

**APLICACIÓN DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA PRODUCCIÓN DE
BIOGÁS A PARTIR DE AGUAS RESIDUALES EN ZONAS NO INTERCONECTADAS
DE COLOMBIA.**

TANIA GABRIELA BELTRÁN RICO

**MONOGRAFÍA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL**

DIRECTOR

HARVEY ANDRES MILQUEZ SANABRIA

MsC INGENIERÍA QUÍMICA

PhD ENERGÍAS RENOVABLES

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Nombre
Firma del presidente Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Nombre
Firma del Jurado

Bogotá, D.C. marzo de 2022

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingenierías

MSc Naliny Guerra Prieto

Directora de la Especialización en Gestión Ambiental

MSc Nubia Liliana Becerra Ospina

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

TABLA DE CONTENIDO

	pág
RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	10
1. OBJETIVOS	12
1.1Objetivo general	12
1.2Objetivos específicos	12
2. MARCO REFERENCIAL	13
2.1Definición del proceso de obtención de biogás por medio de digestión anaerobia	13
2.2Digestión Anaerobia	13
2.3Microorganismos	17
2.3.1Tipos de microorganismos	17
2.4 Biogás	21
2.5Aplicaciones del biogás	22
2.5.1Energía Eléctrica	22
2.5.2Energía Térmica	23
2.5.3Biocombustible	24
2.6Marco Legal	24
2.7Beneficios de la digestión anaerobia y la producción de biogás para la sociedad actual	25
3.PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR MEDIO DE LA MATERIA ORGÁNICA PROVENIENTE DE AGUAS RESIDUALES EN ZONAS RURALES DE COLOMBIA	27
3.1Materia orgánica presente en las aguas residuales en Colombia	27
4.NECESIDADES AMBIENTALES Y SOCIALES QUE PUEDEN SER ATENDIDAS CON LA RECOLECCIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE ZONAS NO INTERCONECTADAS EN COLOMBIA	31
4.1Problemática social	31
4.2. Problemática Ambiental	36
4.2.1 Capacidad de producción de biogás del estiércol de diferentes animales.	38
5. DEFINICIÓN DE LA ESTRATEGIA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR MEDIO DE AGUAS RESIDUALES	55
6.CONCLUSIONES	60
BIBLIOGRAFÍA	61

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. <i>Reacciones de acidogénesis</i>	14
Figura 2. <i>Reacciones de acetogénesis</i>	14
Figura 3. <i>Reacciones de metanogénesis</i>	15
Figura 4. <i>Secuencia de reacciones en la digestión anaerobia</i>	15
Figura 5. <i>Esquema del proceso de la digestión anaerobia</i>	20
Figura 6. <i>Generación estiércol de diferentes animales en Colombia</i>	28
Figura 7. <i>Generación de biogás de diferentes animales en Colombia</i>	29
Figura 8. <i>Distribución geográfica correspondiente a las Zonas no Interconectadas en Colombia</i>	33
Figura 9. <i>Actividades económicas ganaderas de zonas no interconectadas del país con un rango de servicio de electricidad de 0 a 4 horas diarias.</i>	33
Figura 10. <i>Producción de residuos frescos de explotaciones ganaderas</i>	38
Figura 11. <i>Composición nutritiva de estiércoles en materia fresca</i>	39
Figura 12. <i>Rangos de niveles de Carbono y Nitrógeno en los diferentes estiércoles de origen animal</i>	40
Figura 13. <i>Composición de estiércol bovino y porcino</i>	41
Figura 14. <i>Factores de generación de biogás para las biomásas residuales estudiadas.</i>	42
Figura 15. <i>Composición química de los diferentes estiércoles de origen animal</i>	42
Figura 16. <i>Capacidad producción de biogás y metano (CH₄) según diferentes compuestos orgánicos</i>	42
Figura 17. <i>Actividades económicas agrícolas de zonas no interconectadas del país con un rango de servicio de electricidad de 0 a 4 horas diarias.</i>	44
Figura 18. <i>Características relevantes para la producción de biogás de algunos productos agrícolas.</i>	50
Figura 19. <i>Digestor Tubular</i>	57
Figura 20. <i>Componentes del biodigestor tipo tubular o Taiwanés</i>	57
Figura 21. <i>Temperatura de trabajo del biodigestor según la temperatura ambiente correspondiente a la zona no interconectada.</i>	58
Figura 22. <i>Fórmula Volumen del biodigestor</i>	59

RESUMEN

En este trabajo se plantea la aplicación de la digestión anaerobia, como proceso para el aprovechamiento de aguas residuales agrícolas y generación de energías alternativas como lo es el biogás, en zonas rurales de Colombia, dónde no se cuente con sistemas de alcantarillado y, por lo tanto, los vertimientos sean dispuestos en fuentes hídricas, bosques, suelos, etc. contaminando así el ecosistema, no sólo afectando la vida acuática y vegetal, sino la salud humana, ya que según Alférez y Nieves (2019) estos contienen grandes cantidades de microorganismos patógenos generadores de múltiples enfermedades. Por otra parte, las zonas rurales a las que puede ser aplicado este proyecto, se definen como zonas no interconectadas (ZNI) dónde no se presta el servicio público de electricidad a través del Sistema Interconectado del país, aprovechando el biogás como energía eléctrica.

Primero se realiza una contextualización y consolidación de información sobre la producción de biogás por medio de la digestión anaerobia de aguas residuales agrícolas, la descripción de este proceso, los tipos de biodigestores y microorganismos que pueden ser utilizados y cómo aprovechar el biogás obtenido para la producción de electricidad. Teniendo en cuenta el marco legal vigente para este tipo de actividades. Conociendo además la cantidad de estiércol que se produce anualmente en el país, cuya materia orgánica puede ser aprovechada para la producción del biogás.

Además de realizar una revisión bibliográfica sobre las zonas rurales con necesidades sociales y ambientales, que se puedan ver beneficiadas por la producción de energía por medio de la digestión anaerobia y el biogás. Definiendo estas zonas, como las zonas no interconectadas de Colombia que cuentan con un servicio de energía eléctrica menor o igual a 4 horas durante el día. Dónde utilizan leña y combustibles fósiles que no sólo generan contaminación sino daños a la salud.

Se tuvieron en cuenta 102 localidades denominadas como zonas no interconectadas con un rango de energía entre 0 y 4 horas, de las cuales 35 pueden generar biogás a partir del uso del estiércol de diferentes animales, debido a que sus actividades económicas dependen de la ganadería bovina, porcina, equina, ovina y la avicultura. Es importante recalcar que cada residuo que se puede aprovechar por sí sólo no genera una producción de biogás eficiente, por esto se recomienda una codigestión con diferentes residuos agrícolas que también son producidos en estas zonas gracias a sus actividades económicas, para así mejorar la producción de biogás. Además de esto por cada

zona se puede generar un centro de acopio, para aumentar la cantidad de sustrato que se va a utilizar y por último construir y diseñar un biodigestor por cada localidad, las recomendaciones según bibliografía para el tipo de reactor es el tubular o UASB, ya que, los dos se recomiendan para la digestión de aguas residuales con materia orgánica y el primero es el adecuada para las condiciones geográficas de América Latina.

Palabras clave: Digestión anaerobia, aguas residuales agrícolas, zonas rurales, zonas no interconectadas, biodigestor.

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas actuales que aqueja a la sociedad, específicamente en Colombia; es la búsqueda de nuevas formas de energía que sustituyan el uso de combustibles fósiles; además de encontrar soluciones para tratar las aguas residuales en zonas de difícil acceso o simplemente zonas olvidadas por el gobierno Nacional, dónde no se cuenta con un sistema de alcantarillado o con el servicio público de electricidad. Es una problemática que debe ser atendida no sólo por los daños medio ambientales que conlleva no contar con un sistema de alcantarillado o con una planta de tratamiento de agua, sino por las afectaciones a la salud que puede traer el hecho de verter aguas residuales en cuerpos hídricos, enfermedades como el cólera, diarreas, disentería, fiebre tifoidea y la poliomielitis. El inadecuado o inexistente saneamiento de las aguas residuales sean urbanas, industriales o agrícolas, genera que muchas personas beban aguas contaminadas o afectadas químicamente.

Además, de las necesidades no suplidas en lugares como las zonas no interconectadas en Colombia, donde la población no cuenta con la conexión correspondiente al servicio público eléctrico Nacional, dependiendo de plantas generadoras de energía eléctrica o simplemente con velas o lámparas de queroseno, donde el recurso no es permanente, viviendo con pocas horas de energía eléctrica durante el día (cuatro a doce horas en el día). Por estos motivos, es importante que en Colombia se empiecen a buscar nuevas formas de tratamiento y disposición de aguas residuales agrícolas, además del uso de energía renovable, por medio de estructuras rentables económicamente, ya que deben ser ubicadas en zonas donde los municipios poseen recursos ilimitados. Uno de los procesos desarrollados para el aprovechamiento de estos residuos es la biodegradación, donde los microorganismos se alimentan de estos compuestos, estos métodos biológicos tienen un gran potencial para la remoción y degradación de grandes volúmenes de estos contaminantes a un costo menor comparado con otras tecnologías, ofreciendo una alta viabilidad económica y muy buena eficiencia. (Pearce, 2003).

El biodigestor es una de las soluciones para los problemas anteriormente planteados, ya que genera biogás; el contenido de energía de 1m^3 de biogás es aproximadamente de $6\text{kWh}/\text{m}^3$, esta energía puede ser aprovechada de diferentes maneras porque puede transformarse en energía mecánica en una proporción de 28,4% aproximadamente, en energía térmica en un 68%, en energía eléctrica en un 25,8%, y por último en combustible no quemado en un 3,6%. (Hilbert, s.f.)

Con el desarrollo de este proyecto, se evaluará qué tan viable es el uso de aguas residuales provenientes de zonas rurales para la creación de biogás, como fuente de producción de energía eléctrica, implementando los biodigestores en zonas no interconectadas.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Identificar las estrategias para la aplicación de la digestión anaerobia para la producción de biogás usando aguas residuales provenientes de zonas rurales de Colombia, como una fuente de energía renovable.

1.2 Objetivos específicos

1. Definir el proceso de obtención de biogás por medio de digestión anaerobia de la materia orgánica de aguas residuales y sus beneficios para la sociedad actual.
2. Consolidar información sobre la producción de biogás por medio de la digestión anaerobia de la materia orgánica proveniente de aguas residuales en zonas rurales de Colombia.
3. Describir las necesidades que pueden ser atendidas con la recolección de las aguas residuales provenientes de zonas rurales en Colombia, en cuánto a temas ambientales y sociales.
4. Definir las estrategias más adecuadas para la producción de biogás partiendo de las aguas residuales, proveniente de zonas rurales en Colombia.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Definición del proceso de obtención de biogás por medio de digestión anaerobia

En este capítulo se va a definir el proceso de obtención de biogás por medio de digestión anaerobia de la materia orgánica de aguas residuales y qué beneficios genera en la sociedad.

2.2 Digestión Anaerobia

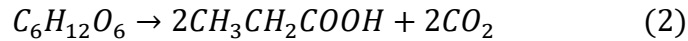
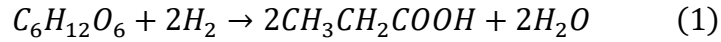
Es una tecnología de tratamiento de aguas residuales agrícolas común y eficiente; este proceso implica la desintegración de la materia orgánica por medio de microorganismos y da como resultado la producción de biogás, una fuente de energía renovable. Las ventajas de este proceso incluyen el uso de menos energía, la capacidad de reutilizar el biogás como fuente de energía para su propia producción, tiene un menor costo de tratamiento y no produce ningún tipo de contaminante como subproducto. (Rahman, W., Khan, M., Khurshid, B., Khan, M., Halder, G. 2020)

La digestión anaerobia se divide en cuatro pasos:

1. Hidrólisis: Los microorganismos hidrolíticos a través de enzimas transforman las macromoléculas de los nutrientes (carbohidratos, lípidos, proteínas) en sus monómeros (monosacáridos, ácidos grasos, aminoácidos y polipéptidos). (Andrade C., Corredor A., Buitrago L., Muñoz A. 2017)
2. Acidogénesis: Las bacterias acidogénicas degradan los monómeros obtenidos previamente en combustibles solubles como los ácidos grasos volátiles, los cuáles son ácidos de cadena corta que tienen un solo grupo carboxílico y entre uno y seis carbonos saturados. (Andrade C., Corredor A., Buitrago L., Muñoz A. 2017)

Figura 1.

Reacciones de acidogénesis

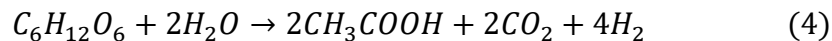
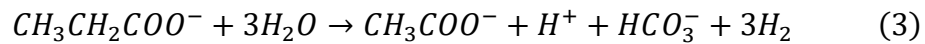


Nota. Anaerobic digestion of toluene-laden wastewater under oxygen-deficient mesophilic condition and concurrent retrieval of methane-enriched biogas. 2020.

3. Acetogénesis: Las bacterias acetogénicas transforman los ácidos grasos volátiles en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. (Andrade C., Corredor A., Buitrago L., Muñoz A. 2017)

Figura 2.

Reacciones de acetogénesis

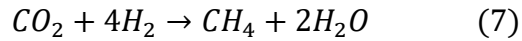
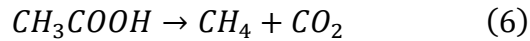
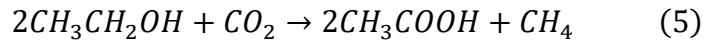


Nota. Anaerobic digestion of toluene-laden wastewater under oxygen-deficient mesophilic condition and concurrent retrieval of methane-enriched biogas. 2020.

4. Metanogénesis: Las bacterias metanogénicas transforman el ácido acético en metano y dióxido de carbono, además de convertir el dióxido de carbono y el hidrógeno en metano y agua. (Andrade C., Corredor A., Buitrago L., Muñoz A. 2017)

Figura 3.

Reacciones de metanogénesis

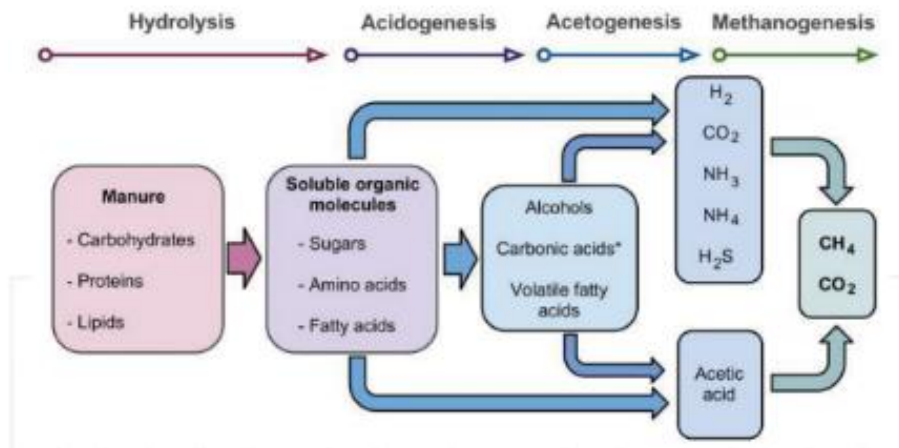


Nota. Anaerobic digestion of toluene-laden wastewater under oxygen-deficient mesophilic condition and concurrent retrieval of methane-enriched biogas. 2020.

En la figura 4. se presenta un esquema de la secuencia de reacciones involucradas en el proceso de digestión anaerobia, descritas anteriormente.

Figura 4.

Secuencia de reacciones en la digestión anaerobia



Nota. Production of biogas and performance evaluation of Ultrasonic Membrane Anaerobic System (UMAS) for palm oil mil effluent treatment (POME). 2017.

Para la digestión anaerobia se deben mantener unas condiciones específicas para favorecer el crecimiento de las bacterias, debe ser un ambiente con:

- Gran concentración de nutrientes disponibles.
- Temperatura para microorganismos mesófilos entre 10°C y menos de 45°C; para termófilos más de 45°C y menos de 70°C. Sin embargo, su temperatura óptima está entre 20-40°C y 40-70° respectivamente. (Karp, 2005). Generalmente, se utilizan los microorganismos mesófilos, debido a que los termófilos son vulnerables a los cambios bruscos de temperatura, requiriendo un cuidado especial. Además, la temperatura óptima del proceso es de 35°C. (Acosta y Obaya, 2005).
- Las condiciones de pH deben estar entre 6,6 y 7,6, sin embargo, el pH óptimo es de 7. (Parra et ál., 2012). Para mantener este valor se deben disminuir la carga orgánica al biodigestor o adicionar nutrientes con sustancias álcalis, ácidas, agua o ácidos volátiles con cadena corta. (Andrade C., Corredor A., Buitrago L., Muñoz A. 2017)
- La relación de nutrientes debe ser 100 de carbono, 1,75 de nitrógeno y 0,25 de fósforo. (Acosta y Obaya, 2005).
- La agitación es un factor opcional debido a que depende del tipo de reactor que se esté utilizando, este factor evita la sedimentación de los microorganismos, la formación de espumas, hay mayor transferencia de masa, reduce los espacios que no se utilizan en el reactor, además de mejorar el contacto entre microorganismos y el sustrato. La velocidad debe ser la suficiente para homogenizar, pero no se puede romper la torta de sustrato. (Andrade C., Corredor A., Buitrago L., Muñoz A. 2017)
- Se debe tener cuidado con ciertos inhibidores como el oxígeno, debido a que las bacterias no sobreviven en presencia de este elemento; también con compuestos como el amoníaco, sales minerales, detergentes y metales presentes en la materia prima cuando se encuentran en elevadas concentraciones. Existen formas para realizar el proceso en presencia de estos inhibidores, pero se debe preparar un inóculo adecuado, aclimatar el reactor a estos compuestos y buscar efectos sinérgicos que disminuyan la toxicidad de estos inhibidores (Andrade C., Corredor A., Buitrago L., Muñoz A. 2017).

La digestión anaerobia tiene como producto final el biogás, que está compuesto de varios gases entre los cuáles está el metano (60-70%), CO₂ (30-40%), nitrógeno (menos del 1%), y H₂S (10-2000 ppm). Para obtener energía más productiva y rentable a partir del biogás, es necesario enriquecerlo y eliminar todos los contaminantes, es decir, mantener el metano, un gas incoloro, inflamable e inodoro, más ligero que el aire (un factor clave para el efecto invernadero); con un poder calorífico de 37781,6 kJ/Nm³ y una capacidad de generación de energía de 5kWh/Nm³; y eliminar el agua debido al potencial de acumulación del condensado en las tuberías; eliminar el ácido sulfhídrico debido a que es altamente corrosivo y puede afectar los equipos para la producción; el dióxido de carbono se debe eliminar porque si se utiliza como gas o combustible de automóvil reduce el contenido energético del biogás, además de ser parte de los gases de efecto invernadero. (Osorio F., Torres J.C. 2008).

2.3 Microorganismos

La parte más importante de la digestión anaerobia son los microorganismos presentes en el reactor que consumen la materia orgánica y realizan ciertas reacciones metabólicas para convertirla en metano. Estos microorganismos pueden ser de diferentes tipos, dependiendo de las reacciones descritas anteriormente, “la hidrólisis y la acidogénesis forman parte de la fase no metanogénica, es decir, que emplean microorganismos anaerobios facultativos, que pueden sobrevivir en ambientes que contengan o no oxígeno, mientras que la acetogénesis y la metanogénesis son etapas que pertenecen a la fase metanogénica, o sea, requieren microorganismos anaerobios estrictos que no pueden sobrevivir a ambientes donde esté presente el oxígeno” (Andrade C., Corredor A., Buitrago L., Muñoz A, 2017, p. 109).

2.3.1 Tipos de microorganismos

A continuación, se va a realizar una breve descripción sobre los microorganismos necesarios en el proceso de digestión anaerobia.

Bacterias anaerobias: estas bacterias realizan una serie de procesos, que interactúan entre sí, en ausencia de oxígeno, el primer proceso es la hidrólisis y fermentación, donde se hidrolizan los sólidos insolubles para luego ser catalizados por bacterias fermentativas en alcoholes y ácidos grasos, después se involucran las bacterias acetógenas, y por último las bacterias arqueas de la metanogénesis. (Corrales L., Romero D., Bohórquez J., Corredor A. 2015).

1. Bacterias de la fase de hidrólisis: Estas bacterias descomponen los polímeros orgánicos en moléculas más pequeñas (monómero y dímeros), se desarrolla este proceso por medio de enzimas hidrolasas. “Dentro de las bacterias anaerobias, que participan en las fases hidrólisis y acidogénesis, se encuentra *Peptostreptococcus*, *Propionibacterium*, *Bacteroides*, *Micrococcus* y *Clostridium* que interactúan con algunas bacterias de la familia *Enterobacteriaceae*.” (Corrales L., Romero D., Bohórquez J., Corredor A. 2015, pág. 60)
2. Bacteria homoacetógenas (BHA): Estas generan el acetato como producto principal, utilizando como donante de electrones el H₂, azúcares, ácidos orgánicos, aminoácidos, alcoholes y algunas bases nitrogenadas. Estas reducen el CO₂, NO₃ Y S₂O₃.
En este grupo se produce una de las reacciones ecológicas principales, que es la reducción del CO₂ en acetato, por la vía del acetylCoA mediante monóxido carbono deshidrogenasa, una enzima clave utilizada por varios microorganismos anaerobios, para realizar esta reacción reversible como un mecanismo de conversión de energía. En este grupo además se encuentran los géneros *Acetobacteria* y *Clostridios* que crecen por la vía glicolítica de fermentación de azúcares en piruvato, que es transformando en acetato con formación de ATP, liberando CO₂ y H₂. Esta formación de estos dos compuestos es vital debido a que abastece la necesidad de fuente de carbono y electrones del resto del grupo. (Ferrer Y., Pérez H., 2010)

“Dentro de los géneros más sobresalientes de las bacterias homoacetogénicas se encuentran *Clostridium aceticum*, *Clostridium formicoaceticum* y *Acetobacterium woodii*”. (Corrales L., Romero D., Bohórquez J., Corredor A. 2015, pág. 66).
3. Bacteria metanogénicas: Son consideradas las más importantes en el consorcio de microorganismos anaerobios debido a que son capaces de producir gas metano (CH₄), a través de la conversión de sustratos mono-carbonados. “Se han identificado aproximadamente 90 especies de metanógenas distribuidas en 5 clases distintas: *Methanobacteria*, *Methanococci*, *Methanomicrobiota*, *Methanopyri* y *Methanosarcinales*. Estas bacterias abundan en ambientes donde se encuentren aceptores de electrones tales como O₂, NO₃⁻, FE³⁺ y SO₄²⁻ “(Corrales L., Romero D., Bohórquez J., Corredor A. 2015, pág. 68)

4. Bacterias reductoras de sulfatos (BSR): La utilización de SO_4^{2-} como aceptor de electrones para generar energía metabólica, implica una reducción a gran escala de este ion hasta sulfuro de hidrógeno H_2S . Este proceso se realiza mediante las bacterias desulfovibrionales y desulfobacteriales. Estas bacterias pueden oxidar completamente el acetato hasta CO_2 regulada por el monóxido carbono deshidrogenasa. (Ferrer Y., Pérez H., 2010).
5. Arqueas metanógenas: Son procariontes anaerobias, este es el único grupo metabólico capaz de obtener energía de compuestos carbonados de bajo peso molecular e hidrógeno con producciones estequiométricas de metano. La reducción de CO_2 depende de la donación de electrones por el dihidrógeno, en otras especies por el formiato, el CO o algunos alcoholes orgánicos.
6. El CO_2 se reduce a formilo por medio del acetyl-CoA, y luego a metileno y metilo, por medio de enzimas que contienen las coenzimas metano furano, metanopterin. El complejo se transfiere a una enzima que contiene CoM y se reduce a metano por el sistema metil reductasa.

También se puede producir metano a partir de compuestos metilados y acetato. Estas bacterias se pueden agrupar en tres:

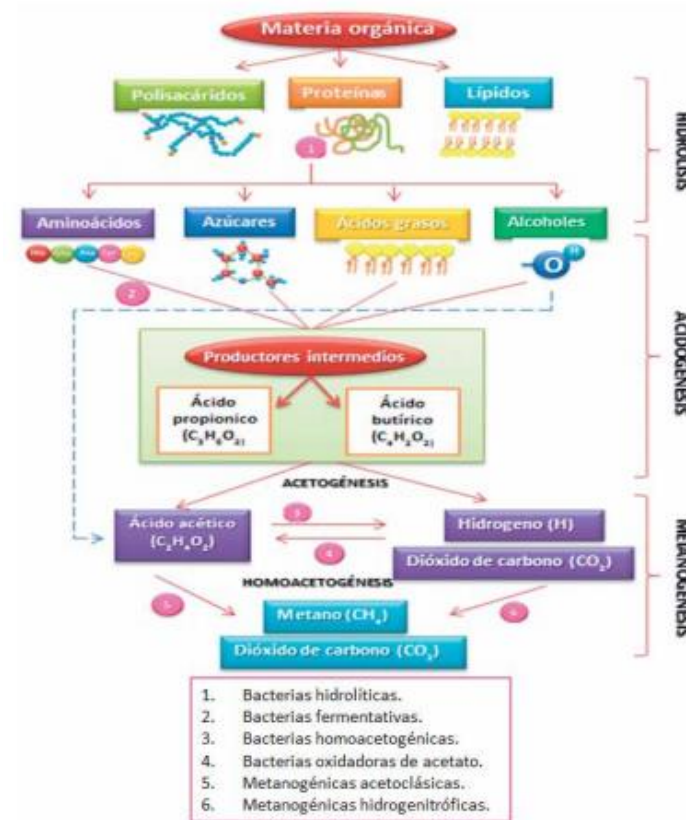
- Metanógenos hidrogenotróficos: Crecen con hidrógeno molecular como donante de electrones y CO_2 como aceptor de electrones.
- Metanógenos acetoclásticos: Rompen el acetato en metilo y carbonilo, oxidando este último hasta CO_2 y permiten la reducción del grupo metilo a metano proporcionando el potencial.
- Metanógenos metilotróficos: Crecen en compuestos metilados (metanol, metilaminas, metilsulfuro) estos actúan como donantes o aceptores de electrones o son reducidos con H_2 .

En la figura 5 presentada a continuación, se muestra un diagrama sobre la digestión anaerobia y la participación de las bacterias descritas anteriormente, en cada una de las etapas. En la primera parte denominada hidrólisis, se ve cómo la materia orgánica proveniente de las aguas residuales agrícolas contiene polisacáridos, proteínas y lípidos, que van a ser descompuestos por medio de

bacterias hidrolíticas en aminoácidos, azúcares, ácidos grasos y alcoholes. La segunda fase es la acidogénesis, donde las moléculas anteriores se convierten en ácidos orgánicos, cetonas, acetato y alcoholes; por medio de bacterias fermentativas, para después convertirse en ácido propiónico, butírico y los alcoholes en hidrógeno y dióxido de carbono. En la última fase, denominada metanogénesis, por medio de bacterias metanogénicas hidrogenitróficas se convierte el dióxido de carbono en metano, además de convertir también el ácido acético, por medio de bacterias metanogénicas acetoclásicas y el hidrógeno en gas metano.

Figura 5.

Esquema del proceso de la digestión anaerobia



Nota. Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. 2015.

La digestión anaerobia es una aplicación muy relevante actualmente para el aprovechamiento de los microorganismos y la generación de energías limpias, otro ejemplo de microorganismos aptos que se pueden incluir en este proceso para la remoción de CO_2 del biogás, es el uso de hongos y

microalgas para que este puede ser utilizado en combustibles para vehículos, debido a que este gas es uno de los más contaminantes de los gases de efecto invernadero.

2.4 Biogás

Según Andrade C., et al. (2017) “Las fuentes fósiles representan el 80,3% de la energía primaria consumida en el mundo; de este porcentaje, el 57,7% es empleado en el sector de transporte. Debido a la contaminación (atmosférica, hídrica y en suelos) que genera el uso de los combustibles derivados de dichas fuentes y a su carácter no renovable, se hace necesario el desarrollo de proceso de aprovechamiento de otras fuentes que suplan las necesidades actuales y que al mismo tiempo sean renovable y menos nocivas con el medio ambiente” (p. 102.), aquí radica la importancia del biogás como biocombustible y sus muchas aplicaciones que suplan este consumo de combustibles fósiles, además, estos emiten en menor proporción los gases de efecto invernadero que los combustibles utilizados actualmente, también se producen al consumir materia orgánica es decir residuos que desechamos a rellenos sanitarios, masas de agua, etc.

“El biogás es una fuente de energía ambientalmente ventajosa derivada de la digestión anaeróbica de sustratos orgánicos, como estiércol, desperdicios de alimentos, lodos de depurador y residuos de cultivos. Dependiendo del tipo de materia prima, se compone de metano combustible (60-70%), dióxido de carbono (30-40%), y trazas de otros gases” (Lemma B., Ararso K., Evangelista P., 2020, p. 3.). El biogás se produce por medio de la digestión anaerobia, donde las aguas residuales agrícolas se transforman biológicamente gracias a ciertos microorganismos en ausencia de oxígeno, produciendo biogás y otros compuestos orgánicos ricos en energía como productos finales, denominados digestatos, estos son ricos en fósforo, nitrógeno, calcio, los cuáles funcionan muy bien como fertilizantes para cultivos. Debido a que el biogás está compuesto generalmente de metano, dióxido de carbono, más del 17% de nitrógeno, menos del 1% de oxígeno, 32-169 ppm de sulfuro de hidrógeno y trazas de otros gases (Minale M., Worku T. 2012).

2.5 Aplicaciones del biogás

La descomposición y fermentación de biomasa generan biogás cuyo principal componente es el metano, aunque este es considerado como un gas de efecto invernadero, se puede aprovechar como un excelente activo energético, previniendo daños ambientales. Existen muchas tecnologías para purificar el biogás y de esta manera transformarlo en energía térmica y eléctrica y como combustible vehicular. Se necesita un sistema para separar el metano de los compuestos restantes y mejorar su porcentaje en la composición final del gas, ya que los otros gases residuales no tienen el potencial para generar energía durante la fase de combustión. Por esto deben eliminarse mejorando la concentración del metano, se pueden realizar procesos de depuración por purificación de membranas, lavado con agua, purificación biológica, adsorción por cambio de presión. (Dalpaz R., Konrad O., Cyrne C., Barzotto H., Hasan C., Filho M. 2020.)

2.5.1 Energía Eléctrica

La generación de energía eléctrica en corriente alterna se basa en la Ley de Faraday-Lenz. Que consiste en el movimiento relativo entre un conductor eléctrico y un campo magnético; se produce una fuerza electromotriz que hace circular corriente eléctrica por el conductor. (Ramirez, L. 2004). La producción de electricidad por medio del biogás se hace de la manera mencionada anteriormente, sólo que cambia el agente que produce el movimiento entre el conductor y el imán. Donde el biogás procedente del biodigestor es consumido por la turbina a gas que mueve el generador.

Según Payan O., Urbina E. (s.f.) “estas turbinas de gas o de combustión, son de gran utilidad para generar energía desde hace décadas a escala comercial debido a su bajo coste, bajo mantenimiento y bajas emisiones. [...] La turbina de gas es un motor de combustión interna que opera con un movimiento rotativo en vez de un movimiento recíproco. Las turbinas pueden utilizar como combustible biogás y se usan en numerosas aplicaciones, incluyendo la generación de energía eléctrica, compresores de gas, y varias aplicaciones industriales que requieren movimiento de un eje.” (p. 59.)

“Estas turbinas de gas se pueden utilizar en varias configuraciones:

- **Operación en ciclo simple:** Turbinas de gas simples produciendo solamente energía eléctrica.
- **Operación CHP:** Una turbina de gas con ciclo simple que usa un intercambiador de calor para recuperación de calor que recupera el calor residual de la turbina y lo convierte en energía térmica útil, usualmente en forma de vapor o agua caliente.
- **Operación en ciclo combinado:** El vapor a alta presión que se genera a partir de recuperación de calor y se usa para crear energía eléctrica adicional usando una turbina de vapor. Algunas turbinas de ciclo combinado extraen vapor a una presión intermedia para usos en procesos industriales, creando sistemas de ciclo combinado CHP.” (Payan O., Urbina E. s.f., p. 59 -60)

La generación de electricidad a partir de estas turbinas de gas se realiza mediante el ciclo de Brayton, y consiste en un compresor de aire a alta presión, una cámara de combustión operando a alta presión, la turbina de gas y el generador. El biogás se debe filtrar adecuadamente para eliminar partículas y que no genere daños en los álabes de la turbina de gas. (Payan O., Urbina E. s.f.)

Según Asís, H., et. al. (s.f.) “Las ventajas del uso de estas turbinas de gas, es que se adaptan mucho a las características del biogás, pueden trabajar con contenidos altos de H₂S y concentraciones bajas de CH₄. Tienen buena relación potencia, peso y volumen y una buena flexibilidad en su operación. Además de tener una emisión baja de NOx. [...] Sin embargo una de sus desventajas es que posee un bajo rendimiento (30-35%) comparado con los motores alternativos de Diesel” (p. 5.)

2.5.2Energía Térmica

El metano tiene un alto poder calorífico (9.96 kWh/m³) y potencialmente se puede convertir en energía térmica, utilizado en calderas para generar calor, en motores de cogeneración produciendo calor y electricidad simultáneamente o incluso vapor para aplicaciones industriales. Los rangos de potencias eléctricas están entre 20kW y 4MW. Con una concentración de 68.54% de metano se puede producir 1.15 kWh/ m³, con 83.46% de metano se produce 1.57 kWh/ m³, con una concentración de 92.33% se produce 1.67 kWh/ m³. (Dalpaz R., Konrad O., Cyrne C., Barzotto H., Hasan C., Filho M. 2020.).

Aquí reemplaza el consumo de leña para disminuir la deforestación.

2.5.3 Biocombustible

El biogás puede utilizarse también como gas o biocombustible para los medios de transporte debido a la capacidad ya mencionada del metano, aquí es aún más necesaria la eliminación de los otros gases residuales debido a que son gases de efecto invernadero y pueden producir contaminación como lo es el dióxido de carbono, además debe ser comprimido para poder ser envasado en cilindros.

2.6 Marco Legal

Colombia es uno de los países que hace parte de la propuesta por parte de la ONU de la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, dónde se busca el cumplimiento de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, los cuales incluyen agua limpia y saneamiento, energía asequible y no contaminante, acción por el clima, salud y bienestar, vida submarina y de ecosistemas terrestres, entre otros. Además, de hacer parte de este programa, también el país se adhirió al Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático, ley 629 de 2000, dónde se busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo tanto, la implementación de energías renovables como el biogás son una gran opción para que el país cumpla con dicho objetivo.

La ley 1715 de 2014, donde según el Ministerio de Minas (2010) se busca regular y promover la generación de fuentes de energía no convencionales, en especial la generación de biogás. Además de apoyar la implementación de estas soluciones en zonas rurales o zonas alejadas dónde sean necesarios estos sistemas.

Otro Decreto aplicable a este proyecto es el 2981 de 2013 en su artículo 82, dónde busca “racionalizar el uso y consumo de materias primas provenientes de los recursos naturales. Recuperar valores económicos energéticos [...] aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios al reducir la cantidad de residuos a disponer finalmente en forma adecuada”. La disminución de disposición de aguas residuales agrícolas en rellenos sanitario permite el aprovechamiento energético de residuos con alta carga orgánica.

En cuanto a las aguas residuales agrícolas el Decreto 1076 de 2015, según el Ministerio de Ambiente, promueve el reúso de las aguas residuales agrícolas a través de los Planes de Reconversión a Tecnologías Limpias en Gestión de Vertimientos, además es claro que las aguas

residuales agrícolas no pueden ser vertidas a fuentes hídricas sin un previo tratamiento, dónde existen autoridades ambientales que deben vigilar regidas por la Resolución 0631 de 2015 que reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984.

Debido a la afectación que conlleva la mala disposición de aguas residuales agrícolas sea en fuentes hídricas o en rellenos sanitarios es importante resaltar la Ley 1751 de 2015 por la cual se fundamenta el derecho fundamental a la salud y la obligación del gobierno de adoptar soluciones para lograr la reducción de las desigualdades, previniendo enfermedades y elevando el nivel de calidad de vida. Además de prestar servicios de acueducto, alcantarillado y aseo en zonas rurales de difícil acceso, según la Ley 1753 de 2015.

2.7 Beneficios de la digestión anaerobia y la producción de biogás para la sociedad actual

Las aguas residuales debido a la gran cantidad de sustancias y microorganismos que portan pueden ser causa y vehículo de contaminación, cuando son desechadas sin un tratamiento previo. Como estas aguas tienen ciertas modificaciones debido a las actividades humanas, la calidad del agua disminuye, haciéndola imposible para el consumo humano o para cualquier actividad que se requiera.

Las aguas residuales contaminadas, presentan elementos dañinos como malos olores, acción tóxica, potencialidad infectiva por la transmisión de enfermedades y modificación de la apariencia física. Además de las enfermedades causadas por estas razones, siendo estas: poliomielitis, hepatitis infecciosa, disentería amebiana, entre otras.

Es ahí donde es importante realizar un tratamiento de estas aguas, contribuyendo al medio ambiente y a las comunidades aledañas a estas aguas, además, de generar otro beneficio económico, ya que las sociedades no dependerán de una conexión a energía eléctrica o uso de leña o combustibles fósiles para la generación de calefacción. Ya que, por medio del biogás producido al digerir la materia orgánica presente en estas aguas, se generará energía, ya sea eléctrica, térmica o biocombustibles.

Otras ventajas de la digestión anaerobia en cuanto al proceso son las siguientes:

- El consumo de energía es muy bajo cuando se realiza un tratamiento anaerobio, en ausencia de oxígeno.
- La mayoría de la materia orgánica se convierte en biogás, obteniendo energía o vapor.

- La producción de digestato en el tratamiento anaerobio es muy baja, ya que la conversión de materia orgánica a biogás es casi completa, Además este se puede estabilizar para ser usado nuevamente en el reactor o se puede utilizar como bioabono en la tierra.
- Dependiendo del agua residual, la remoción de materia orgánica se encuentra entre el 60 y 80%. (Acosta Y., Abreu M. 2004)

3.PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR MEDIO DE LA MATERIA ORGÁNICA PROVENIENTE DE AGUAS RESIDUALES EN ZONAS RURALES DE COLOMBIA

El uso de biodigestores domésticos en Colombia a escala rural se ha venido desarrollando lentamente, dado el escaso apoyo institucional que se ha dado a este tipo de proyectos. Pero el potencial que tiene Colombia para la producción de biogás es muy grande, debido a que genera grandes cantidades de residuos, además de la implementación de ciertas industrias como lo es la de los cultivos de palma y la necesidad de tratar esos efluentes líquidos originados en las extractoras de aceite. Así poco a poco se puede ir fomentando la implementación de estos proyectos en el sector.

En los últimos años se ha buscado implementar estos sistemas, especialmente en las zonas no interconectadas, ya que disponen de una gran variedad de materias primas que pueden ser aprovechadas para la producción de biogás. a. La elevada disponibilidad de residuos de tipo orgánico, las condiciones climáticas y la necesidad de cubrir las necesidades energéticas de la población de las ZNI de una forma limpia y económica son factores que combinados deberían potenciar el uso de la tecnología de biogás a nivel doméstico. (Acosta M., Pasqualino J., 2014)

3.1Materia orgánica presente en las aguas residuales en Colombia

El sector rural en Colombia es un gran productor de riqueza para el país, debido al manejo y extracción de los recursos que son la base de la economía de estas poblaciones. Sin embargo, según el informe publicado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios para finales del 2017, sólo 541 municipios de los 1.122 registrados cuentan con algún tipo de saneamiento. Además, según el DANE para el 2019 la cobertura poblacional de acueductos en zonas urbanas comprendía el 97,9 % y en zonas rurales correspondían al 73,3%, en cuanto a los sistemas de alcantarillado el 93% corresponde a zonas urbanas y el 75,3% a zonas rurales, con estos valores se muestra la brecha entre las zonas urbanas y las zonas rurales.

Estas brechas y problemáticas sociales están relacionadas con:

- Bajos niveles de articulación a nivel nacional, regional, local
- Normatividad orientada únicamente a los servicios en el área urbana sin tener en cuenta las particularidades de las zonas rurales

- Inexistente planeación, baja destinación de recursos y asistencia técnica deficiente para los prestadores rurales.
- Debilidad en la gestión de aspectos ambientales (Plan Nacional Sectorial, Agua potable y saneamiento básico. 2021)

Según Cepis, (2003) Colombia cuenta con una superficie irrigada con aguas residuales de 1'230.193 ha, con sólo el 27% de agua residual tratada y 73% sin tratar, por lo general el agua sin tratar se encuentra en aguas superficiales, sin embargo, la información sobre este tema no es completa ni confiable.

Para esta problemática de las aguas residuales en Colombia, es posible definir la cantidad de materia orgánica presente en ellas, según el Censo Pecuario Nacional del 2021, haciendo una relación entre la cantidad de animales bovinos, equinos, porcinos y avícolas y la producción de estiércol que puede contaminar las aguas.

Figura 6.

Generación estiércol de diferentes animales en Colombia

Censo	Cantidad	Producción estimada de estiércol (kg/año)	Estiércol generado al año
Bovino	27'973.390	20200	565'062'478.000
Porcino	5'950.113	1600	9'520'180.800
Aviar	210'541.160	80	16'843'292.800
Equinos	1'684.630	8000	13'477'040.000
Ovinos	1'779.697	1360	2'420'387.920

Nota. Representa los valores aproximados de estiércol en Colombia de diferentes animales

En la figura 6 se presenta la producción de estiércol anual de los distintos animales que están en Colombia y que pertenecen a las diferentes actividades económicas ganaderas del país, con esta información se puede concluir la gran cantidad de materia orgánica que se puede presentar en las diferentes aguas residuales y en la figura 7 se puede apreciar cómo se puede aprovechar esta cantidad para la producción de biogás.

Figura 7.

*Generación de biogás de
diferentes animales en
Colombia*

Censo	Generación de biogás (L/kg de biomasa seca)
Bovino	250
Porcino	450
Aviar	460
Equinos	250
Ovinos	200

Nota. Represente los valores aproximados de producción de biogás a partir del estiércol de diferentes animales

Una de las principales actividades productivas que generan grandes cantidades de residuos es la industria ganadera. En las explotaciones ganaderas se produce una cantidad considerable de estiércol que requiere ser tratado y estabilizado. Aproximadamente el 50% de los sólidos volátiles del estiércol es biomasa lignocelulosa biodegradable que puede ser convertido en CH₄. El principal producto de este proceso es el biogás (Varnero M. 2011)

El proceso de digestión anaerobia mediante la materia orgánica presente en el estiércol de estos animales corresponde al aprovechamiento de las aguas residuales denominadas agrícolas que constituyen una mezcla de aguas domésticas de la población, junto con las de riego de las tierras y el manejo del ganado o distintos animales. Según García M., López J. (s.f.) estas aguas al recoger los residuos del ganado van a estar fuertemente cargadas de materia fecal. Por lo tanto, se puede producir biogás a partir de la digestión anaerobia de esta materia orgánica, a través de biodigestores

que transforman esta materia por medio de bacterias mesófilas y termófilas que viven condiciones anaerobias, utilizando el estiércol como materia prima para el consumo de estos microorganismos.

4.NECESIDADES AMBIENTALES Y SOCIALES QUE PUEDEN SER ATENDIDAS CON LA RECOLECCIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES PROVENIENTES DE ZONAS NO INTERCONECTADAS EN COLOMBIA

4.1Problemática social

El uso de energías renovables según el Ministerio de Medio ambiente (2011) “en el periodo 1990-2009 representó el 21,38% de la oferta total, con la siguiente distribución: 9,46% hidroeléctrica, 7,10% madera, 4,59% pulpa de caña de azúcar, 0,013% energía eólica, 0,08% biodiesel y 0,14% bioetanol”, sin denotar un aporte de energía proveniente del biogás.

Uno de los problemas más significativos que tienen las poblaciones rurales es que dependen de la leña como fuente de energía, según Cendales (2011) “la tercera parte de la población rural de bajos ingresos en todo el mundo” dependen de esta materia prima; siendo difícil su obtención, debido al tiempo de recolección y en algunos casos las poblaciones con bajos recursos no tienen los medios para suplir su costo. Además,” el uso extensivo de la leña tiene un impacto considerable en la vegetación local, las zonas de manglares y de bosque seco tropical de la costa Caribe” (C. Rodríguez., 2017) debido a que pueden generar erosión del suelo, desertificación, degradación e incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Pinzón., 2004). Esta problemática en Colombia para el año 2016 según el DANE, afectó a 1'129.000 familias, las cuáles utilizan materia vegetal, debido a que son zonas alejadas de las zonas interconectadas y los sistemas de gas natural no se logran conectar por la compleja ubicación geográfica.

En Colombia, el sector eléctrico es una de las pocas insignias que quedan de la deficiente industria que desarrolló el país en las décadas pasadas, aun hoy en día el sector presenta grandes crecimientos, mega obras comparables con las más grandes obras a nivel mundial, gran proyección a futuro, una fuerte estabilidad financiera y un sinnúmero de nuevos descubrimientos e innovaciones que han permitido establecerse como líderes regionales, resultados derivados de años de independencia en la regulación y de sistemas mixtos de intervención privada y pública (Kalmanovitz, 2012).

Aun así, hay territorios en Colombia, los cuáles no han podido disfrutar de estos avances, por factores como la fragmentación social, económica y geográfica del país, es así como se llega a las denominadas Zonas No Interconectadas (ZNI), están definidas por el Artículo 11 de la Ley 143 de 1994 y delimitadas por la resolución 18 2138 de la CREG en 2007; se definen como zonas “dónde

no se presta el servicio público de electricidad a través del Sistema Interconectado Nacional”, “debido a la gran distancia de los principales centros urbanos, a la muy baja densidad poblacional, en donde la accidentada geografía, la diversidad de climas y la espesa selva tropical, para el caso del Amazonas, la Orinoquía y la región del Pacífico, hace muy difícil la instalación de la infraestructura. Esta situación hace que los costos tanto financieros como ambientales, hagan sumamente difícil la conexión al SIN, no obstante, las oportunidades de proponer alternativas energéticas a esta zona abundan debido a la gran variedad y cantidad de recursos naturales que poseen” (Flórez, Tobón, & Castillo, 2009).

Para el 2020 según el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas las ZNI representaban el 66% del territorio nacional, incluyendo 17 departamentos, 5 ciudades capitales, 5 cabeceras municipales y 1.262 localidades.

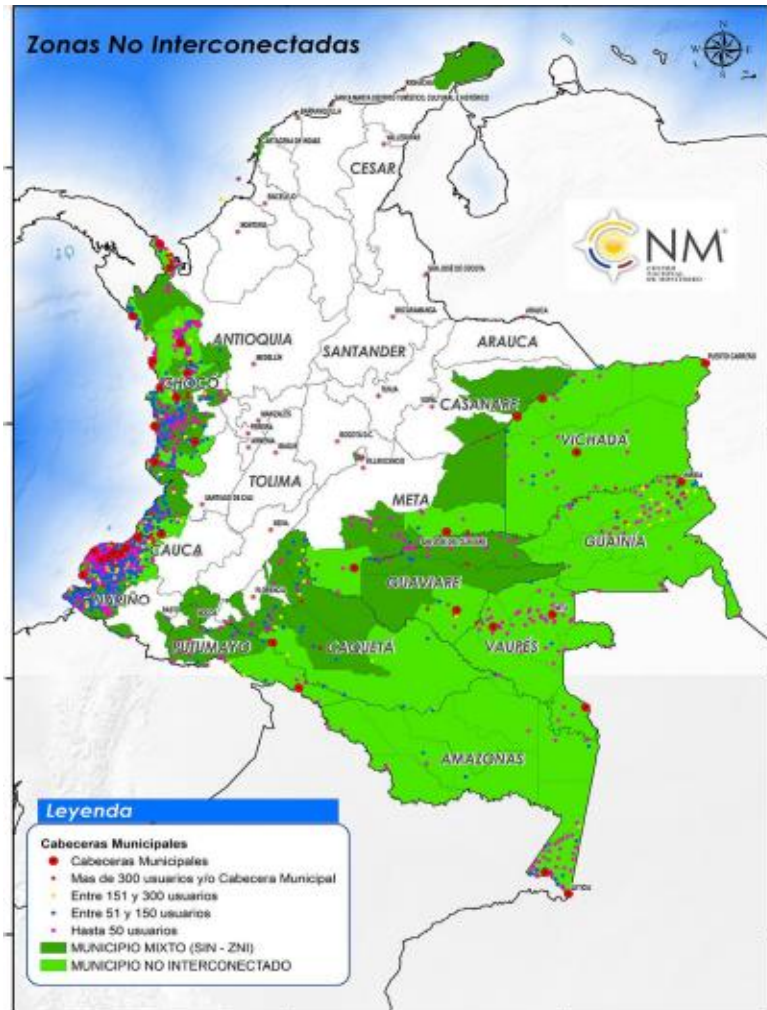
Son zonas que se caracterizan por su riqueza cultural, natural y étnica, muchas de ellas son áreas protegidas porque existen resguardos indígenas y terrenos colectivos, donde se encuentra la mayor parte de la biodiversidad del país.

Para el abastecimiento de energía, se utiliza en su mayoría plantas de generación de Diésel que como se sabe contienen una alta eficiencia, pero debido a que las zonas dónde son necesarias estas plantas son de difícil acceso, se presentan dificultadas en el transporte, presentando costos elevados de combustible, operación y mantenimiento. Además, de la generación de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, que impactan a la atmósfera y se generan gracias al uso de combustibles fósiles. Los problemas más evidentes en las ZNI son la dependencia del combustible y los elevados costos de generación con los consecuentes impactos ambientales que produce su uso. (Grupo de investigación XUE, Semillero de Investigación Barión. 2020).

En la figura 8 se muestra una representación gráfica de las zonas no interconectadas para 2020 en Colombia, por departamento, tipo de municipio, cantidad de usuarios y se muestran las zonas que son cabeceras municipales.

Figura 8.

Distribución geográfica correspondiente a las Zonas no Interconectadas en Colombia



Nota. Zonas geográficas no interconectas en Colombia. Tomado de: Universidad Distrital y Regiones Centrales. (2020), estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región central. <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>

Teniendo en cuenta en qué departamentos se encuentran las zonas no interconectadas se realizó una revisión bibliográfica sobre las diferentes actividades de los municipios de estas zonas, teniendo en cuenta las zonas que no cuentan con servicio de electricidad o únicamente cuentan

desde 1 a 4 horas del servicio durante todo el día, esto se hizo por medio del Informe Mensual de la Prestación de Servicio de Energía Eléctrica en las localidades sin sistemas de telemetría de las zonas no interconectadas- ZNI, realizado en noviembre del 2021.

A continuación, se presenta una tabla con la información correspondiente a las zonas no interconectadas cuyas actividades económicas dependen exclusivamente de actividades ganaderas ovinas, porcinas, avícolas, bovinas, equinas, para luego definir cómo desde sus actividades es posible el aprovechamiento de materia orgánica para la producción de biogás por medio de la digestión.

Figura 9.

Actividades económicas ganaderas de zonas no interconectadas del país con un rango de servicio de electricidad de 0 a 4 horas diarias

Departamento	Municipio	Localidad	Referencia
Amazonas	La Chorrera	Lago Grande	Alcaldía de Paz de Ariporo. (s. f.).
Caquetá	Cartagena del Chaira	12 de octubre	Desastres, U. N. P. L. G. D. R. (2014).
		Arenoso	
Casanare	Paz de ariporo	Bocas de la Hermosa	Alcaldía de Paz de Ariporo. (s. f.).
Cauca	Timbiquí	Almorzadero Bubuey	Alcaldía del municipio de Timbiquí. (s. f.).
Chocó	Acandi	Aguas Blancas	Alcaldía del Municipio del Bajo Baudó. (s. f.)
	Bojayá	La Boba	Universidad Nacional de Colombia - Vicerrectoría de Investigación - Equipo de comunicaciones (informacion_vri@unal.edu.co). (s. f.).
		Nambua	
		Playa Blanca	
		Puente Alegre	
		Punto Cedro	
	Condoto	Bella Victoria	Cortes, A. (2019).
Medio Baudó		Caimital	Alcaldía del Medio Baudó. (s. f.).
		Charco Azul	
		Chigorodo-Menba	

Departamento	Municipio	Localidad	Referencia
		Curundo	
		Dabeiba-Queracito	
		El Cedro	
		El Salto	
		Nuevo Incira	
		Puerto Torreido	
		San Jose de Quera	
Riosucio	Guineo	Alcaldía municipal de Riosucio. (s. f)	
	La Nueva		
Sipi	Barrancon	Resultados y proyecciones (2005-2020) del censo 2005. DANE. Consultado el 25 de enero de 2022.	
Guainía	Barranco Minas	Arrecifal	Casa Editorial El Tiempo. (2012, 31 mayo). MAPIRIPAN MIRA HACIA EL DESARROLLO. El Tiempo.
	Puerto Colombia	Cejal	Alcaldía Municipal de Vista Hermosa. (s. f.).
Nariño	Barbacoas	El Vergel	Caracterización de las condiciones de salud y laborales de trabajadores del sector informal del Departamento de Nariño. (2011)
	Roberto Payan	El Carmen	
	Santa Bárbara	Agua Clara Sequionda	
Putumayo		El Remanso	Roldán, J. D., Ortíz, G. P. & Espíndola, L. A. (2019).

Departamento	Municipio	Localidad	Referencia
	Puerto Leguizamo		
	Villagarzón	Bajo Corazón	Alcaldía de Villagarzón. (s. f.).
Vichada	Cumaribo	Chaparral	Alcaldía del Municipio de Vichada. (s. f)
	La Primavera	Campoalegre	Alcaldía del Municipio de La Primavera. (s. f.).
	Puerto Carreño	Aceitico	Prieto, C. (2021, 5 agosto).

Nota. Representa las zonas no interconectadas de Colombia, que cuentan con servicio de electricidad de 0 a 4 horas diarias.

Con la figura 9 se pueden conocer las actividades económicas de las zonas no interconectadas, que poseen servicio de energía de 0 a 4 horas diarias, además de ser únicamente las zonas en las que su economía depende exclusivamente de actividades ganaderas, ovinas, bovinas, porcinas, equinas y avícolas. Estas zonas por departamento son las siguientes:

1. Amazonas: La Chorrera
2. Caquetá: Cartagena del Chaira y Solano
3. Casanare: Paz de Ariporo
4. Chocó: Acandí, Alto Baudó, Bojayá, Condoto, Medio Baudó, Riosucio y Cacahual
5. Guainía: Puerto Colombia, San José del Guaviare, Maripan y Vista Hermosa
6. Nariño: Barbacoas, Roberto Payan y Santa Bárbara
7. Putumayo: Puerto Guzman, Puerto Leguizamo, Villagarzón.
8. Vichada: Cumaribo y Puerto Carreño.

4.2. Problemática Ambiental

Para este proyecto se van a tomar en consideración el uso de aguas residuales agrícolas debido a los componentes que estas pueden traer como materia orgánica de animales y residuos orgánicos que son desechados en fuentes hídricas.

Las aguas residuales agrícolas proceden de la ganadería, cría de animales, y todas las labores necesarias para la agricultura, estos generan grandes contaminantes que se vierten a las masas de agua (ríos, lagos, lagunas, mares, océanos, entre otros) y en los sistemas de drenaje de aguas domésticas. Estos contaminantes pueden ser fertilizantes, materia orgánica y compuestos químicos como pesticidas, fungicidas e insecticidas, los cuales son altamente tóxicos y dañinos para animales y humanos que beben de estas aguas.

Los desechos generados en el sector agrícola emiten un 14% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, además debido a los desechos resultantes de los procesos productivos de los diferentes cultivos agrícolas energéticos y la excreta de animales constituye en muchos casos las principales fuentes con mayor incidencia en la calidad del medio ambiente. Por este motivo es tan importante tener un control de estos residuos orgánicos, ya que, constituyen una fuente potencial de biomasa para el proceso de digestión anaerobia. (Iglesia J., Caballero A., Romero E. 2016).

En Colombia, sin embargo, la problemática sobre la disposición de las aguas residuales es extensa debido a que es claro que la mayoría de la población rural no cuenta con sistemas de alcantarillado, ni con plantas de tratamiento de agua. Para el 2017 según el informe “Estudio Sectorial de los Servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado” presentado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, sólo 541 municipios de los 1.122 registrados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) cuentan con algún tipo de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, es decir sólo el 48,2% de los municipios cuentan con este sistema.

Las aguas residuales agrícolas que contienen estiércoles de animales dependen del tipo de actividad, además según Reyes (2017) “las características de estos materiales están en función de especie, raza, alimentación del ganado y época del año.” A continuación, se presenta la figura 10, sobre la producción aproximada de estiércol al día para diferentes animales.

Figura 10.

Producción de residuos frescos de explotaciones ganaderas

Tipo de ganado	kg heces/día
Vacuno	30-50
Equino	20-50
Porcino	4-8
Ovino	4-8
Aves	0.1-0.5

Nota. Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. 2017

4.2.1 Capacidad de producción de biogás del estiércol de diferentes animales

El interés principal del biogás es metano, porque el metano es el componente energético del gas. La cantidad de biogás producido y el contenido de metano en la fase gaseosa dependen del residuo que se degrada, su degradabilidad y su estado de oxidación. A mejor degradabilidad y más bajo estado de oxidación, se producirán más metano. (Zinder, 1993)

La medida más común para describir la concentración de la materia orgánica degradable en desechos o en aguas residuales agrícolas es la demanda química de oxígeno (DQO) o contenido de sólidos volátiles (SV) (APHA,2001).

El contenido de DQO corresponde a la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar completamente la materia orgánica y el contenido de SV describe el contenido de materia orgánica en los residuos o en las aguas residuales agrícolas. (Velásquez E., et. al., 2017, p. 41)

En condiciones favorables con materia soluble en agua, se puede lograr grados de conversión cercanos a 100%. Si la materia orgánica corresponde al estiércol bovino hay una conversión aproximada de los SV del 40-50% y de 55-65% para estiércol de cerdo. (Müller, 2003).

Es importante resaltar la capacidad de los estiércoles presentes en las aguas residuales agrícolas que se van a utilizar en el proceso de digestión anaerobia, conociendo su composición y qué componentes se encuentran en mayor medida.

Los sustratos ideales para la digestión anaerobia en biodigestores son los desechos orgánicos húmeros de origen agrícola, industrial, doméstico y municipal, así como las excretas de origen

humano y animal [...] La presencia de nutrientes como carbono, nitrógeno y azufre, así como algunos elementos traza, es necesaria para el desarrollo de las comunidades microbianas encargadas de la producción de biogás (Solano O., et. al., 2009, p. 41)

Figura 11.

Composición nutritiva de estiércoles en materia fresca

Origen del estiércol	m.s. (%)	N Kg/t	P ₂ O ₅ Kg/t	K ₂ O Kg/t	MgO Kg/t	S Kg/t
Vacuno	32	7	6	8	4	-
Equino	35	14	5	12	3	0.9
Porcino	25	5	3	5	1.3	1.4
Ovino	28	15	16	9	4.5	-
Aves	8	2	0.5	3	0.4	-

Nota. Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos.

2017

En la figura 11 se pueden apreciar las características químicas de los diferentes tipos de estiércol, donde el que posee mayor cantidad de nitrógeno es el estiércol ovino, seguido por el equino. El estiércol con mayor cantidad de azufre es el porcino seguido por el equino.

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono es la fuente de energía y el nitrógeno lo utilizan para la formación de nuevas células. Además del nitrógeno, el fósforo también es un macronutriente necesario en el proceso de la digestión anaerobia, la demanda de este corresponde a 1/7 a 1/5 de la demanda de nitrógeno. Otros micronutrientes necesarios en los procesos anaerobios son el hierro, cobalto, molibdeno, selenio, calcio, magnesio, zinc, cobre, manganeso, tungsteno y boro; estos mejoran la producción de metano. (Varnero T., 2011).

- **Relación Carbono/Nitrógeno**

Durante la digestión anaerobia los microorganismos utilizan el carbono entre 25 a 30 veces más rápido que el nitrógeno por lo que necesitan una fracción de carbono y nitrógeno en un rango de 20:1 y 30:1 debido a que en una relación aproximada de 10:1 se da una pérdida de nitrógeno,

mientras que en una relación superior a 40:1 se inhibe el crecimiento de las bacterias por falta de oxígeno. (Flores J., 2010).

Figura 12.

Rangos de niveles de Carbono y Nitrógeno en los diferentes estiércoles de origen animal

Materiales	% C	% N	C/N
Residuos animales			
Bovinos	30	1.30	25:1
Equinos	40	0.80	50:1
Ovinos	35	1.00	35:1
Porcinos	25	1.50	16:1
Gallinas	35	1.50	23:1
Excretas humanas	2.5	0.85	3:1

Nota. Manual de Biogás. 2011.

En la figura 12 podemos concluir que el valor de C/N representa la proporción de carbono disponible que los microorganismos utilizados durante el proceso podrán consumir. Las relaciones anteriores de C/N de los bovinos, porcinos y gallinas, cumplen con el rango teórico para el consumo de los microorganismos y el desarrollo óptimo de la digestión anaerobia. Sin embargo, en el caso del estiércol ovino, como este tiene un valor de C/N de 35:1, la descomposición de los materiales ocurre más lento, debido a que el nitrógeno es el encargado de la multiplicación de las bacterias y en este caso habrá falta de nitrógeno, haciendo que el tiempo para la producción de biogás sea más prolongado. Pero en el caso de las excretas humanas al ser un valor inferior a 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico. (Varnero T., 2011).

Por lo mismo se puede realizar una mezcla de materias orgánicas para mejorar la capacidad en el reactor del consumo de carbono por parte de los microorganismos cuando el estiércol que esté presente en las Zonas No Interconectadas, sea de residuos animales con un porcentaje de C/N bajo comparado con el rango teórico.

- **Humedad**

Según Valdivia (2000) propone para la fermentación los microorganismos metanogénicos requiriendo de suficiente material de carga para que el proceso de digestión no se interrumpa, el

porcentaje más adecuado de contenido en sólidos es del 5% al 10% lo que indica que la biomasa más adecuada es la de alto contenido de humedad.

Figura 13.

Composición de estiércol bovino y porcino

Ganado	% Humedad (%M)	% Sólidos Totales (%ST)	% Sólidos Volátiles (%SV)	% Carbono (%C)	% Nitrógeno (%N)	Relación C/N
Bovino	86	14	80	30,6	1,7	18
Porcino	87	13	77	76	3,8	25

Nota. Plan piloto de biodigestores para el aprovechamiento de las heces de porcino obteniendo biogás y biofertilizante. 2010.

Según Calderón, J. y Aguirre, J. (2019) “El porcentaje de humedad del estiércol bovino es del 83,7%, después de someterlo a una disminución del porcentaje de humedad a través del secado solar, dando como resultados valores entre 50-60% de humedad” (p. 1). Como se ve en la figura 14. Composición de estiércol bovino y porcino, dónde el porcentaje de humedad porcino tiene un valor del 86% aproximadamente.

Además, el porcentaje de humedad de la gallinaza varía entre 40%-60% de humedad (Carhuancho L., et al. 2015). Estos valores demuestran que hay un aumento valioso de producción de metano en el proceso de la digestión anaerobia.

Por otro lado, los estiércol ovino y equino son los que contienen menor cantidad de porcentaje de humedad 38.5% y del 19.5 % respectivamente. Según Tortosa G., et. al (2012) y Valencia D. (2019). Siendo valores bajos para la producción óptima de metano.

- **Factor de generación de biogás**

Otro factor importante para evaluar la capacidad de las aguas residuales agrícolas con estiércol bovino, porcino y avícola es el factor de generación de biogás, el cual representa la capacidad que tiene la materia orgánica proveniente del estiércol en toneladas de producir biogás en m³.

Figura 14.

Factores de generación de biogás para las biomásas residuales estudiadas.

Sector	Unidades	Factor	Fuente
Avícola	Biogás m ³ /t estiércol	60	(CUBA SOLAR, 2017)
Porcino		40	(CUBA SOLAR, 2017)
Bovino	Biogás m ³ /t estiércol	40	(CUBA SOLAR, 2017)

Nota. Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento. 2018.

En la figura 14 podemos apreciar que se pueden producir aproximadamente 60 m³ de biogás por cada tonelada de estiércol avícola y 40 m³ de biogás por cada tonelada de estiércol porcino y bovino. Lo que implica una diferencia notoria entre la capacidad de producción de biogás mediante el estiércol avícola comparado con el porcino y bovino.

- **Compuestos orgánicos degradables biológicamente**

La demanda química de oxígeno, DBO, se define como la cantidad de oxígeno usado por los microorganismos no fotosintéticos a una temperatura de 20°C para metabolizar los compuestos orgánicos degradables biológicamente. (Reyes E. 2017).

Por esto a continuación se presenta la composición química de diferentes materias primas en la figura 15, debido a que la dinámica de producción de biogás será diferente según dicha composición.

Figura 15.

Composición química de los diferentes estiércoles de origen animal

Materia Prima	Lípidos (%)	Proteínas (%)	Celulosa Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Ceniza (%)
Bovino	3,23	9,05	32,49	35,57	19,66
Porcino	11,50	10,95	32,39	21,49	23,67
Aves	2,84	9,56	50,55	19,82	17,23
Equino	2,70	5,00	40,50	35,00	17,80
Ovino	6,30	3,75	32,00	32,00	25,95

Nota. Manual de Biogás. 2011.

Las fuentes carbonadas más utilizadas por los microorganismos quimiotróficos son los glúcidos o carbohidratos. Dependiendo de la composición del estiércol la producción de biogás será mayor o menor, cómo se puede apreciar en la figura 15 los lípidos son los que al ser degradados metabólicamente producen mayor cantidad de m³ de biogás por kg de SV (sólidos volátiles) y mayor cantidad de metano (CH₄) por kg de ST (Sólidos totales). Seguido por las proteínas y en última medida los carbohidratos para la producción de biogás y metano.

Figura 16.

Capacidad producción de biogás y metano (CH₄) según diferentes compuestos orgánicos

Compuesto orgánico	Fórmula química	Biogás m ³ /kg SV	CH ₄ m ³ /kg ST
Carbohidratos	C ₆ H ₁₀ O ₅	0,75	0,37
Lípidos	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	1,44	1,44
Proteínas	C ₁₆ H ₂₄ O ₅ N ₄	0,98	0,49

Nota. Manual de Biogás. 2011.

Las características de estos diferentes tipos de estiércol varían, por lo tanto, no hay uno que cumpla por completo las condiciones para que la producción de metano sea óptima, por ejemplo, el estiércol de ave tiene muy buen factor de generación de biogás. Pero su porcentaje de humedad no es tan alto, además su composición orgánica, en cuanto a lípidos no es muy alta y este compuesto es el que mayor generación de biogás y metano presenta, como se aprecia en la figura 16. Sin embargo, el estiércol de cerdo a pesar de no tener un factor de generación de biogás alto como si lo tiene el estiércol avícola, tiene un porcentaje de conversión de sólidos volátiles alto, igual que el porcentaje de humedad y la relación C/N. Además de ser uno de los estiércoles con mayor cantidad de lípidos y proteínas. Este es seguido por el estiércol bovino que también posee características que pueden favorecer el proceso de digestión anaerobia.

Por otro lado, el estiércol equino y ovino, según las características que fueron descritas anteriormente pueden presentar un tiempo de producción de biogás muy alto, según el valor de C/N siento este muy alto. Además, posee un muy bajo contenido de humedad comparado con otros estiércoles. Sin embargo, su composición orgánica no es muy baja por lo que también puede contribuir en la producción de biogás si se mezcla con otras materias orgánicas.

Por último, las excretas humanas, únicamente al conocer su valor de relación de C/N se puede concluir que el proceso de digestión anaerobia será inhibido, porque hay demasiada cantidad de

carbono y muy poca de nitrógeno, por lo que la cantidad de bacterias presentes en el proceso no podrán digerir la cantidad de carbono. Aquí también se puede inferir que como las aguas residuales agrícolas domésticas que poseen heces humanas no tienen gran capacidad de producción de biogás se recomienda mezclarlas con aguas agrícolas que corresponden a aguas residuales agrícolas con materia orgánica proveniente del estiércol de ciertos animales como lo son el cerdo, caballo, vacas, ovejas y aves. Para aumentar la cantidad de nitrógeno presente en el sustrato ingresado al reactor.

Otra de las problemáticas ambientales es la mala disposición de residuos orgánicos provenientes de actividades agrícolas que terminan siendo desechados en fuentes hídricas, a continuación, se hace un listado sobre las actividades agrícolas que se desarrollan en las zonas no interconectadas de Colombia que cuentan con el servicio de electricidad de cero a cuatro horas representados en la figura 17 y por qué los residuos generados por estas actividades pueden ser aprovechados para la producción de biogás.

El uso de estos residuos es una recomendación para el mejoramiento de la producción de biogás mediante la materia orgánica debido a que de esta manera se puede realizar una codigestión y se aumenta el rendimiento de metano y por lo tanto de biogás.

Figura 17.

Actividades económicas agrícolas de zonas no interconectadas del país con un rango de servicio de electricidad de 0 a 4 horas diarias.

Departamento	Municipio	Localidad	Residuos Agrícolas	Referencia
Amazonas	La Chorrera	Lago Grande	Plátano, yuca	Alcaldía de Paz de Ariporo. (s. f.).
		Providencia		
	La Victoria	Pacoa	La Victoria en la región de Amazonas - Municipio y alcaldía de Colombia. (s. f.).	
	Murindo	Bachibudi	Caña de azúcar, plátano	Insumo para el diseño de inclusión sociolaboral de la población víctima del conflicto. (2015).
Caquetá	Cartagena del Chaira	12 de octubre	Plátano, yuca, maíz, cacao	Desastres, U. N. P. L. G. D. R. (2014). PMGRD. Unidad

Departamento	Municipio	Localidad	Residuos Agrícolas	Referencia
		Arenoso		Nacional Para La Gestión de Riesgos y Desastres.
		Cumarales		
		El Guamo		
		Las animas		
Casanare	Paz de ariporo	Bocas de la Hermosa	Yuca, plátano, maíz, frutas	Alcaldía de Paz de Ariporo. (s. f.).
Cauca	Timbiquí	Almorzadero Bubuey	Caña de azúcar, papa, plátano, maíz	Alcaldía del municipio de Timbiquí. (s. f.).
Chocó	Bajo Baudó	Bella Luz	Maíz, plátano, caña	Alcaldía del Municipio del Bajo Baudó. (s. f.).
	Bojayá	La Boba	Yuca, plátano	Universidad Nacional de Colombia - Vicerrectoría de Investigación - Equipo de comunicaciones (informacion_vri@unal.edu.co). (s. f.).
		Nambua		
		Playa Blanca		
		Puente Alegre		
		Punto Cedro		
	El Litora del San Juan	Bella Victoria	Plátano, maíz, caña	Cortes, A. (2019).
	Medio Baudó	Caimital	Plátano, cacao, yuca	Alcaldía del Medio Baudó. (s. f.).
Charco Azul				

Departamento	Municipio	Localidad	Residuos Agrícolas	Referencia
		Chigorodo-Menba		
		Curundo		
		Dabeiba-Queracito		
		El Cedro		
		El Salto		
		Nuevo Incira		
		Puerto Torreido		
		San Jose de Quera		
	Novita	Alto Valencia	Plátano, maíz, yuca, frutas	Insumo para el diseño de estrategias de inclusión poblaciones del Chocó. (2013).
	Rio Iro	Alto Chato	Cacao	
	Riosucio	Guineo	Caña, café, plátano, yuca	Alcaldía municipal de Riosucio. (s. f.).
		La Nueva		
	Sipi	Barrancon	Maíz, papa, yuca, plátano, frutas	Resultados y proyecciones (2005-2020) del censo 2005. DANE.
	Cacahual	Cacahual	Frutas	Alayón, L. (2020). PROGRAMA DE FORTALECIMIENTO EMPRESARIAL, PRODUCTIVO Y COMERCIAL DE INICIATIVAS
Merey				

Departamento	Municipio	Localidad	Residuos Agrícolas	Referencia
		San Juan		ARTESANALES DE GRUPOS ÉTNICOS DE COLOMBIA.
	Barranco Minas	Arrecifal	Cacao	Alayón, L. (2020). PROGRAMA DE FORTALECIMIENTO EMPRESARIAL, PRODUCTIVO Y COMERCIAL DE INICIATIVAS ARTESANALES DE GRUPOS ÉTNICOS DE COLOMBIA.
Guainía	Mapiripan	Guacamayas	Maíz, cacao, plátano, yuca	Casa Editorial El Tiempo. (2012, 31 mayo). MAPIRIPAN MIRA HACIA EL DESARROLLO. El Tiempo.
	Vista Hermosa	Las Palmeras	Maíz, plátano, yuca, frutas	Alcaldía Municipal de Vista Hermosa. (s. f.)
		Nueva Colombia		
Nariño	Magüi	Cerenil	Aguacate, caña, frutas	Caracterización de las condiciones de salud y laborales de trabajadores del sector informal del Departamento de Nariño. (2011). IDSN.
	Roberto Payan	Cerenil	Plátano, cacao, frutas	
		El Carmen		
		Gualpi La Honda		
		Gunamo		
		Naranjito		
		Muñambi Saunde		
	Santa Bárbara	Agua Clara Sequionda	Café, caña, plátano, maíz, frutas	
		Boca de Matambi		

Departamento	Municipio	Localidad	Residuos Agrícolas	Referencia
		Boca de Ragadero		
		Cortes los Indios		
		El Placer		
		La Laguna		
		La unión		
		Rio San Luis		
Putumayo	Puerto Asís	Buena Vista	Plátano, maíz, yuca, caña	Alcaldía de Puerto Asis. (s. f.).
	Puerto Guzmán		Plátano, maíz, yuca, caña	Alcaldía de Puerto Guzmán. (s. f.).
	Puerto Leguizamo	Cecilia Cocha	Yuca, plátano, maíz, caña, frutas	Roldán, J. D., Ortíz, G. P. & Espíndola, L. A. (2019).
		El Remanso		
		La Concepcion		
		La Quebradita		
	Villagarzón	Bajo Corazón	Yuca, plátano, maíz	Alcaldía de Villagarzón. (s. f.).
Vaupés	Papunaua	Puerto Solano	Yuca, maíz, plátano, frutas	Departamento del Vaupés. Sociedad Geográfica de Colombia. (s.f)
Vichada	Cumaribo	Chaparral	Plátano	Alcaldía del Municipio de Vichada. (s. f.).

Departamento	Municipio	Localidad	Residuos Agrícolas	Referencia
		Chupave		
		El Sejal		
		Puerto Oriente		
	La Primavera	Campoalegre	Yuca, plátano, maíz, caña, frutas	Alcaldía del Municipio de La Primavera. (s. f.).
	Puerto Carreño	Aceitico	Yuca, plátano	Prieto, C. (2021, 5 agosto).
		Garcitas		
		La venturosa		
		Puerto Murillo		

Nota. Representa las actividades económicas agrícolas de zonas no interconectadas del país por municipio y cada localidad.

En la figura 17 se presentan las zonas no interconectadas que contienen actividades agrícolas que pueden generar residuos orgánicos de alimentos como plátano, maíz, yuca, caña de azúcar, cacao, café y aguacate. Para luego mediante una revisión bibliográfica definir porqué las aguas que contienen este tipo de residuos pueden ser aprovechadas para la producción de biogás.

Figura 18.

Características relevantes para la producción de biogás de algunos productos agrícolas.

Residuo	Humedad (%)	SV (%)	C/N	ST (%)	Rendimiento	Referencia
Plátano	75.65	80.52	-	24.35	70% de metano en biogás	Guayazan, D. (2019).
Yuca	13		20:1		200 L de biogás por	
Cáscara cacao	79	84		21	167.47 litros de metano por kg de SV	Sarmiento, S., & Jael, A. (2019)
Bagazo de caña	16.1	74.6			128 mL por g de SV	Guerrero, O. (2017)
Cachaza de caña	69.6	19.1			171 mL por g de SV	
Vinaza	67-83.3	12	12:1		674.5 mL por 400 mL de sustrato	
Maíz		1.7	34.6	88.7	36.7 L de biogás por 3 L de sustrato	Palavecino, A., Herrera, A., Sanchez, M., & Sogari, N. (2019).

Nota. Representa las características relevantes de ciertos productos agrícolas para la producción de biogás.

1. **Plátano:** En Colombia, el plátano es de gran importancia para el sector socioeconómico del país, aproximadamente generando una producción del 87% (Castellanos F., Lucas L., 2011). Según Quijano., et al. (2020) cerca del 95% de los residuos orgánicos que se generan en los cultivos de plátano no son aprovechados eficientemente por el cultivador, ya que su producción se basa principalmente en la comercialización o como opción alimenticia, por lo que después de usar el fruto destinan lo restante (vástago y plátano descartado) como abono para la cosecha. Por lo que la degradación anaerobia de materiales orgánicos como los residuos de los cultivos

de plátano puede ser una muy buena opción para la producción de energía, por medio del biogás. Según Guevara C., et. al. (2015) Se producen 93,6 L de biogás que corresponden a 65,5 L de metano (70% de metano en biogás). Por tanto, el rendimiento es del 30%.

Las características del plátano presentadas en la figura 18 indican que el plátano cumple con los rangos requeridos para la digestión anaerobia, en este caso el porcentaje de sólidos volátiles es del 80,52% corresponden a componentes orgánicos que pueden ser degradados y convertidos a metano. El porcentaje de humedad 75,65%, demuestra que este material es un sólido húmedo, permitiendo la alta actividad microbiana dentro del biodigestor. (Quijano D., y Ramirez L., 2020)

2. Yuca: Es considerada como un cultivo de subsistencia, debido a su alta capacidad de adaptación a suelos ácidos, infértiles, también tiene alta resistencia a plagas y malezas. Además de crecer en temperaturas superiores a 20°C. En Colombia es un alimento básico, debido a su alta calidad nutricional, pero lo más importante es que su raíz tuberosa es una fuente de almidón, cerca del 90% de su peso seco son carbohidratos. (El-Sharkawy M., 2004).

La relación carbono/nitrógeno de la cáscara según la figura 18 corresponde al rango para el consumo de los microorganismos que debe estar entre 20: 1 entre 30:1, debido a que los microorganismos consumen el carbono en mayor medida que el nitrógeno. El porcentaje de carbono y el nitrógeno también es importante para la alimentación de las bacterias metanogénicas, sin embargo, el porcentaje de humedad es bajo, por lo tanto, puede afectarse la actividad microbiana esta va ligada con la relación agua/residuos, donde una cantidad de agua más alta respecto a los residuos garantizará una buena eficiencia. Es aquí donde es importante generar una codigestión con distintos residuos orgánicos para incrementar la producción de biogás.

El pH también se encuentra entre el rango, debido a que es un valor de 6 según Arenas D., (2019) muy cercano a la neutralidad que es el valor óptimo para la producción de metano.

3. Cáscara de cacao: Esta industria es una de las más importantes del país, pero el principal residuo es la cáscara, la cuál es arrojada como abono a los diferentes cultivos, pero esto también puede traer como consecuencia la proliferación del hongo *Phytophthora*. Sin embargo, según Sarmiento J., (2019) se hizo una experimentación para la generación de metano, concluyendo que la mejor combinación es un sustrato combinado 50% estiércol de vaca y 50% cáscara de

cacao, y así se generó una producción de 1072 ml de metano y un rendimiento de metano de 167,47 l/kg de sólidos volátiles.

Las características de la cáscara de cacao presentadas en la figura 18 indican las mismas características evaluadas en el plátano, con esto podemos concluir que cumple con los rangos requeridos para la digestión anaerobia, en este caso el porcentaje de sólidos volátiles es del 84% corresponden a componentes orgánicos que pueden ser degradados y convertidos a metano. El porcentaje de humedad del 79% haciéndolo un material húmedo, capaz de permitir la actividad microbiana.

Según Villavicencio A., et al. (2017) se demostró que el valor más alto de poder calorífico del biogás generado por los residuos de cacao fue de 17,24 MJ/Kg, además de un tiempo de retención de 30 días.

4. Caña de azúcar: El proceso de producción de azúcar y bioetanol a partir de la caña, genera grandes cantidades de residuos como vinaza que a partir de la digestión anaerobia tiene la capacidad de producir metano. Además de la vinaza también se puede aprovechar otros residuos agroindustriales como el bagazo, la cachaza y los residuos de cosecha. (Robles V., y Villalobos F., 2008)

A pesar de que la vinaza y la cachaza tienen porcentajes de humedad altos, sus valores de sólidos volátiles son muy bajos para una digestión anaerobia óptima, además según Janke, et al. (2015) la relación C/N de la vinaza es de 12:1, siendo muy baja también entre el rango admitido para un consumo de carbono óptimo para los microorganismos. Sin embargo, al igual que el bagazo por su bajo contenido de humedad, es posible realizar codigestión de estos residuos con otros residuos orgánicos para mejorar la eficiencia.

Según Otero O., (2017) las vinazas son buenas fuentes de generación de gas, así mismo la combinación de mieles y vinazas sería muy útil dentro de un proceso industrial de producción de biogás. Pero para conocer las características específicas de los residuos generados en la industria del azúcar es necesario generar pruebas en laboratorios que simulen el proceso de producción de biogás a gran escala, debido a que las características y la capacidad de dichos residuos de generar biogás, dependen en gran medida del ingenio azucarero del que vengan y de los procesos industriales que se realizaron.

Según Ariza. D., et al. (2020) por medio del uso de vinazas para la producción de biogás se obtienen valores de 674,5 mL durante 8 días, con un volumen de trabajo de 400 mL.

5. Maíz: Según Palavecino A., et. al. (s.f) a mayor contenido de maíz, mayores los volúmenes de biogás y metano liberados, en un proceso de codigestión con estiércol vacuno. A continuación, se presentan datos relevantes asociados a la producción de biogás, el porcentaje de materia orgánica que puede ser consumida es alta, según Martín J., et. al. (2016) Al triplicar la cantidad de sólidos totales el aumento de producción de biogás es de 67,4%, pero sin embargo la cantidad de estos sólidos totales no es lineal con el aumento en la producción de biogás. A pesar de esto un valor alto de ST puede favorecer la producción de este, sin embargo, los sólidos volátiles del maíz no tienen alto porcentaje, es aquí donde es importante una codigestión con diferentes residuos para así mejorar la capacidad de producción. De igual manera el valor de C/N también se encuentra entre el rango aceptable para el consumo de carbono de los microorganismos respecto al nitrógeno según la figura 18.

Según Palavecino A., et. al. (s.f.) con un agregado gradual de maíz al 1%, 5% y 10% aumentó la producción volumétrica de biogás en relación con el control. En cuanto a su composición esta se ve enriquecida en metano con el agregado gradual de maíz. Además, el rendimiento del proceso utilizando estiércol vacuno se puede ver optimizado con el agregado de cosustratos ricos en Carbono como el maíz, en proporciones definidas para complementar deficiencias nutricionales del sistema. Al medirse la composición de biogás, se obtuvo un volumen de biogás de 36,7L con un 1% de sólidos totales de sustrato, con un volumen de trabajo de 3 L y un tiempo de retención de 57 días, además de agitación constante, el aumentar la cantidad de sustrato (maíz) el rendimiento aumento hasta un 67,9 L de volumen de biogás.

6. Frutas: Según Martínez W., et. al. (2012)

El potencial de producción de biogás de los residuos de frutas, evaluado en sesenta días, fue de 560 ml de biogás por gramo de Sólido Volátil, con un contenido de metano del 65%, en promedio. Esto representa un potencial energético de 4.5kW-h por kg de sólidos volátiles digeridos. (p. 97)

Por lo tanto, el uso de residuos de frutas puede ser una alternativa muy efectiva para la producción de biogás, por medio de la codigestión anaerobia. Sin embargo, es importante realizar una selección de las frutas según su contenido nutricional y su relación

carbono/nitrógeno, para asegurar el crecimiento de los microorganismos en diferentes medios. Si se realiza una codigestión es importante realizar una formulación de proporciones con el estiércol y agua seleccionadas. (García M., Gómez J., 2016)

Según García, A., et al. (2016) para la mezcla de frutas de uva, sandía, piña, melón y mango el volumen del biogás fue de 2,61 m³ y para la mezcla de verduras de espinaca, remolacha, tomate, apio y calabaza el volumen fue de 3,9 m³ por un tiempo de 45 días aproximadamente.

7. Aguacate: Según Orrego C., Cardona C., (2020)

La semilla y cáscara de aguacate se emplean para generar biogás a través de un proceso de codigestión húmeda. El rendimiento de biogás de la semilla y cáscara es de 201 L/kg y 28 L/kg respectivamente. A partir de estos valores se concluye que la semilla de aguacate tiene un potencial de generación de biogás 7 veces mayor que la cáscara. Lo anterior es debido al alto contenido de almidón presente en la semilla de aguacate. (p. 66)

8. Café: La pulpa de café presenta un alto potencial de aprovechamiento gracias a su variada composición química, viéndose reflejado en la diversidad de alternativas existentes para su reutilización (Quinchía Y., et. al. S.f.).

Según (Balseca C., et. al. 2011) la pulpa de café produce 128 L de biogás por kg de sustrato, la pulpa de café tiene una relación de carbono/nitrógeno de 20:1 (Auxiliadora, A., Zelaya, J. 2015), sin embargo varias investigaciones recomiendan el uso de estiércol vacuno, debido a que la pulpa de café no contiene una población de bacterias metanogénicas, que son las responsables de la descomposición de la materia orgánica para la producción de gas, por esta razón se debe hacer un inóculo, con estiércol, porque este si tiene un alto contenido de bacterias. (Olvera D., Gutierrez I. 2010)

5. DEFINICIÓN DE LA ESTRATEGIA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR MEDIO DE AGUAS RESIDUALES

Para la generación de biogás por medio de aguas residuales agrícolas es recomendable realizar la digestión anaerobia por medio de la codigestión, debido a que cada zona interconectada posee diferentes actividades económicas, además el uso de diferentes sustratos puede mejorar la producción de biogás, ya que se complementan con diferentes características relevantes para los microorganismos utilizados durante el proceso.

Es importante aclarar que la codigestión anaerobia según Giraldo, Y., Ortiz M., (2018)

Es la degradación de dos o más residuos mediante el proceso de digestión anaerobia aprovechando la complementariedad de la composición química de los residuos usados; la digestión en su mayoría contribuye a procesos más estables y un incremento en la producción de biogás. (p. 39)

El proceso de digestión anaerobia en todos los sistemas es similar, sin embargo, en el proceso de diseño y construcción del biodigestor se encuentran varias opciones en cuanto a temas de tecnologías; ya que cada una atiende a necesidades diferentes. Por lo que en este capítulo se busca establecer la mejor estrategia para implementar un biodigestor por zona rural no interconectada, es decir un centro de acopio y que su finalidad sea la producción de energía eléctrica debido a que son lugares que no están conectados a la red de energía del país.

1. Elección del sustrato: El sustrato orgánico escogido, como se describió anteriormente serán las aguas residuales agrícolas que contengan excrementos de animales y/o residuos orgánicos debido a las diferentes actividades económicas que se realizan en las zonas no interconectadas de Colombia.
2. Localización de la fosa para enterrar el biodigestor: Se excava una fosa con el fin de utilizarse como un aislante térmico para el reactor, además de así proteger los materiales constituyentes de este.

Esta fosa debe estar en suelo firme, donde las paredes no se derrumben y no haya elementos como rocas cortantes o restos de raíces. Se debe cubrir el suelo con algún tipo de material que brinde protección a la membrana y al biodigestor, evitando rajadoras y daños (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura, 2019).

Además, se debe instalar cerca de los corrales dónde se encuentren los animales o los baños humanos; para que la conducción de esta sea fácil por medio de tuberías. Se debe tener cerca también una fuente de agua.

Es conveniente también que el resultante del proceso, es decir el digestato, que se va a utilizar para la fermentación esté cerca de los suelos o cultivos correspondientes para facilitar el proceso. (Botero R., Preston T., 2009)

3. Elección del biodigestor: En este caso para el propósito de producción de biogás por medio de aguas residuales agrícolas se va a escoger el biodigestor tipo Taiwanés o Tubular, que según varias fuentes como Forget A., (2011) y Alvarez R., Vilea S., y Lidén G. (2008) coinciden en que es el modelo que se adecua a las condiciones geográficas y ambientales de América Latina, además, este tipo de digestores es el de más alta eficiencia, menor costo, mayor facilidad de instalación manejo, mantenimiento y reparación. Además, según Boutgalli et al. (2003) este reactor es recomendado cuando se tiene como sustrato residuos agrícolas o de alimentos con un tiempo de retención aproximado de 20 días y una producción de biogás de 707 ml por gramo de SV.

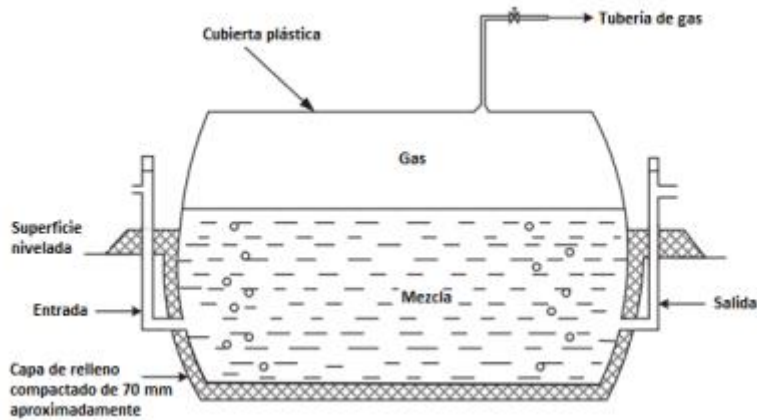
Este biodigestor se va a realizar a pequeña escala, debido a que estos son los adecuados para hogares o pequeñas comunidades agrícolas, como lo son estas zonas analizadas previamente. Según Tauseef M., Premalatha T., (2013) este tipo de digestor combina la cámara de digestión, el tanque de sedimentación y el gasómetro en una sola unidad. El sustrato no debe ocupar todo el volumen del digestor, ya que debe quedar un espacio restante para el gas. A medida que la bolsa se llena, el gasómetro se va llenando.

Como se ve en la figura 19 este biodigestor se alimenta diariamente por la parte de la entrada con la mezcla adecuada de agua y los residuos orgánicos correspondientes. Este consiste en un fermentador y cámara de almacenamiento de biogás en forma tubular hecha en polietileno en capa doble o de geomembrana de PVC, el cual va a ser instalado horizontalmente en una zanja excavada en el suelo, ya que, como se dijo anteriormente funciona como aislante térmico. También tiene un tubo de salida del efluente (digestato), y un tubo en la parte superior para la salida del biogás. (García R., et. al. 2017)

Es importante agregar una válvula de seguridad, que evite la ruptura por la presión cuando hay una producción excesiva de biogás.

Figura 19.

Digestor Tubular



Nota. Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región Piura. (2017)

Los componentes relevantes para la producción de biogás se presentan en la figura 20, con su respectiva descripción y función.

Figura 20.

Componentes del biodigestor tipo tubular o Taiwanés

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

Nota. Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región Piura. (2017)

Sin embargo, para la codigestión de elementos como residuos orgánicos y el estiércol de los animales según Alzate et. al. (2003) es recomendable el uso de un reactor empacado UASB, este

posee un volumen de 4.5 a 19.4 L de volumen, con un tiempo de retención de 118 días y una producción de metano de 183 a 372 ml por gramo de SV y una producción de biogás de 131 a 310 ml por gramo de SV. Este reactor no requiere oxígeno al ser un proceso anaerobio, por lo tanto, no hay consumo eléctrico asociado con la aireación, también es particularmente apto para tratar aguas residuales con elevada concentración de materia orgánica según IB Tech (s.f).

4. Dimensionamiento del biodigestor: El tamaño depende de la cantidad, calidad, el tipo de sustrato que se va a utilizar y la temperatura de trabajo, la cual depende de la temperatura ambiente de la zona donde se va a instalar el biodigestor, estas temperaturas de trabajo se pueden ver en la figura 21, según la temperatura promedio ambiente de la zona no interconectada.

Figura 21.

Temperatura de trabajo del biodigestor según la temperatura ambiente correspondiente a la zona no interconectada.

Región	Temperatura ambiente	Temperatura de trabajo	Altura sobre el nivel del mar (m)
Altiplano	-12 a 20°C	6-16°C (con invernadero)	2900-4500
Valle	5-30°C	15-20°C	1800-2900
Trópico	13-38°C	25-30°C	0-1800

Nota. Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región Piura. (2017)

Es importante conocer la cantidad exacta de materia orgánica con la que se cuente, la disponibilidad de estas según las diferentes actividades económicas de cada zona no interconectada, para así poder calcular el dimensionamiento del reactor que le convenga a cada comunidad.

Para el estiércol de animales, es importante conocer la cantidad de animales por cada especie y la capacidad de generación de estiércol por día. Para los diferentes alimentos que se cultivan y que sirven como sustento para muchas familias, se conoce la cantidad de residuos que se generan, por medio de las plantas que se han cultivado y las que se han talado para venta o consumo. Por último, se debe considerar la cantidad de agua requerida para preparar la mezcla de digestión según la cantidad de residuos orgánicos y de estiércol de animales, por medio de esta relación se puede calcular el volumen de carga diaria que va a ingresar en el biodigestor.

Figura 22.

Fórmula Volumen del biodigestor

$$V = \frac{\varphi odm}{VL}$$

Nota. Estudio y diseño de un biodigestor para la aplicación en pequeños ganaderos y lecheros. 2010

Donde:

V: Volumen requerido del biodigestor

φodm : Flujo de materia orgánica seca diaria [kg/d]

VL: Carga volumétrica considerada [$\frac{kg}{m^3*d}$]

Lo siguiente es el Tiempo de Retención Hidráulica, este depende de la temperatura, mientras esta sea mayor, el tiempo de retención o de fermentación es menor. Según (Diseño de un biodigestor, s.f.) para una planta simple, el tiempo de retención mínimo es de 40 días aproximadamente, sin embargo, entre 60 y 100 días, se puede conseguir una mayor producción de biogás, aproximadamente de un aumento de 40%.

Figura 23.

Fórmula volumen del reactor

$$\frac{V_r}{V_{cd}} = TRH$$

Nota. Diseño del biodigestor. S.f.

Donde Vr: Volumen del reactor

Vcd: Volumen de carga diaria

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico

6.CONCLUSIONES

Se definió el proceso de obtención de biogás por medio de la digestión anaerobia de aguas residuales en Colombia, conociendo las condiciones para este proceso, los microorganismos utilizados, el marco legal en Colombia y qué beneficios puede traer a la sociedad actual la adopción de este proceso para la generación de energía.

Se consolidó información sobre la producción de biogás por medio de la materia orgánica proveniente de aguas residuales en Colombia, debido a un análisis según el Censo Pecuario Nacional, dónde se estableció la cantidad de estiércol generado, cuya materia orgánica puede ser aprovechada para la producción de biogás.

Se identificaron las necesidades sociales y ambientales que pueden ser atendidas mediante la producción de biogás, por medio de la digestión anaerobia en zonas rurales de Colombia, tomando en consideración las zonas rurales denominadas Zonas no Interconectadas, contribuyendo a la producción de energía eléctrica por medio del biogás, en las comunidades que cuentan con el sistema de energía eléctrica menos de 4 horas durante el día. Además, de generar una contribución ambiental ya que puede ser una solución para mejorar la disposición de aguas contaminadas con materia orgánica proveniente de estiércol de animales y que el proceso puede mejorarse por medio de una codigestión con residuos orgánicos.

Se concluyó que la mejor estrategia para generar el biogás es por medio de un centro de acopio, dónde se pueden recaudar las aguas residuales de las diferentes comunidades con carga de materia orgánica, y que el reactor conveniente según bibliografía es el reactor tubular, debido a que es el adecuado para las condiciones geográficas de América Latina y el biodigestor UASB ya que, también se recomienda para la digestión de aguas residuales con materia orgánica.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, M., & Pasqualino, J. (2014). Potencial del uso de Biogás en Colombia. *Revista TEKNOS. Fundación Universitaria Tecnológico Confenalco.14* (2), pp. 27-33. <https://www.Dialnet-PotencialDeUsoDeBiogasEnColombia-6382641.pdf>
- Acosta, Y., y Obaya, M. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. *Revista ICIDCA. Instituto Cubano de Investigaciones de los derivados de la Caña de Azúcar. X*(1), pp. 35-48. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>
- Alfárez, L. E., & Nieves, N. (junio de 2019). Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): impacto ambiental. Eumed.net. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/06/tratamiento-aguas-residuales.html>
- Andrade, A., Restrepo, A., & Tibaquirá, J. E. (2018). Vista de Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia. *Revistas UCP. 12* (12) pp. 40-47. <https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/view/11/10>
- Andrade, C., Corredor, A., Buitrago, L., & Lache, A. (2017). Procesos bioquímicos utilizados para la producción de bioetanol, biodiésel y biogás y su estado en Colombia. Semilleros Formación Investigativa. *Repositorio Fundación Universidad de América. pp. 101-117* <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6444/1/COL0038496-2017-1-IQ.pdf>
- Asís, H., Dopazo, F., & Gianoglio, P. (s. f.). Producción de energía a partir de biogás obtenido de residuos sólidos urbanos. Edutecne. http://www.edutecne.utn.edu.ar/cytal_frvm/CyTAL_2012/TF/TF019.pdf
- Bedoya, O., Sousa L. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo UASB. *Revista VirtualPro, 7*(2), 24-31. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S169235612009000200004&script=sci_abstract&tlng=es
- Bernal, D., & Quintero, D. (2016). Desarrollo de una propuesta para la mejora de un modelo de biodigestor anaerobio convencional a escala banco a partir de una mezcla de residuos bovinos y lodos en la finca el recodo de tabio, cundinamarca. (Tesis de grado) Repository

- Uamerica. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/819/1/6112726-2016-2-IQ.pdf>
- Bernal, J., & Orozco, J. (2019). Comparación del estiércol bufalino y bovino como potenciales inóculos en el proceso de digestión anaerobia. Repositorio UPB. <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/8441/39175.pdf?sequence=1#:~:text=2.2.1.1%20Esti%C3%A9rcol%20de%20Vaca&text=La%20biomasa%20residual%20bovina%20presenta,crecimiento%2C%20dieta%2C%20entre%20otras>.
- Biogás en ganadería. (s. f.). Emison. <https://www.emison.com/biogas%20ganaderia.htm>
- Berschkov, V. (2017). Biogas, biodiesel and bioethanol as multifunctional renewable fuels and raw materials. Intech. Chapter 10. 185-205. <https://www.intechopen.com/chapters/52663>
- Bustos, J. F., Sepulveda, A. L., & Triviño, K. (2014, marzo). Zonas no interconectadas eléctricamente en Colombia: problemas y perspectiva. <http://www.fce.unal.edu.co/publicaciones/images/documentos-econografos-economia-65.pdf>.
- Carhuacho, F., Guerrero, J., & Ramirez, J. (2012, 17 noviembre). Aprovechamiento del estiércol de gallina para la elaboración de biol en biodigestores tipo batch como propuesta al manejo de residuo avícola. Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente. <http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/01/16.pdf>
- Carhuacho, F., Ramírez, J., & Guerrero, J. (2014, 8 julio). Gestión Ambiental de residuos avícolas mediante digestión anaerobia para la producción de fertilizantes orgánicos líquidos. Dialnet. <file:///C:/Users/Asus/Downloads/Dialnet-GestionAmbientaldeResiduosAvicolasMedianteDigestio-6171075.pdf>
- Castellanos, F. J., & Lucas, L.C. (2011). Caracterización física del fruto en variedades de plátano cultivadas en la zona cafetera de Colombia. Revista bdigital, 60. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/27847/28115
- Cendales Ladino, Edwin Dario. (2011). Producción de biogás mediante la digestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/4100/>

- Conil, P. (1989, 1 enero). Biodigestores para lodos de palma: la experiencia colombiana | Revista Palmas. Centro de Información y Documentación Palmero. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/view/220>
- Corrales, L., Antolinez, D., Bohórquez, J., & Corredor, A. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. Scielo. <http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v13n24/v13n24a06.pdf>
- Corrales, L., Romero, D., Bohórquez, J., Corredor, A. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702015000200007
- D. (s. f.). Diseño del Biodigestor. En Biodigestores (1.^a ed., Vol. 1, pp. 119–147). Espe. <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/308/9/T-ESPE-026444-5.pdf>
- Dalpaz, R., Konrad, O., Cyrne, C., Barzotto, H., Hasan, C., Filho M. (2020). Using biogas of energy cogeneration: An analysis of electric and termal energy generation from agro-industrial waste. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138820300953>
- Decreto 1898 de 2016 - EVA - Función Pública. (2015, 1 diciembre). GOV.CO. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78173>
- Durazno, A. (2018, abril). Valoración de estiércol bovino y porcino en la producción de biogás en un biodigestor de producción por etapas. Repositorio Universidad Politécnica Salesiana. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/15445/1/UPS-CT007585.pdf>
- Eastman, J., & Ferguson, J. (1981). Solubilization of particulare organic carbon during the acid pase anaerobia digestion. *Wat Pollut Control Fed* (53) <https://www.jstor.org/stable/25041085>
- Echaendia, A., & Menoyo, A. (1990). Compostaje de Gallinaza en un sistema dinámico abierto. Congreso Internacional de Química (p. 431-438). Tenerife: ANQUE. <https://www.fao.org/3/i3531s/i3531s.pdf>
- Ferrer, Yoandy, Pérez, Heidy. (2010). Los microorganismos en la digestión anaerobia y la producción de biogás. Consideraciones en la elección del inóculo para el mejoramiento de

- la calidad y el rendimiento. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 43(1),9-20. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=2231/223120681002>
- Flores, J. (2010). Plan piloto de biodigestores para el aprovechamiento de las heces de porcino obteniendo biogás y biofertilizante. Universidad De Las Américas, 20-70. Quito, Ecuador: Facultad de Ingeniería Agroindustrial y de Alimentos. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2794880>
- García, A., & Gómez, J. (2016). Evaluación de la producción de biogás a partir de residuos vegetales obtenidos en la central de abastos de Bogotá mediante digestión anaerobia. Repositorio Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/667/1/6112733-2016-2-IQ.pdf>
- García, M., & Perez, J. (s. f.). Aguas residuales. Composición. USAL. https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf
- Giraldo, Y., & Ortiz, M. (2018). Producción de biogás a partir de la digestión de biomasa residual en un sistema de digestión anaerobia con agitación a escala laboratorio. Repositorio Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6933/1/6131041-2018-2-IQ.pdf>
- Gobierno de Chile Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, & Global Environment Facility. (2011). Manual de Biogás (Libro electrónico ed., Vol. 1). Proyecto CHI/00/G32 “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”. <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Grupo de investigación en procesos químicos y bioquímicos de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia y Centro de Desarrollo Industrial Tecsol. (2018, febrero). Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento. Repositorio UPME-UNAL. <https://bdigital.upme.gov.co/jspui/bitstream/001/1317/1/Informe%20final.pdf>

- Guerrero, O. (2017). Evaluación del potencial de producción de biogás a partir de residuos agroindustriales de la caña de azúcar. Repositorio Universidad ICESI. https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/82464/1/TG01758.pdf
- Guo, G., Cao, W., Sun, S., Zhao Y., Hu, C. (2017). Nutrient removal and biogas upgrading by integrating fungal-microalgal cultivation with anaerobically digested swine wastewater treatment. *Journal Apply Phycol.* https://www.researchgate.net/publication/318291093_Nutrient_removal_and_biogas_upgrading_by_integrating_fungal-microalgal_cultivation_with_anaerobically_digested_swine_wastewater_treatment
- Hernández, S., Jiménez, L., Bueno, J. (2018) Potential of energy production from slaughterhouse wastewater. *Interciencia* 43(8), 558-565. <https://www.redalyc.org/journal/339/33957744004/html/>
- Iglesia, J., Caballero, A., Romero, E. (2016). Metodología para obtención de biogás a partir de residuos de cosechas del arroz utilizando como inóculo aguas residuales. *Revista científica Avances*, 18(4), 325-333. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6210108>
- IPSE. (2014, julio). Soluciones Energéticas para las zonas no interconectadas de Colombia. Ministerio de Minas y Energía. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/742159/09C-SolucionesEnergeticasZNI-IPSE.pdf/2871b35d-eaf7-4787-b778-ee73b18dbc0e>
- Julio, I. C., Peláez, C. A., & Molina, F. J. (2016, 8 enero). Evaluación de la co-digestión anaerobia de lodos de aguas residuales municipales con residuos de alimentos. Biblioteca digital UDEA. http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/12834/1/JulioIleana_2016_Evaluacioncodigestionanaerobia.pdf
- Karp, G. (2005). *Biología celular y molecular*. México: McGraw-Hill. <https://www.cib.csic.es/es/departamentos/biologia-celular-y-molecular>
- Kuglarz, M., Karakashev, D., Angelidaki, I. (2013). Microwave and thermal pretreatment as methods for increasing the biogas potential of secondary sludge from municipal wastewater

- treatment plants. *Bioresource Technology* 134, 290-297. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/24/9141/htm>
- Lemma, B., Ararso, K., Evangelista, P. (2020). Attitude toward biogas Technology, use and prospects for greenhouse gas emission reduction in Southern Ethiopia. *Journal of cleaner production*. s.pp. <https://onx.la/f14bc>
- Li, N., Hu, Y., Lu, Y., Zeng, R., Sheng, G. (2016). In-situ biogas sparging enhances the performance of an anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) with mesh filter in low-strength wastewater treatment. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27003270/>
- Lorenzo, Yaniris y Obaya, Ma. Cristina (2006). La digestión anaerobia y los reactores UASB. Generalidades. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XL (1), 13-21. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223121549002.pdf>
- Martín, J., Esteves, A., & Manrique, S. (2016). Influencia del porcentaje de sólidos en la producción de biogás a partir de Guano Caprino. *Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/upload/Biblio/1857-5614.pdf>
- Minvivienda. (2021, 9 marzo). Plan Nacional Sectorial. Agua potable y Saneamiento Básico. Gobierno Nacional de Colombia. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/2021-03/9.-plan-nacional-sasbr-vf.pdf>
- Minale, M., Worku, T. (2012). Anaerobic co-digestion of sanitary wastewater and kitchen solid waste for biogas and fertilizer production under ambient temperature: waste generated from condominium house. *Journal Environment Science Technology*. <https://onx.la/a2a27>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021, octubre). Proyecto: desarrollo de capacidades en el uso seguro de aguas residuales para agricultura. https://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/356/mod_page/content/128/Colombia_Informe%20Nacional.pdf
- Ministerio de Medio Ambiente (2011). Informe del Estado del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables 2010. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia. ISBN: 978- 958-8067-35-3. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022651/InformeTomo3.pdf>

- Morales, C., & Mejía, C. A. (2015). Evaluación del desempeño de un biodigestor para el tratamiento de la mezcla agua-mucílago de café obtenidas por desmucilagador mecánico. Umanizales. <https://onx.la/6a63a>
- Moreno, M. (2011). Manual de biogás. Santiago de Chile. <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>
- Mosos, W., Cadavid, L., & Agudelo, A. (2012). Potencial de biogás de residuos de frutas y verduras provenientes de restaurantes de Palmira. Acta Agronómica del Departamento de Ingeniería. Recuperado 26 de enero de 2022, de <https://www.Users/Asus/Downloads/41478-Texto%20del%20art%C3%ADculo-187437-2-10-20140108.pdf>
- Müller, H. B. (2003). Methane productivity and nutrientn recovery from manure. Technical University of Denmark, PhD thesis, BioCentrum - DTU. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20833742>
- Nabarlantz, D., Beltrán, L., Herrera, D., Niño, D. (2013). Biogas production by anaerobic digestion of wastewater from palm oil mil industry. Latinoamérica journal of oil & gas and alternative energy, 5(2), 73-84. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0122-53832013000100006&script=sci_abstract&tlng=pt
- Nour, H. A., Nour, H. A. (2017). Production of biogas and performance evaluation of ultrasonic membrane anaerobic system (UMAS) form palm oil mil effluent treatment (POME). Biological wastewater treatment and resource recovery (pp.229-243). <https://www.intechopen.com/chapters/54415>
- Mosos, W., Cadavid, L., & Agudelo, A. (2012). Potencial de biogás de residuos de frutas y verduras provenientes de restaurantes de Palmira. Acta Agronómica del Departamento de Ingeniería. Recuperado 26 de enero de 2022, de <https://www.Users/Asus/Downloads/41478-Texto%20del%20art%C3%ADculo-187437-2-10-20140108.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. (2019). Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores. Probiomasa. Recuperado 25 de febrero de 2022, de http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf

- Orrego, C., & Cardona, C. (2020). Informe técnico sobre propuestas de desarrollo de biorefinerías a partir del uso de residuos de cosecha, postcosecha e industrialización de la fruta fresca, para su aprovechamiento en la producción de energía u otros subproductos. Productividad y competitividad frutícola Andina. Recuperado 26 de enero de 2022, de https://www.fontagro.org/new/uploads/productos/16111_-_Producto_12.pdf
- Osorio, F., Torres, J.C. (2008). Biogas purification from anaerobic digestion in wastewater treatment plant for biofuel production. *Renewable Energy* 34(10), 2164-2171. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148109000901>
- Pacco, A., Vela, R., Miglio, R., & Quipuzco, L. (2018). Propuesta de parámetros de diseño de un reactor UASB para el tratamiento de aguas residuales porcinas. Scielo. Recuperado 30 de noviembre de 2021, de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2077-99172018000300009
- Padilla, A., & Rivero, J. (2016). Producción de biogás y compost a partir de residuos orgánicos recolectados del Complejo Arqueológico Huaca de la Luna. *Ciencia y Tecnología*. <https://www.Users/Asus/Downloads/1358-Texto%20del%20art%C3%ADculo-3876-1-10-20170421.pdf>
- Palavecino, A., Herrera, A., Pinto, M., & Sogari, N. (s. f.). Rendimiento en la producción de biogás a partir de la digestión anaeróbica de estiércol vacuno y maíz. *Revistas UNNE*. <file:///C:/Users/Asus/Downloads/3769-12165-1-PB.pdf>
- Parra, B., Torres, P., Rebellón, L., Cárdenas, L., Vásquez, F., Torres, W., y Ordóñez, J. (2012). Anaerobic co-digestion of organic wastes. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 11(4), 325-341. doi:10.1007/s11157-012-9277-8. https://www.researchgate.net/publication/235942288_Anaerobic_co-digestion_of_organic_wastes_Rev_Environ_Sci_Biotechnol
- Phukingngam D., Chavalparit O., Somchai D., Ongwandee M. (2011). Anaerobic baffled reactor treatment of biodiesel-processing wastewater with high strength of methanol and glycerol: reactor performance and biogas production. *Chemical papers* 65(5), 644-651 <https://onx.la/655ea>

- Pinzón A., M.C. (2004). Biblioteca ilustrada del campo: Abonos orgánicos biodigestores-biopreparados-humus-suelos. Editorial Enlace Cultural. https://www.profitecnicas.com/libro/biblioteca-ilustrada-del-campo-abonos-organicos-biodigestores-biopreparados-humus-suelos_58041
- Posada, L. y Mosquera, S. (2007). Biodegradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales de una empresa de pinturas (Proyecto de grado). Universidad EAFIT, Colombia. <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/362>
- Producción de biogás a partir del estiércol de ganado. (s. f.). Unas.edu. <https://onx.la/cd9bf>
- Quijano, D., & Ramirez, L. (2020). Determinación de la factibilidad de los residuos orgánicos producidos por los cultivos de plátano en el uso como co-sustrato con excretas porcinas para la generación de biogás. Repositorio Universidad Santo Tomás. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/27908/2020dianaquijano.pdf?sequence=9>
- Rahman, W., Khan, M., Khurshid, B., Khan, M., Halder, G. (2020). Anaerobic digestion of toluene-laden wastewater under oxygen-deficient mesophilic condition and concurrent retrieval of methane-enriched biogas. Biomass Conversion and Biorefinery. https://www.researchgate.net/publication/346089349_Anaerobic_digestion_of_toluene-laden_wastewater_under_oxygen-deficient_mesophilic_condition_and_concurrent_retrieval_of_methane-enriched_biogas
- Ramírez, G. (1983). Compostaje y uso de residuos orgánicos en Costa Rica. Roma, Italia: FAO. 352-366 <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v32n1/0379-3982-tem-32-01-39.pdf>
- Rodríguez, J., Ventura, E., Lopéz, M., Perez, V. (2017). Obtención de biogás a partir de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante la digestión anaerobia mesofílica. Revista de Energía Química y Física, 4(12), 34-43. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia_Quimica_y_Fisica/vol4num12/Revista_de_Energ%C3%ADa_Qu%C3%ADmica_y_F%C3%ADsica_V4_N12_5.pdf
- Saavedra, R., Alamo, M., & Marcelo, M. (2017, 17 noviembre). Diseño de un biodigestor tubular para zonas rurales de la región piura. Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente. de http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2017/12/Garcia-Rafael_biodigestor.pdf

- Sánchez, M. (2020, 7 mayo). Propiedades del estiércol de caballo. Jardinería On. <https://www.jardineriaon.com/propiedades-del-estiercol-caballo.html>
- Sarmiento, J. (2019). Estimación del potencial de producción de metano de la cáscara de cacao como cosustrato del estiércol de vaca en la digestión anaerobia. Repositorio de UDLA. <https://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/10891/1/UDLA-EC-TIAM-2019-13.pdf>
- Sogari, N. (2003). Cálculo de la producción de metano generado por distintos restos orgánicos. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad Nacional del Nordeste. Recuperado 30 de noviembre de 2021, de <https://xdoc.mx/preview/calculo-de-la-produccion-de-metano-generado-por-distintos-restos-6047032f6c459>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2019, diciembre). Estudio Sectorial de los Servicios Públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado. Johanna Montoya. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe_sectorial_aa_2018-20-12-2019.pdf
- Superintendencia Delegada Para Energía y Gas Dirección Técnica De Gestión De Energía. (2020, septiembre). Informe sectorial de la prestación del servicio de energía eléctrica 2020. Superservicios. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Dic/informe_sectorial_diagnostico_zni_2020.pdf
- Tortosa, G. (2016, 7 diciembre). Caracterización agroquímica de un estiércol de oveja (o cabra). Compostando Ciencia. <http://www.compostandociencia.com/2013/03/caracterizacion-estiercol-oveja-y-cabra-html/>
- Tortosa, G., Albuquerque, J., Ait-Baddi, G., Cegarra, J. (2012). The production of commercial organic amendments and fertilisers by composting of two-phase olive mill waste (“alperujo”) *Journal of Cleaner Production*, 26, 48-55. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.12.008
- Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2020). Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región central. Región Central. <https://onx.la/92401>
- User, S. (s. f.). Vertimientos y reuso de aguas residuales. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico/calidad/vertimientos-y-reuso-de-aguas->

residuales#: %7E:text=La%20Ley%20373%20de%201997,las%20normas%20de%20calidad%20ambiental.

Wei, C., Zhang, T., Feng, C., Wu, H., Deng, Z., Wu, C., Lu, B. (2011) Treatment of food processing wastewater in a full-scale jet biogas internal loop anaerobic fluidized bed reactor. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20717838/>

Zinder, S. H. (1993). Physiological Ecology of Methanogens. *Methanogenesis Ecology, Physiology, Biochemistry and Genetics*, 326 -351. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-2391-8_4

Zuluaga Sánchez, G. P., Martínez Ceballos, E., & Luz Ruiz, A. (2013). Estrategias sociales y ecológicas de resiliencia al cambio climático implementadas por los agricultores del municipio de Marinilla (Colombia). *Agroecología*, 8(1), 79–84. <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/183011>