 11. Porcentaje de solidos totales diluidos

$$\% S.T. (carga diluida) = \frac{kg\ materia\ organica * \% S.T.}{kg\ materia\ organica + agua\ agregada}$$

8.2.5 Producción de energía:

El biogás está conformado principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), además de otros como vapor de agua, sulfuro de hidrogeno e hidrogeno; el porcentaje de metano en el biogás puede variar desde un mínimo de 55% - 60% hasta un máximo del 80%, por lo que el contenido energético del biogás depende principalmente de la cantidad de metano en su composición (Moncayo Romero, 2013).

Para estimar la producción de biogás en un biodigestor, es la productividad de metano o “productividad metanoica”, la cual se define como la cantidad de metano generado en la unidad de tiempo respecto a la materia dispuesta en el reactor (Rivas Olano, Faith Vargas y Guillén Watson, 2010). La expresión matemática que permite calcular la productividad de metano de un resto orgánico en un tiempo dado es la siguiente (Sogari, 2003):

Ecuación 12. Productividad metanoica

$$P_{CH_4} = \frac{V_{CH_4}}{V_{reactor} * t}$$

En donde V_{CH₄} es el volumen de metano generado, V_{Reactor} el volumen del recinto fermentador y t es el tiempo de retención. No obstante, la producción de metano tiene un límite que depende de la naturaleza de la materia dispuesta en el biodigestor. La fórmula que permite la máxima generación de metano para un producto determinado es la siguiente (Sogari, 2003):

Ecuación 13. Máxima generación de generación de metano

$$M_{Max} = \frac{V_{CH_4}}{S_{org_total}}$$

Donde V_{CH₄} es el volumen de metano generado y S_{org_total} es la cantidad de total de materia orgánica utilizada en todo el proceso.

El contenido energético del biogás se encuentra entre 5 a 7 kW h m⁻³ (Moncayo Romero, 2013; Deublein y Steinhauser, 2008), no obstante, en la literatura estos rangos varían,

por lo que a ciencia cierta no es posible establecer un rango determinado (Arrieta-Palacios, 2016), ante esto, el desarrollo se planteará en base a la relación mencionada en el informe “*Biodigestores tubulares: Guía de diseño y manual de instalación*” de Jaime Martí Herrero del año 2019, en la cual establecía que para cada 1000 litros de biogás se producía una cantidad energética de 6.56 KWh bajo una producción de metano del 65%.

8.3 Costos:

Según (Hilbert y Eppel, 2007) existen factores que se deben tener en cuenta al realizar la evaluación económica de la implementación de esta tecnología, pues pueden resultar limitantes en muchos lugares. Estos son:

- Recolección de las materias primas, transporte y acondicionamiento.
- Almacenamiento del biogás, transporte y uso
- Almacenamiento del efluente, transporte y uso

Para efectos de este estudio se dividió los costos en directos e indirectos, dentro de las cuales se dividen en: materiales, mano de obra, herramientas y adiciones. Por otra parte, para el cálculo de que tan rentable puede llegar a ser, se requiere del valor de la ganancia y la inversión, la ganancia se obtiene a partir de la cantidad energética del biogás en kWh por el precio de venta de servicios, mientras que la inversión se obtiene a partir de los costos del proyecto.

9. ANALISIS Y RESULTADOS

9.1 Análisis y resultados de diseño:

Para empezar, se requiere de establecer primeramente la cantidad de energía necesaria para suplir con la demanda energética según lo estilado en las especificaciones técnicas, para ello se toman los datos de la línea base y se multiplica por el área del sitio de

implementación. A posteriori se establece la conversión de la capacidad eléctrica del biogás pasado de kWh/h a kWh/año.

Tabla 5. cálculo de kilowatts por año.

Frio	Templado
$40 \frac{kWh}{m^2 * año} * 6135 m^2 = 245400 \frac{kWh}{año}$	$44 \frac{kWh}{m^2 * año} * 6135 m^2 = 269940 \frac{kWh}{año}$

Si se toma como base de cálculo 1 hora, se obtiene que el consumo energético a partir de la conversión de año a h lo siguiente:

Tabla 6. Conversión

Frio	$245400 \frac{kWh}{año} * \frac{1 año}{365 días} * \frac{1 día}{24 horas} = 28.0137 \frac{kWh}{h}$
Templado	$269940 \frac{kWh}{año} * \frac{1 año}{365 días} * \frac{1 día}{24 horas} = 30.8150 \frac{kWh}{h}$

A continuación, se busca la cantidad de biogás necesaria a partir de la relación establecida en el apartado de diseño en el punto de producción de energía:

Tabla 7. Cantidad de biogás necesario

Frio	Templado
$28.0137 \frac{kWh}{h} * \frac{1 m^3 biogas}{6.56 kWh} = 4.2704 \frac{m^3}{h}$	$30.8150 \frac{kWh}{h} * \frac{1 m^3 biogas}{6.56 kWh} = 4.6974 \frac{m^3}{h}$

De acuerdo a lo resultados, se concluye que la cantidad necesaria para suplir con la demanda energética, se requiere de una producción de biogás cerca de los 4300 metros cúbicos por hora, asumiendo que esta producción se mantiene de manera constante.

Por otro lado, el diseño del biodigestor se basó principalmente en la facilidad del acceso a materiales para su construcción. En ese orden de ideas, se parte de la ecuación 3, ya que se considera el uso de circunferencias de plásticos de 4 metros por ser la presentación más típica de plásticos de invernadero que se puede encontrar en Latinoamérica (Martí Herrera, 2019; Díaz Salazar y Torres Cortes, 2019), a partir de esto se calcula el radio, el diámetro y la longitud, teniendo en cuenta la relación óptima entre longitud y diámetro.

Ecuación 14. Cálculo del radio

$$r = \frac{C}{2 * \pi} = \frac{4}{2 * \pi} = 0.6366 \text{ m}$$

Ecuación 15. Cálculo de la longitud

$$\frac{L}{D} = 7.5 \rightarrow L = 7.5 * D \rightarrow L = 7.5 * (2 * r) \rightarrow L = 7.5 * 2 * 0.6366$$

$$L = 9.549 \text{ m}$$

A partir de esto se puede calcular el volumen del biodigestor, asumiendo que se plantea que el biodigestor mantiene su forma cilíndrica constante.

Ecuación 16. Cálculo del volumen del biodigestor

$$V = \pi * r^2 * L = \pi * (0.6366^2) * 9.549 = 12.1574 \text{ m}^3$$

Posteriormente para determinar el volumen de líquido contenido dentro del biodigestor, se requiere encontrar primero el área de la zanja, para ello dependiendo del grado de inclinación (α) de las paredes de la zanja donde será implementado el biodigestor, se determinan los parámetros óptimos a, b y p de la ecuación 5. Existen 3 casos para el grado de

inclinación, para suelos sueltos o arenosos se utiliza grados entre 30° a 45° respecto a la vertical, para suelos más “duros” se utilizan grados entre 7.5° a 30° y el tercer caso de 0 grados. Para efectos de este estudio se utilizan los siguientes 3 grados: 0°, 15° y 45°. En la tabla 6 se muestran los datos de los parámetros a, b y p, aplicable para cualquier radio de circunferencia, según Martí Herrero (2019):

Tabla 8. parámetros a, b y p, para cualquier radio de circunferencia

α (°) Desde la vertical	a (m)	b (m)	p (m)
0°	1.34 * r	1.34 * r	1.57*r
15°	1.02 * r	1.82 * r	1.49 * r
45°	0.43 * r	2.57 * r	1.07 * r

Tabla 9. Valores de los parámetros a, b y p

α (°) Desde la vertical	a (m)	b (m)	p (m)
0°	0.8530	0.8530	0.9994
15°	0.6493	1.1586	0.9485
45°	0.2737	1.6360	0.6811

A partir de los parámetros se calcula el valor del área de la zanja mediante la ecuación 5:

Tabla 10. Área de la zanja

	$A_{zanja} = p * \frac{a + b}{2}$
--	-----------------------------------

0°	$A_{zanja} = 0.9994 * \frac{0.8530 + 0.8530}{2} = 0.9994 * 0.8530 = 0.8524 m^2$
15°	$A_{zanja} = 0.9485 * \frac{0.6493 + 1.1586}{2} = 0.9485 * 0.9039 = 0.8549 m^2$
45°	$A_{zanja} = 0.6811 * \frac{0.2737 + 1.6360}{2} = 0.6811 * 0.9548 = 0.6503 m^2$

Una vez con los valores del área de la zanja se obtiene los valores del volumen del líquido mediante la ecuación 6.

Tabla 11. Volumen del líquido

	$V_{zanja} = V_L = A_{zanja} * L$
0°	$V_L = 0.8524 * 9.549 = 8.1395 m^3$
15°	$V_L = 0.8549 * 9.549 = 8.1634 m^3$
45°	$V_L = 0.6503 * 9.549 = 6.2097 m^3$

A partir del volumen del líquido se puede estimar la carga diaria al biodigestor a partir de la ecuación 1, para ello se asume 2 casos, como ya se ha estipulado con anterioridad, el biodigestor trabajara bajo dos condiciones de temperatura y, por lo tanto, también tiempos de retención.

Tabla 12. Cálculo de la carga diaria del biodigestor

$V_L = T_R * CD \rightarrow \frac{V_L}{T_R} = CD$	
Termofílica	Mesofílica
13 días	45 días

0°	$CD = \frac{V_L}{T_R} = \frac{8.1395}{13} = 0.6261 \frac{m^3}{dia}$	$CD = \frac{V_L}{T_R} = \frac{8.1395}{45} = 0.1808 \frac{m^3}{dia}$
15°	$CD = \frac{V_L}{T_R} = \frac{8.1634}{13} = 0.6279 \frac{m^3}{dia}$	$CD = \frac{V_L}{T_R} = \frac{8.1634}{45} = 0.1814 \frac{m^3}{dia}$
45°	$CD = \frac{V_L}{T_R} = \frac{8.2097}{13} = 0.6315 \frac{m^3}{dia}$	$CD = \frac{V_L}{T_R} = \frac{8.2097}{45} = 0.1824 \frac{m^3}{dia}$

El tiempo de retención fue tomado a partir del promedio del rango de días de retención según el tipo. Ahora bien, para determinar exactamente la cantidad de kilogramos de materia prima o contenido orgánico que se debe ingresar al biodigestor, se requiere de establecer una materia prima. Como ya se mencionó en apartados anteriores, bien puede ser en base a un solo tipo de residuo orgánico o una mezcla de diferentes tipos (en ese caso se requiere de conocer el porcentaje de cada compuesto en la mezcla). Para efectos de este estudio se consideran 3 casos, las cuales son: Uso de solamente de estiércoles, uso de la combinación entre estiércol y un residuo vegetal, finalmente el uso netamente de residuos vegetales.

La selección de los residuos se basó netamente en su porcentaje de relación carbono/nitrógeno y en este caso se considera que se encuentre entre las relaciones de 20:1 a 30:1, aunque con tendencia hacia esta última relación. En la siguiente tabla se muestra los valores de producción de biogás respecto a la materia prima

Tabla 13. Residuos orgánicos y su producción de biogás

Residuos orgánicos	Relación Carbono/Nitrógeno	Producción de biogás
Estiércol Bovino	25:1	$0.04 \frac{m^3}{kg}$

Leguminosas (Habas)	29:1	$608 \frac{m^3}{Ton}$
Estiércol de aves con papas	Estiércol de ave: 19:1 Tomate: 20:1	Estiércol de ave: $0.08 \frac{m^3}{kg}$ Tomate: $606 \frac{m^3}{Ton}$

Fuente: Varnero y Arellano, 1991

Tabla 14. Reorganizando datos de los residuos y su producción de biogás

Residuos orgánicos	Relación Carbono/Nitrógeno	Producción de biogás
Estiércol Bovino	25:1	$0.04 \frac{m^3}{kg}$
Leguminosas (Habas)	29:1	$608 \frac{m^3}{Ton} * \frac{1 Ton}{1000 kg} = 0.608 \frac{m^3}{kg}$
Estiércol de aves con papa	39:2	Promedio estimado: $\frac{\left(0.08 \frac{m^3}{kg} + \left(608 \frac{m^3}{Ton} * \frac{1 Ton}{1000 kg}\right)\right)}{2}$ $= 0.344 \frac{m^3}{kg}$

A partir de los residuos orgánicos escogidos se calcula la cantidad de materia prima que se carga al biodigestor y posteriormente se calcula la cantidad de biogás que produce dicha cantidad. Ahora que se ha estipulado la materia prima, se determina la cantidad que se requiere a partir de las densidades de los componentes, posteriormente utilizando la carga se calcula la cantidad de biogás producido.

Tabla 15. Densidad de la materia prima

	Densidad
Estiércol Bovino	$\rho = \frac{998}{1 - (0.00345 * TS)} = \frac{998}{0.9997} = 998.2994 \frac{kg}{m^3}$
Leguminosas (Habas)	$\rho = 0.971 \frac{g}{ml} = 971 \frac{kg}{m^3}$
Estiércol de aves con papa	$\rho = \frac{\left(1113.01 \frac{kg}{m^3} + 450 \frac{kg}{m^3}\right)}{2} = 781.505 \frac{kg}{m^3}$

La estimación de la densidad del estiércol bovino fue tomada del artículo “*Thermal properties of beef cattle manure*” realizado por Chen en 1987, donde TS es el porcentaje de sólidos totales, en este estudio se asumió que el estiércol bovino posee un porcentaje de sólidos totales recomendada del 8% (FAO et al., 2011; Wang et al., 2019).

Por otra parte, la densidad de la papa fue tomada a partir de los datos registrados por Buitrago, López, Coronado y Osorno, en su artículo del 2004, “Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia”, en la cual se evidencia 3 tipos de papa en Colombia, para efectos de este estudio se tomó la densidad real de la papa criolla equivalente a 1113.01 kg/m³, mientras que la densidad del estiércol de ave (450 kg/m³) fue tomado del libro “*Sustainable industrial design and waste management: Cradle-to-cradle for sustainable development*” de Salah El-Haggag del año 2007.

Finalmente, la densidad de las habas, fue tomada como referencia del artículo “*Determination of the physical properties of fermented and dried venezuelan Trinitrio cocoa beans (teobroma cacao L.)*” de Sandoval, Barreiro, De Sousa, Valera y Müller, del año 2019.

Tabla 16. Cantidad de biogás en kg producido al día

	Termofílica	Mesofílica
Estiércol Bovino		
0°	$m = 998.2994 * 0.6261 = 625.0352 \frac{kg}{dia}$	$m = 998.2994 * 0.1808 = 180.4925 \frac{kg}{dia}$
15°	$m = 998.2994 * 0.6279 = 626.8322 \frac{kg}{dia}$	$m = 998.2994 * 0.1814 = 181.0915 \frac{kg}{dia}$
45°	$m = 998.2994 * 0.6315 = 630.4260 \frac{kg}{dia}$	$m = 998.2994 * 0.1824 = 182.0898 \frac{kg}{dia}$
Legumbres (Habas)		
0°	$m = 971 * 0.6261 = 607.9431 \frac{kg}{dia}$	$m = 971 * 0.1808 = 175.5568 \frac{kg}{dia}$
15°	$m = 971 * 0.6279 = 609.6909 \frac{kg}{dia}$	$m = 971 * 0.1814 = 176.1394 \frac{kg}{dia}$
46°	$m = 971 * 0.6315 = 613.1865 \frac{kg}{dia}$	$m = 971 * 0.1824 = 177.1104 \frac{kg}{dia}$
Estiércol de ave con papa		
0°	$m = 781.505 * 0.6261 = 489.3002 \frac{kg}{dia}$	$m = 781.505 * 0.1808 = 141.2961 \frac{kg}{dia}$
15°	$m = 781.505 * 0.6279 = 490.707 \frac{kg}{dia}$	$m = 781.505 * 0.1814 = 141.7650 \frac{kg}{dia}$
45°	$m = 781.505 * 0.6315 = 493.5204 \frac{kg}{dia}$	$m = 781.505 * 0.1824 = 142.5465 \frac{kg}{dia}$

Tabla 17. producción de biogás en volumen por día

	Termofílica	Mesofílica
Estiércol Bovino		
0°	$B = 625.0352 * 0.04 = 25.0014 \frac{m^3}{dia}$	$B = 180.4925 * 0.04 = 7.2197 \frac{m^3}{dia}$
15°	$B = 626.8322 * 0.04 = 25.0733 \frac{m^3}{dia}$	$B = 181.0915 * 0.04 = 7.2436 \frac{m^3}{dia}$
45°	$B = 630.4260 * 0.04 = 25.2170 \frac{m^3}{dia}$	$B = 182.0898 * 0.04 = 7.2836 \frac{m^3}{dia}$
Legumbres (Habas)		
0°	$B = 607.9431 * 0.608 = 369.6294 \frac{m^3}{dia}$	$B = 175.5568 * 0.608 = 106.7385 \frac{m^3}{dia}$
15°	$B = 609.6909 * 0.608 = 370.6920 \frac{m^3}{dia}$	$B = 176.1394 * 0.608 = 107.0927 \frac{m^3}{dia}$
46°	$B = 613.1865 * 0.608 = 372.8174 \frac{m^3}{dia}$	$B = 177.1104 * 0.608 = 107.6831 \frac{m^3}{dia}$
Estiércol de ave con papa		
0°	$B = 489.3002 * 0.344 = 168.3192 \frac{m^3}{dia}$	$B = 141.2961 * 0.344 = 48.6058 \frac{m^3}{dia}$
15°	$B = 490.707 * 0.344 = 168.8032 \frac{m^3}{dia}$	$B = 141.7650 * 0.344 = 48.7671 \frac{m^3}{dia}$
45°	$B = 493.5204 * 0.344 = 169.7710 \frac{m^3}{dia}$	$B = 142.5465 * 0.344 = 49.036 \frac{m^3}{dia}$

Tabla 18. Conversión del biogás de día a hora

	Termofílica	Mesofílica
Estiércol Bovino		
0°	$B = 25.0014 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 1.0417 \frac{m^3}{h}$	$B = 7.2197 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 0.3008 \frac{m^3}{h}$
15°	$B = 25.0733 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 1.0447 \frac{m^3}{h}$	$B = 7.2436 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 0.3018 \frac{m^3}{h}$
45°	$B = 25.2170 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 1.0507 \frac{m^3}{h}$	$B = 7.2836 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 0.3018 \frac{m^3}{h}$
Legumbres (Habas)		
0°	$B = 369.6294 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 15.4012 \frac{m^3}{h}$	$B = 106.7385 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 4.4474 \frac{m^3}{h}$
15°	$B = 370.6920 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 15.4455 \frac{m^3}{h}$	$B = 107.0927 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 4.4622 \frac{m^3}{h}$
46°	$B = 372.8174 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 15.5340 \frac{m^3}{h}$	$B = 107.6831 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 4.4868 \frac{m^3}{h}$
Estiércol de ave con papa		
0°	$B = 168.3192 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 7.0133 \frac{m^3}{h}$	$B = 48.6058 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 2.0252 \frac{m^3}{h}$
15°	$B = 168.8032 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 7.0334 \frac{m^3}{h}$	$B = 48.7671 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 2.032 \frac{m^3}{h}$
45°	$B = 169.7710 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 7.0738 \frac{m^3}{h}$	$B = 49.036 \frac{m^3}{dia} * \frac{1 dia}{24 h} = 2.0431 \frac{m^3}{h}$

A partir de los resultados obtenidos, se ha encontrado que existen dos casos en los cuales puede suplir con la demanda energética, en donde son las habas y la mezcla de estiércol con papa bajo el tipo termofílico, por otra parte, hay que destacar el caso de las habas en el tipo de mesofílica ya que suple las demandas energéticas de un clima frío, pero a falta de poco no cumple con la producción necesaria para un clima templado.

Al contrario de los casos anteriores se ha encontrado que no suplen las demandas energéticas, no obstante, teniendo en cuenta que solo se ha planteado 1 solo biodigestor, existe la posibilidad que las demandas energéticas puedan ser suplidas mediante la instalación de más biodigestores (claro que hay que tener en alta consideración la posibilidad de poder realizar esta acción considerando los diferentes factores como el económico o los términos de espacio, etc.).

El desarrollo de este estudio se basó completamente en el acceso al polietileno con un valor de circunferencia común en el mercado, pero también pudo haberse desarrollado en base a la demanda energética, en ese caso el diseño del biodigestor cambiaría completamente, utilizando diferentes tamaños, tiempos de retención y carga diaria.

9.2 Análisis y resultados de costos:

El análisis de resultados y costos es la identificación de los recursos necesarios para llevar a cabo el proceso de identificación de los recursos necesarios para realizar el biodigestor con todos los parámetros de calidad, seguridad y fiabilidad.

9.2.1 Inversión:

9.2.1.1 Costos directos:

Tabla 19. Materiales y presupuesto estimado para la construcción del biodigestor tubular

Materiales y presupuesto estimado para la construcción del biodigestor tubular

Partes del biodigestor	Materiales	unidad	Precio
Reactor	Polietileno (PE) 3 Metros X 4 Metros	1	\$32,900 UND
Tuberías del biogás	Tubos PVC 1/2" X 6 Metros 9-500 PSI	1	\$16,900 UND
Tuberías del biogás	Codos de PVC 1/2"	10	\$700 UND
Mangueras	Manguera de PVC 16 mm diámetro interno, 1.6mm grosor, 10 metros	2	\$10,000 UND
Válvulas	Válvulas 1/2 gas mariposa	2	\$14,900 UND
manómetro	Manómetro 0-200 PSI 2.5 pg	1	\$64,900 UND
Reservorio	geomembrana de baja densidad	2	\$281,000 UND
Motobomba	EFCO 1 1/2" X 1/2"	1	\$1'150,000 UND
Válvulas dosificadoras	730 x 410 x 130 mm 8.0kg.	1	\$150,000 UND
Filtro desulfurador para planta familiar	BIORECOL filtro 1"	2	\$15,000 UND
Filtro deshidratador de agua	EK 1/2 "	2	\$34,000 UND
Generador eléctrico de biogás	Gas generator 5kWh	1	\$3.163.087 UND
Estufa de biogás X2 fogones	730 x 410 x 130 mm 8.0kg.	1	\$550,000 UND
TOTAL:			\$ 5'493,387

Fuente: Elaboración propia

Los precios de los materiales para la construcción del biodigestor fueron consultados en construcción y ferretería Homecenter, ferreterías y herrerías.

9.2.1.2 costo de la mano de obra:

Tabla 20. Preparación del terreno para la instalación del biodigestor

Preparación del terreno para la instalación del biodigestor		
Actividad	días	precio
Limpieza del terreno	2	\$80,000
Excavación del terreno	2	\$80,000
preparación del terreno	3	\$120,000
fraguado	15	\$250,000
transporte del material	x	\$150,000
Instalación	3	\$255,000
		TOTAL: \$ 935,000

Fuente: Elaboración propia

9.2.1.3 costos indirectos:

Este tipo de costos son diferentes a los materiales directos, que son los necesarios para construir el biodigestor y la mano de obra directa que es la que interviene en el desarrollo y construcción del biodigestor.

Tabla 21. Presupuesto de herramientas necesarias para la instalación del biodigestor

Presupuesto de herramientas necesarias para la instalación del biodigestor		
Material	Cantidad	precio
Pala punta de huevo #4	2	\$34,900 UND
Flexómetro de 5 Metros 3/4 " 19mm	2	\$5,900 UND

Segueta de 12"	1	\$25,900 UND
Llave Estilson Nro.10	1	\$65,000 UND
Selladora de plástico manual	1	\$120,000 UND
	TOTAL	\$ 292,500

9.2.1.4 Materiales adicionales:

Tabla 22. Materiales adicionales que no tienen un costo específico

Materiales adicionales que no tienen un costo específico	
material	uso
Paja o Arena	para el fondo de la zanja
Sacos y/o plásticos viejos	para las paredes de la zanja
Lana de acero	Para las válvulas de seguridad
Alambre de amarre	Para fijar las tuberías de entrada y salida

9.2.1.5 Costo total del proyecto:

Tabla 23. Costo total del proyecto

Costo total del proyecto	
Descripción	precio
costos directos	5´493,387
costos indirectos	295,500
costos de la mano de obra	935,000
TOTAL	\$6,723,887

9.2.2 Rentabilidad:

Teniendo en cuenta lo mencionado en los apartados anteriores para calcular la rentabilidad del proyecto se requiere de la necesidad de inversión y el valor de la ganancia, definiendo en términos de porcentaje de la siguiente forma:

Ecuación 17. Ecuación de rentabilidad

$$Rentabilidad = \left(\frac{ganancias}{inversión} \right) * 100$$

Siendo en este a mayor porcentaje mayor rentabilidad, por otra parte, las ganancias se calculan a partir de lo siguiente:

Ecuación 18. Ecuación de ganancias

$$Ganacias = cantidad\ biogás * precio\ de\ venta\ de\ servi.$$

En este caso el precio de venta de servicio se toma de la literatura con un valor de 0.15 dólares por año, tomado de “Estudio de pre factibilidad para el aprovechamiento del biogás con fines energéticos a partir del estiércol de ganado bovino en la Unidad de Ganado Lechero de Zamorano, Honduras” de Medina Izaguirre y Luna vega en 2009, por lo tanto, convirtiendo la cantidad de biogás obtenido al año y posteriormente, la ganancia.

Tabla 24. Conversión del biogás producido de hora a año

	Termofílica	Mesofílica
Estiércol Bovino		
0°	9125.292 $\frac{m^3}{año}$	2635.1905 $\frac{m^3}{año}$
15°	9151.7545 $\frac{m^3}{año}$	2643.914 $\frac{m^3}{año}$

45°	$9204.205 \frac{m^3}{año}$	$2658.514 \frac{m^3}{año}$
Legumbres (Habas)		
0°	$134914.731 \frac{m^3}{año}$	$38959.5525 \frac{m^3}{año}$
15°	$135302.58 \frac{m^3}{año}$	$39088.8355 \frac{m^3}{año}$
46°	$136078.351 \frac{m^3}{año}$	$39304.3315 \frac{m^3}{año}$
Estiércol de ave con papa		
0°	$61436.508 \frac{m^3}{año}$	$17741.117 \frac{m^3}{año}$
15°	$61613.168 \frac{m^3}{año}$	$17799.9915 \frac{m^3}{año}$
45°	$61966.415 \frac{m^3}{año}$	$17898.14 \frac{m^3}{año}$

Tabla 25. Conversión del biogás producido de metro cubico a kilowatts

	Termofílica	Mesofílica
Estiércol Bovino		
0°	$9125.292 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas} = 59861.6155 \frac{kWh}{año}$	$2635.1905 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 17286.8497 \frac{kWh}{año}$

15°	$9151.7545 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 60035.5095 \frac{kWh}{año}$	$2643.914 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas} = 17344.0758$
45°	$9204.205 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 60379.5848 \frac{kWh}{año}$	$2658.514 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 17439.8518 \frac{kWh}{año}$
Legumbres (Habas)		
0°	$134914.731 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 885040.6354 \frac{kWh}{año}$	$38959.5525 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 255574.6644 \frac{kWh}{año}$
15°	$135302.58 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 887584.9248 \frac{kWh}{año}$	$39088.8355 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 256422.7609 \frac{kWh}{año}$
46°	$136078.351 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 892673.9826 \frac{kWh}{año}$	$39304.3315 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 257836.4146 \frac{kWh}{año}$
Estiércol de ave con papa		
0°	$61436.508 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 403023.4925 \frac{kWh}{año}$	$17741.117 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 116381.7275 \frac{kWh}{año}$

15°	$61613.168 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 404202.0621 \frac{kWh}{año}$	$17799.9915 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 116767.9442 \frac{kWh}{año}$
45°	$61966.415 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 406499.6824 \frac{kWh}{año}$	$17898.14 \frac{m^3}{año} * \frac{6.56 kWh}{1 m^3 biogas}$ $= 117411.7984 \frac{kWh}{año}$

Tabla 26. Cálculo de las ganancias

	Termofílica	Mesofílica
Estiércol Bovino		
0°	$59861.6155 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh} = 8979.2423 \frac{USD}{año}$	$17286.8497 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 2593.0274 \frac{USD}{año}$
15°	$60035.5095 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh} = 9005.3264 \frac{USD}{año}$	$17344.0758 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 2601.6113 \frac{USD}{año}$
45°	$60379.5848 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh} = 9056.9377 \frac{USD}{año}$	$17439.8518 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 2615.9777 \frac{USD}{año}$
Legumbres (habas)		

0°	$885040.6354 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 132756.0953 \frac{USD}{año}$	$255574.6644 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 38336.1996 \frac{USD}{año}$
15°	$887584.9248 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 133137.7387 \frac{USD}{año}$	$256422.7609 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 38463.4141 \frac{USD}{año}$
46°	$892673.9826 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 133901.0974 \frac{USD}{año}$	$257836.4146 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 38675.4622 \frac{USD}{año}$
Estiércol de ave con papa		
0°	$403023.4925 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 60453.5239 \frac{USD}{año}$	$116381.7275 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 17457.2591 \frac{USD}{año}$
15°	$404202.0621 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 60630.3093 \frac{USD}{año}$	$116767.9442 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 17515.1916 \frac{USD}{año}$
45°	$406499.6824 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 60974.9523 \frac{USD}{año}$	$117411.7984 \frac{kWh}{año} * 0.15 \frac{USD}{kWh}$ $= 17611.7697 \frac{USD}{año}$

Una vez obtenido los resultados de las ganancias se procede a utilizar la ecuación x, donde se hace la conversión del peso colombiano a dólares y una base de cálculo de 1 año

para la consistencia dimensional y posteriormente determinar la rentabilidad para cada tipo de residuo y un grado de inclinación específico:

Tabla 27. Cálculo de la rentabilidad

	Termofílica	Mesofílica
Estiércol Bovino		
0°	$\frac{8979.2423}{1722.75} * 100\% = 521.2156\%$	$\frac{2593.0274}{1722.75} = 150.516 \%$
15°	$\frac{9005.3264}{1722.75} * 100\% = 522.73\%$	$\frac{2601.6113}{1722.75} * 100\% = 151.015\%$
45°	$\frac{9056.9377}{1722.75} * 100\% = 525.7256\%$	$\frac{2615.9777}{1722.75} * 100\% = 151.849\%$
Legumbres (habas)		
0°	$\frac{132756.0953}{1722.75} * 100\% = 7706.057 \%$	$\frac{38336.1996}{1722.75} * 100\% = 2225.291\%$
15°	$\frac{133137.7387}{1722.75} * 100\% = 7728.210 \%$	$\frac{38463.4141}{1722.75} * 100\% = 2232.6753\%$
46°	$\frac{133901.0974}{1722.75} * 100\% = 7772.5205\%$	$\frac{38675.4622}{1722.75} * 100\% = 2244.9840\%$
Estiércol de ave con papa		
0°	$\frac{60453.5239}{1722.75} * 100\% = 3509.1292\%$	$\frac{17457.2591}{1722.75} * 100\% = 1013.3367\%$
15°	$\frac{60630.3093}{1722.75} * 100\% = 3519.3910\%$	$\frac{17515.1916}{1722.75} * 100\% = 1016.7\%$

45°	$\frac{60974.9523}{1722.75} * 100\% = 3539.3964\%$	$\frac{17611.7697}{1722.75} * 100\% = 1022.3056\%$
-----	--	--

De lo anterior, se determina que la rentabilidad es más eficiente en el uso de biodigestores en términos termofílicas, pero cabe mencionar que el uso continuo de este rango de temperatura, genera un deterioro del biodigestor y por lo tanto puede llegar a generar un gasto en mantenimiento o realizar nuevamente el biodigestor, lo cual conllevaría a generar más gastos y por lo tanto la rentabilidad puede llegar a disminuir drásticamente. Por otra parte, los resultados demuestran que existe una mayor rentabilidad sobre el uso de los residuos orgánicos, seguido de la combinación del estiércol con el residuo orgánico.

Para finalizar estos resultados están basados en los materiales mínimos e idealistas para el cálculo de la inversión y, por ende, es posible que el valor de la inversión sea mayor, haciendo que en general la rentabilidad disminuya bastante. Por otro lado, el cálculo de las ganancias fue basado en el valor de préstamos de servicios tomado de la literatura, además de no incluirse las ganancias que se podrían generar en base al uso de los fertilizantes, lo cual nos deja en síntesis una rentabilidad teórica, que requiere de un planteamiento más detallado en cuanto a la parte financiera del proyecto.

10. CONCLUSIONES

- El biodigestor surge como una alternativa aceptable en la producción de energía y la reutilización de residuos, sin embargo, existen tantas variedades de biodigestores, que ocasiona el considerar diferentes factores a la hora de la selección del biodigestor, con el fin de obtener los óptimos resultados.
- Durante el diseño del biodigestor, se basó en un caso idealizado que podría estar en un ambiente rural, sin embargo, se requiere de un planteamiento más específico y

detallado, sobre todo su aplicación en un caso real, ya que el acceso a las materias primas es un factor importante a la hora del diseño, así como la demanda energética, de ahí se desprende que el área de la institución educativa tomada, puede ser diferente en un caso real y, por lo tanto, la necesidad energética puede llegar a ser mayor o menor.

- Se recomienda probar diferentes materias primas u otros métodos de diseño, analizando y expandiendo diferentes perspectivas, con el propósito de plantear diferentes opciones de aplicación de biodigestores y experimentar diferentes opciones de diseño para su aplicación a una institución de educación rural.
- Teniendo en cuenta los gastos planteados para la construcción de un biodigestor y el promedio general que el estado invierte en una escuela rural, podríamos optar por la opción de conseguir un patrocinio por parte del gobierno para la construcción y funcionamiento de este el cual llegaría a ser beneficioso para múltiples involucrados en un tiempo relativamente corto.
- Los resultados del estudio están divididos, por una parte, se encontró que las materias primas del estiércol de ave con papa y las habas, suplen la demanda energética estipulada, solamente bajo condiciones termofílicas, mientras que el resto de las opciones se encuentran entre la cobertura bajo el clima de menor demanda energética o directamente no cumplen ninguna. Por lo tanto, el uso de materias primas y la temperatura es un factor imprescindible a la hora de establecer un biodigestor en base a una producción de determinada de energía.
- Los biodigestores son una oportunidad, una herramienta para aportar a un cambio profundo en el manejo de los residuos orgánicos, ya que estos sistemas no sólo ‘tratan’ estos residuos, y ayudan al reciclaje de nutrientes por medio del uso del fertilizante producido, sino que además ofrecen un aprovechamiento energético ‘por medio de la captura y uso del biogás generado.

- Los biodigestores representan una fuente de beneficios económicos, ambientales y sociales. Dentro de los cuales podemos resaltar que el biogás producido, permite satisfacer ciertas necesidades energéticas en las instituciones educativas, manteniendo así, una reserva dentro del sistema.
- El costo total del proyecto puede ser reducido si se realiza una construcción directa. Lo cual impulsaría aún más la implantación de biodigestores en los sectores educativos del país.
- El proyecto parece indicar que posee alta rentabilidad sobre todo en los rangos de temperatura termofílicos, pero cabe agregar la degradación del biodigestor debido a las condiciones extremas de este rango, lo cual puede hacer que disminuya su rentabilidad.
- Tanto de la necesidad de financiación y el valor de sus ganancias, son predicciones hechas en base a datos tomados de la literatura y por lo tanto no puede considerarse un valor real a los valores obtenidos, por lo cual, se requiere de un planteamiento más detallado y bajo un panorama más amplio, con el fin de cubrir todas las aristas no vistas en este estudio.

REFERENCIAS

Acosta Pabuena, M. y Pasqualino, J. (2014). Potencial de Uso de Biogás en Colombia. *Revista TEKNOS*, 14 (2), 27–33. Recuperado el 5 de septiembre de 2021, de Dialnet.

Aguilar, F. X. y Botero Botero, R. (s.f.). Estimación de los beneficios económicos totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo. Recuperado de: <http://usi.earth.ac.cr/glas/sp/50000030.pdf>

Aguilar Balam, K., Ek Yam, G. Y., Alamilla Morejón, P. A. y Rodríguez Pech, J. (2019).

Desigualdades estructurales en el vínculo entre escuela y comunidad rural: Tres casos de abandono escolar. *Perspectiva educacional. Formación de profesores*, 58 (2), 98–120.

Doi: <http://dx.doi.org/10.4151/07189729-Vol.58-Iss.2-Art.936>

Agencia Internacional de Energías Renovables [IRENA]. (2014). *Hoja de ruta para las energías renovables*. Recuperado de [https://www.irena.org/-](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/IRENA_REmap_2030_summary_2014_ES.PDF?la=en&hash=48A69749036ED8753C92FD5F4951C79C01CD1F1F)

[/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/IRENA_REmap_2030_summary_2014_ES.PDF?la=en&hash=48A69749036ED8753C92FD5F4951C79C01CD1F1F](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/IRENA_REmap_2030_summary_2014_ES.PDF?la=en&hash=48A69749036ED8753C92FD5F4951C79C01CD1F1F)

Agencia de protección ambiental [EPA]. (s.f.). *Emisiones de dióxido de carbono*. Recuperado de <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>

Alcayaga, S., Glaría, J., Guerrero, L. (1999). Regulaciones de temperatura y potencial de hidrogeno en un biodigestor anaerobio de lecho de lodo granular expandida. Universidad técnica federico Santa María, Valparaíso.

Alvarado Turcios, C. E. (2017). POTENCIAL DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS BIODEGRADABLES DE LA TERMINAL ZONA 4 (Tesis de grado). Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/8418/1/Carlos%20Estuardo%20Alvarado%20Turcios.pdf>

Arrieta Palacios, W. J. (2016). Diseño de un biodigestor domestico para el aprovechamiento energético del estiércol del ganado (Tesis de grado). Recuperado de:

https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/2575/IME_200.pdf

Arrieta, F.R.P., Teixeira, F.N., Yáñez, E., Lora, E. y Castillo, E. (2007). Cogeneration potential in the Colombian palm oil industry: Three case studies. *Biomass and Bioenergy*, 31(7), 503-511.

Ávila Hernández, M., Campos Rodríguez, R., Brenes Peralta, L., & Jiménez Morales, M. F. (2018). Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago. *Revista Tecnología En Marcha*, 31(2), 159. DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v31i2.3633>

Andersson, Kim., Rosemarin, Arno., Lamizana, B., y Kvarnstrom, E. (2016). Sanitation, wastewater management and sustainability: from waste disposal to resource recovery. Recuperado de: <https://cdn.sei.org/wp-content/uploads/2021/03/sanitation-wastewater-management-and-sustainability-by-sei-and-unep.pdf>

Barrena Gurbillón, M. A., Maicelo, J. L., Gamarra Torres, O. A., Oliva, M., Leiva, S. T., Taramona Ruíz, L. A., Huanes, M. A. y Ordinola, C. M. (2019). *Biogás: producción y aplicaciones*. Recuperado de: <http://repositorio.ulcb.edu.pe/handle/ULCB/59>

Barchilón, M. (2021). ¿Cuáles son los principales gases de efecto invernadero? *La Vanguardia*. Recuperado de <https://www.lavanguardia.com/vida/junior-report/20201127/49742882886/cuales-son-los-principales-gases-de-efecto-invernadero.html>

Bernal Patiño, L. E., y Suárez Ramírez, L. S. (2018). *Diseño conceptual de un biodigestor partiendo del estiércol vacuno y avícola, producido en la finca el Guarumal, para la obtención de biogás* (Tesis de grado). Recuperado de <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/6844>

- Buitrago, V. G., López, A. P., Coronado, A. P. y Osorno, F. L. (2004). Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia. *Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, (8), 102-110. Recuperado de: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/xJmndCpRgH94q9wWHC4qYXQ/?lang=es&format=pdf>
- Cabos Sánchez, J., Bardales Vázquez, C. B., León Torres, C. A. y Gil Ramírez, L. A. (2019). Evaluación de las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio del biol y biosol obtenidos a partir de estiércol de ganado vacuno en un biodigestor de geomembrana de policloruro de vinilo. *Arnaldoa*. 26(3), 1165-1176 Recuperado de: <http://www.scielo.org.pe/pdf/arnal/v26n3/a21v26n3.pdf>
- Calvo, R., Álamos, N., Billi, M., Urquiza, A. y Contreras Lisperguer, R. (2021). Desarrollo de indicadores de pobreza energética en América Latina y el Caribe. *CEPAL*. Recuperado de https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/47216/S2100433_es.pdf
- Cervi, R. G., Esperancini, M. S.T. y Bueno, O. de C. (2011). Viabilidad económica de la utilización de biogás para la conversión de energía eléctrica. *Revista información tecnológica*, 22(4), 3-14. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642011000400002>
- Consejo de construcción sostenible, CCCR. (2019). Guía para la implementación de estrategias de sostenibilidad en diseño y construcción de colegios nuevos de jornada única en Colombia. Recuperado de: https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-355996_recurso_4.pdf
- Comisión económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2015). *El desarrollo de energías limpias es central para un crecimiento sostenible con igualdad*. Recuperado de <https://www.cepal.org/es/noticias/el-desarrollo-de-energias-limpias-es-central-para-un-crecimiento-sostenible-con-igualdad>

Chávez Sifontes, M. (2019). La biomasa: fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos. *Anales de química*, (5), 399–407. Recuperado el 5 de septiembre del 2021 en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7285186>

Chen, Y. (1987). Thermal properties of beef cattle manure. *Agric. Wastes*, (6), 13–29. DOI: [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(83\)90003-3](https://doi.org/10.1016/0141-4607(83)90003-3)

Corona, I. (2007). Acceso abierto en la UAEH (proyecto de grado). Recuperada de <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/362/Biodigestores.pdf?sequence=1>

Comisión de regulación de energía y gas [CREG]. (s.f.). *Zonas no interconectadas*. Recuperado de: <https://www.creg.gov.co/sectores/energia-electrica/zonas-no-interconectadas>

Congreso de Colombia. (18 de diciembre de 2003). Ley que define las zonas no interconectadas. [Ley 855 de 2003]. Recuperado de <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1669722>

Congreso de Colombia. (12 de julio de 1994). Ley que establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética. [Ley 143 de 1994]. Recuperado de: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0143_1994.html

Congreso de Colombia. (13 de mayo de 1994). Ley que regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. [Ley 175 de 2014]. Recuperado de: https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf

Congreso de Colombia. (22 de diciembre de 1993). Ley en la cual se crea el ministerio de ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el SINA y se dictan otras disposiciones. [Ley 99 de 1993]. Recuperado de:

http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0099_1993.html

Corace, J. J., Aeberhard, M. R., Martina, P. A., Ventín, A. M. y García, E. (2006). Comparación del tiempo de reacción en el proceso de indigestión según el tamaño de las partículas de aserrín utilizado como materia orgánica. *Comunicaciones científicas y tecnológicas- Universidad nacional del nordeste, resumen T-034, 4p.*

Conil, P. y Kervyn, B. (2009). Biogás con efluentes de palma: desde los primeros biodigestores de los años 80 hasta los MDL (Mecanismos de Desarrollo Limpio) de los años 2000. Proceedings of the Palm Oil International Palm Oil Congress – PIPOC 2009.

Corona Zúñiga, I. (2007). *Biodigestores*. Monografía. Recuperado de:

<https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/10722/Biodigestores.pdf?sequence=1>

Cruz Ardila, J. C., Cardona Gómez, J. C. y Hernández Porras, D. M. (2013). Aplicación electrónica para el ahorro de energía eléctrica utilizando una energía alternativa.

Entramado, 9 (2), 234–248. Recuperado a partir de

<https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/entramado/article/view/3475/2866>

Cubillos Sierra, D. F., Huertas Huertas, D. M. y Contreras León, H. (2019). Evaluación de la eficiencia de remoción de materia orgánica de un biodigestor tubular anaerobio a escala piloto. *Revista Interdisciplinar de Estudios en Ciencias Básicas e Ingeniería*, 5 (1), 43–57.

Recuperado a partir de <http://revistas.uniquajira.edu.co/rev/index.php/cei/article/view/127>

Cusva García, A. C. (2020). *Propuesta de una solución energética para una comunidad aislada en el Caribe Colombiano* (Tesis de grado). Recuperado de

<http://hdl.handle.net/1992/48712>

De Lemos Chernicharo, C. A. (2007). Biological Wastewater Treatment Series – Anaerobic Reactor. Recuperado de:

<https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402116.pdf>

Deublein, D y Steinhauser, A. (2008). Biogas from waste and renewable sources: an introduction. Weinheim: Wiley-VCH verlag GmbH y Co. KGaA; germany. Recuperado a partir de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783527621705>

Departamento nacional de planeación [DNP], Unión temporal Ernst & Young, servicios públicos domiciliarios y gobierno de Colombia. (2018). Evaluación de resultados de la política de servicios públicos domiciliarios en temas de energía eléctrica en el país. *Informe de resultados de la evaluación a la política pública de energía eléctrica*. Recuperado de:

https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Sinergia/Documentos/Evaluacion_Politica_Servicios_Publicos_Domiciliarios_Energia_Electrica_Documento.pdf

Díaz Salazar, S. A. y Torres Cortes, H. Y. (2019). Análisis de viabilidad de la implementación de biodigestores como alternativa energética para familias del área rural (Trabajo de síntesis).

Recuperado de

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24238/1/TRABAJO%20DE%20S%C3%8DNTESIS%20BIODIGESTORES..pdf>

Domínguez Velásquez, F. A. (2020). DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE RESIDUOS DE GANADO PORCINO (Tesis de grado). Recuperado de

<http://186.28.225.13/bitstream/123456789/3109/1/2020AndresFelipeVelasquezDominguez.pdf>

DNP. (2014). *El Campo Colombiano: Un camino hacia el bienestar y la paz*. Tomo 1. Bogotá: DNP

Drinking water technical y legal terms. (2009). Hidrolisis. En *Drinking water glossary: A dictionary of technical and legal terms related to drinking water*. Recuperado en 26 de noviembre de 2021, de:

https://sor.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeywordlists/search.do?details=&vocabName=Drink%20Water%20Tech%2FLegal%202009&filterTerm=hydrolysis&checkedAcronym=false&checkedTerm=false&hasDefinitions=false&filterTerm=hydrolysis&filterMatchCriteria=Contains

El-Haggar, S. (2007). *Sustainable industrial design and waste management: cradle-to-cradle*. Cairo, Egipto: Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373623-9.X5000-X>

EPA. (s.f.). *Anaerobic System Design and Technology*. Recuperado de: <https://www.epa.gov/agstar/anaerobic-system-design-and-technology>

FAO, PND, GEF & gobierno de Chile, Ministerio de energía. (2011). *Manual de biogás*. Recuperado de <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

FAO. (2019). *Guía teórico – práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Recuperado de http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf

FAO. (2011). *Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta*. Recuperado de <http://www.fao.org/news/story/es/item/1141818/icode/>

García Zabaleta, R. S., Álamo Viera, M. V., y Marcelo Aldana., M. D. (2017, 17 noviembre).

DISEÑO DE UN BIODIGESTOR TUBULAR PARA ZONAS RURALES DE LA REGIÓN PIURA. XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente.

http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2017/12/Garcia-Rafael_biodigestor.pdf

Garavito Ruas, O. P. (2018). Relación entre la producción de biogás y biol a partir de restos de trucha y estiércol vacuno (tesis de grado). Recuperado de:

https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/538/TL_Garavito-Ruas.pdf?sequence=5

Giroto, A. F. y Stülp, V. J. (1989). O biodigestor como alternativa energetica para a pequena propriedade rural. *RESR, Revista de economia e sociología rural*, 27 (1), 5–19.

Recuperado a partir de

<https://www.revistasober.org/article/5da584f30e8825d924ba68e1/pdf/resr-27-1-21.pdf>

Gobierno de Colombia DNP. (2018). Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. Recuperado de:

<https://www.dnp.gov.co/DNPN/Paginas/Plan-Nacional-de-Desarrollo.aspx>

Gobierno de España, IDEA y BESEL S.A. (2007). Biomasa: Digestores anaerobios.

Recuperado de:

https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10737_biomasa_digestores_anaerobios_a2007_0d62926d.pdf

Guardia Puebla, Y., Rodríguez Ponce, Y., y Benítez Quintero, O. (2019). Diseño de un biodigestor anaerobio para el tratamiento de los residuales solidos del procesamiento cárnico. *Redel, Revista Granmense de Desarrollo Local*, 1 (2), 174–186. Recuperado a partir de <https://revistas.udg.co.cu/index.php/redel/article/view/457>

GTZ-CVC-OEKOTOP. (1987). Difusión de la tecnología del biogás en Colombia,
Documentación del proyecto.

Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, IPCC. (2011). Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático.

Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srren_report_es-1.pdf

Henao, G. J. y Zapata Márquez, L. M. (2008). Aprovechamiento de los residuos orgánicos en Colombia (Trabajo de especialización). Recuperado de:

<http://tesis.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/45/1/AprovechamientoRSOUenColombia.pdf>

Hernández, G. (2021). Emisiones de gases de efecto invernadero y sectores clave en Colombia. *El Trimestre Económico*, 88(350), 523-550. doi:

<https://doi.org/10.20430/ete.v88i350.857>

Hernández, A. B. (2009). Aplicación del diseño de experimento, método de Taguchi a un proceso de digestión anaerobia (tesis de maestría). Recuperado de:

<http://rdi.uncoma.edu.ar/bitstream/handle/123456789/16029/Tesis%20Hernandez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Hilbert, J. y Eppel, J. (2007). Desafíos y estrategias para implementar la digestión anaeróbica en los agro sistemas. Argentina.

Instituto de planificación y promoción de soluciones energéticas para las zonas no interconectadas [IPSE]. (2019). *El rol del IPSE en la promoción de proyectos de energías renovables: Desde la Colombia no interconectada.* Recuperado de:

<https://asprea.org/pdf/Presentaci%C3%B3n%20de%20Pedro%20Bejarano%20IPSE%20Colombia.pdf>

Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales [IDEAM], PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2018). Segundo Reporte Bienal de Actualización de Colombia ante la CMNUCC. Bogotá D.C.: IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2016). Inventario nacional y departamental de Gases de Efecto Invernadero - Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Bogotá D.C. - Colombia: IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM.

IDEAM & Republica de Colombia. (2014). Distribución de la temperatura media anual(°C), promedio multianual 1981-2010. Recuperado de:

http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Temp_Med_Anual.pdf

International Finance Corporation, IFC. (2015). Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones. Recuperado de: <https://ismd.com.co/wp-content/uploads/2017/03/Anexo-No-1-Gu%C3%ADa-de-construcci%C3%B3n-sostenible-para-el-ahorro-de-agua-y-energ%C3%ADa-en-las-edificaciones.pdf>

Instituto para la diversificación y el ahorro de la energía, IDEAM. (2014). Memoria Anual.

Recuperado de:

https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/documentos_10992_memoria_anual_2007_08_c611f2f7.pdf

Jaramillo Henao, G. y Zapata Márquez, L. M. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. Monografía. Recuperado de:

<http://tesis.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/45/1/AprovechamientoRSOUenColombia.pdf>

- Kepler, F., T. G. Hamilton, J., Braß, M. y Röckmann, T. (2006). Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature*, 439, 187–191. Recuperado de: <https://www.nature.com/articles/nature04420>
- López Martínez, G. A. (2017). Análisis de ciclo de vida en la generación eléctrica por biodigestión anaerobia. *Letras Conciencia Tecnológica*, 17, 12–17. Recuperado de <https://revistas.ite.edu.co/index.php/letras/article/view/150/136>
- López Merodio, I. (2019). *La energía renovable: Importancia de su implantación y desarrollo* (Tesis de grado). Recuperado de <http://hdl.handle.net/11531/28331>
- Mahmudul, H. M., Rasul, M. G., Akbar, D., Narayanan, R. y Mofijur, M. (2021). A comprehensive review of the recent development and challenges of a solar-assisted biodigester system. *Science of the total environment*, 753. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141920>
- Martí Herrero J. (2019). *Biodigestores Tubulares: Guía de Diseño y Manual de Instalación*. Redbiolac. Ecuador. ISBN: 978-9942-36-276-6. Recuperado de: http://repositorio.ikiam.edu.ec:8080/jspui/handle/RD_IKIAM/351
- Matijasevic, M. T. (2014). *Educación Media y Superior para poblaciones rurales en Colombia: Posibles diálogos*. Recuperado de <https://www.magisterio.com.co/articulo/educacion-media-y-superior-para-poblaciones-rurales-en-colombia-posibles-dialogos>
- Mathias Schegel, M., Bassel Ibrahim, Kipping Rössel, D., Ortiz Laurel, H. y Jozef Fras. (2018). Generación de biocarbón a partir del material sólido en la hidrólisis aeróbica microbiana. *Agro productividad*, 11 (11), 27-33. DOI: <https://doi.org/10.32854/agrop.v11i11.1279>

Mejdanali, A., Mendes e Costa, R., Hallack, M., López, D., y Vázquez, M. (2018). *A brighter future: The impact of rural school electrification programs on the dropout rate in primary education in Brazil*. doi: <http://dx.doi.org/10.18235/0001468>

Mendoza Yupanqui, P. Y. (2017). *Diseño de generador hidroeléctrico portable para zonas rurales* (Tesis de grado). Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/9466>

Medina Izaguirre, Z. I. y Luna Vega, J.A. (2009). *Estudio de pre factibilidad para el aprovechamiento del biogás con fines energéticos a partir del estiércol de ganado bovino en la unidad de ganado lechero de Zamorano, Honduras*. (Tesis de grado). Recuperado de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/414/1/T2864.pdf>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (24 de febrero de 2016). Se establece la organización y funcionamiento del sistema nacional del cambio climático y se dictan otras disposiciones. [Decreto No. 298 de 2016]. Recuperado de: <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/55-decreto%20298%20feb%202016.pdf>

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible y Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. (25 de noviembre de 2014). Adopción de la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los planes de gestión integral de residuos sólidos. [Resolución No. 754 de 2014]. Recuperado de: <https://www.corantioquia.gov.co/SiteAssets/PDF/Gesti%C3%B3n%20ambiental/Residuos/Anexo%20residuos%20ordinarios/Resoluci%C3%B3n%200754%20del%202014.pdf>

Ministerio de educación nacional y gobierno de Colombia. (2018). *Plan especial de educación rural hacia el desarrollo rural y la construcción de paz*. Recuperado de: https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-385568_recurso_1.pdf

Ministerio de educación nacional y gobierno de Colombia. (2015). *Colegio 10, lineamientos y recomendaciones para el diseño arquitectónico del colegio de jornada única*. Recuperado de: https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-355996_archivo_pdf_colegio_10.pdf

Ministerio de minas y energía y CREG. (18 de diciembre de 2013). *Criterios generales para reenumerar la actividad de distribución de gas combustible por tubería entre otras disposiciones*. [Resolución No. 202 de 2013]. Recuperado de: [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/268a5d690b11f79805257c6100784985/\\$FILE/Creg202-2013.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/268a5d690b11f79805257c6100784985/$FILE/Creg202-2013.pdf)

Ministerio de minas y energía. (s.f.). *Energías Renovables No Convencionales*. Recuperado de: <https://www.minenergia.gov.co/energias-renovables-no-convencionales>

Ministerio de minas y energía. (2021). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia*. Recuperado de: <https://www.minenergia.gov.co/libro-transicion-energetica>

Miranda, R. (2018). *Biodigestores continuos y discontinuos*. Recuperado de <https://es.slideshare.net/fernandomiranda123829/biodigestores-continuos-y-discontinuos>

Molano, D., y Ramírez, W. (2020). *Exposición de las principales políticas públicas relacionadas con la cobertura energética renovable de zonas no interconectadas en Colombia*. (Proyecto de investigación). Recuperado de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/34196>

Moncayo Romero, G. (2013). *Dimensionamiento y diseño de biodigestores y plantas de biogás*. Aqualimpia Engineering e.K.

- Moro, F. T., Coppi, E. P., y Prsybyciem, M.M. (2019). Construcción de un biodigestor: una propuesta de ensino interdisciplinar para escolas do campo. *Insignare Scientia*, 2(1), 104-115. ISSN: 2595-4520
- Muñoz Arias, C., y Villamil Villar, B. I. (2020). ENERGÍA LIMPIA PARA ILUMINACIÓN EN LOS HOGARES DE LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS. *Encuentro Internacional De Educación En Ingeniería*. Recuperado a partir de <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/view/811>
- Organización de las naciones unidas [ONU]. (s.f.). *Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna*. Recuperado de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura [FAO]. (2018). *Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta*. Recuperado de: <https://www.fao.org/in-action/agronoticias/detail/es/c/1141955/>
- ONU (2018). La agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible. Una oportunidad para América Latina y el caribe. *CEPAL*. Recuperado de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf
- Osejos Merino, M. A., Jaramillo Véliz, J. J., Merino Conforme, M. V., Quimis Gómez, A. J. y Alcívar Cobeña, J. L. (2018). Producción de biogás con estiércol de cerdo a partir de un biodigestor en la granja EMAVIMA Jipijapa - Ecuador. *Dominio de las ciencias*, 4(1), 709-733. DOI: <http://dominiodelasciencias.com/ojs/index.php/es/article/view/788>
- Peláez Merchán, J. M. (2020). *Diseño de un biodigestor anaeróbico discontinuo para la producción de biogás en zonas de bajos recursos económicos de Jipijapa* (Tesis de grado). Recuperado de <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/2130>

- Ramírez Aguilera, E. A. (2016). Producción de Biogás a partir de Biomasa. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, (17), 11–22. Doi: <https://doi.org/10.5377/farem.v0i17.2610>
- Razo, E. Villafuerte, M. (2007). Acceso abierto en la ESCUELA POLITECNICA NACIONAL (proyecto de grado). Recuperado de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/306/1/CD-0712.pdf>
- Reyes Aguilera, A. E. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *Revista Científica de FAREM-Estelí. Medio ambiente, tecnología y desarrollo humano*, 6(24), 60-81. DOI: <https://doi.org/10.5377/farem.v0i24.5552>
- Región central RAP-E y Universidad distrital francisco José de Caldas. (2020). *Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región central*. Recuperado de: <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/ESTADO-DE-LA-COBERTURA-ELECTRICA-Y-LAS-ZONAS-NO-INTERCONECTADAS-EN-LA-REGIO%CC%81N-CENTRAL-3-1.pdf>
- Rincón, J. F. (2020). *Energías renovables, una alternativa para ampliar cobertura del servicio energético en Colombia* (Tesis de grado). Recuperado de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/38962>
- Rivas Solano, O. R., Faith Vargas, M. y Guillén Watson, R. (2009). Biodigestores: factores químicos, físicos y biológicos relacionados con su productividad. *Tecnología en marcha*, 23(1), 39-46. Recuperado de: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/132
- Roa, D. P., y Gómez Acuña, D. M. (2017). *Implementación de proyectos de generación eléctrica a partir de fuentes no convencionales de energía renovable en un municipio de*

Colombia perteneciente a las zonas no interconectadas. Estudio de caso (Puerto Carreño-Vichada) (Tesis de grado). Recuperado de <http://hdl.handle.net/11349/24610>

Rodríguez Gámez, M. R., Vázquez Pérez, A., Vélez Quiroz, A. M. y Saltos Arauz, W. M. (2018). Mejora de la calidad de la energía con sistemas fotovoltaicos en las zonas rurales. *Revista Científica*, 33(3), 265-274. Doi: <https://doi.org/10.14483/23448350.13104>

Sandoval, A. J., Barreiro, J. A., De Sousa, A., Valera, D. y Müller, A. J. (2019). Determination of the physical properties of fermented and dried Venezuelan trinitrio cocoa beans (*Theobroma cacao* L.). *Revista Técnica de la facultad de ingeniería universidad del Zulia*, 45 (2), 50–56. Recuperado de: <https://produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/26158/26794>

Saldaña Durán, C. E., y Nájera González, O. (2019). Identification of potential sites for urban solid waste disposal in the municipality of tepic, Nayarit, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35 (2), 69–77. Doi: <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.esp02.07>

Salinas, P. J. (2019). LOS DESECHOS SÓLIDOS, RESIDUOS O BASURA, UN PROBLEMA MUNDIAL PARA LA SALUD Y EL AMBIENTE. *Medula*, 28(1), 35–38. Recuperado del repositorio institucional de la universidad de los Andes - Venezuela <http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/45900>

Sogari, N. (2003). Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos. Universidad nacional del nordeste Argentina. *Comunicaciones científicas y tecnológicas*, Resumen T-027.

Song, Z., Zhang, Ch., Yang, G., Feng, Y., Ren, G. y Han, X. (2014). Comparison of biogas development from households and medium and large-scale biogas plants in rural China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 204-213.

Suárez Chernov, V. D., López Díaz, I. y Álvarez Gonzáles, M. (2019). Estimación de la producción de biogás a partir de un modelo de simulación de procesos. *Revista centro azúcar*, 46 (1), 73-85. Recuperado de: <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v46n1/2223-4861-caz-46-01-73.pdf>

Superservicios. (2017). *Zonas no interconectadas – ZNI, Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica 2017*. Recuperado de <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Sep/diagnosticozni-superservicios-oct-2017.pdf>

Superservicios. (2020). *Informe sectorial de la prestación del servicio de energía eléctrica 2020, Zonas no interconectadas- ZNI*. Recuperado de https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Dic/informe_sectorial_diagnostico_zni_2020.pdf

Surendra, K. C., Takara, D., Hashimoto, A. G. y Khanal, S. K. (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and sustainable energy reviews*, 31, 846-859. DOI: 10.1016/j.rser.2013.12.015

Tay León, M. M. (2017). Rendimiento de biogás y biofertilizante en la digestión anaerobia de estiércol de animales y rastrojos en Lambayeque (Tesis de licenciatura). Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12893/6060>

Tóala Moreira, E. E. (2017). Diseño de un biodigestor de polietileno para la obtención de biogás a partir del estiércol de ganado en el rancho Verónica (Tesis de grado). Recuperado de: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/3406/1/236T0100.pdf>

Universidad distrital Francisco José de Caldas, (2020). Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región central. Recuperado de: <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/ESTADO-DE-LA-COBERTURA-ELECTRICA-Y-LAS-ZONAS-NO-INTERCONECTADAS-EN-LA-REGIO%CC%81N-CENTRAL-3-1.pdf>

Unidad de Planeación Minero-Energética UPME. (2018). Valorización energética de residuos: proyecto WTE Colombia. Extraído de: https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1339/5/Productos%201%2C2%20y%203_V2.pdf

Universidad Nacional. (2018), estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento. Extraído de: <https://bdigital.upme.gov.co/jspui/bitstream/001/1317/1/Informe%20final.pdf>

Unidad administrativa especial de servicios públicos [UAESP] y grupo de investigación sistemas integrados de producción agrícola y forestal [SIPAF]. (2018). Guía Técnica para el aprovechamiento de residuos orgánicos a través de metodologías de compostaje y lombricultura. Recuperado: https://www.uaesp.gov.co/images/Guia-UAESP_SR.pdf

UPME. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. Recuperado de: https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVABLES_WEB.pdf

UPME. (2019). Plan de sustitución progresiva de leña. Recuperado de:

https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/Plan_sustitucion_progresiva_Lena.pdf

UPME, MinMinas y Colombia inteligente. (2017). Acciones para la transformación del sector eléctrico colombiano. Documento de trabajo. Recuperado de:

http://www.upme.gov.co/Memorias_Seminarios_sp/Taller_microrredes_ZNI/resultados_taller.pdf

Valdés López, A., López Bastida, E. J., y Alonso Aguilera, A. (2019). Gestión de residuos industriales y sostenibilidad. Necesidad de un enfoque de economía ecológica. *Revista Científica de La Universidad de Cienfuegos*, 4, 424–435. Recuperado de

<https://orcid.org/0000-0002-8503-3025>

Van Lier, J. B., Mahmoud, N. A. y Zeeman, G. (2008). Anaerobic Wastewater Treatment. *Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design*. 415-457. IWA publishing. DOI: <https://doi.org/10.2166/9781789060362>

Varnero, M. y Arellano, J. (1990). Aprovechamiento racional de desechos orgánicos. *Ministerio de agricultura (FIA), Universidad de Chile-Facultad de ciencias agrarias y forestales, informe técnico*. Santiago, Chile. Recuperado de

<http://bibliotecadigital.fia.cl/handle/20.500.11944/145136>

Wang, H., Aguirre Villegas, H. A., Larson, R. A. y Alkan-Ozkaynak, A. (2019). Physical properties of dairy manure Pre- and Post-Anaerobic Digestion. *MDPI*, 9(13). DOI:

<https://doi.org/10.3390/app9132703>

Zamudio Loza, G. y Gómez Aguilar, J. S. (2021). *Implementación de un biodigestor para el aprovechamiento energético de residuos orgánicos de búfalos en el municipio de*

Rionegro, Santander. Estudio de caso (Puerto Carreño-Vichada) (Tesis de grado).

Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12749/14057>