Obtención de biogás a partir de cáscaras y residuos sólidos de alimentos

Sergio Andrés Peñuela

Erley Fernández Cárdenas

Proyecto presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero de Alimentos

Directora

Magister Martha Barrera Hernández

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería

Ingeniería de Alimentos

2022

Nota de Aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Director del Proyecto

_____

Jurado

2022

Dedicatoria

Esta nota de agradecimiento está dirigida a mis padres, que fueron un apoyo considerable e imprescindible durante el trayecto de mi carrera, a José Antonio Fernández Hernández mi padre y a Alba Cárdenas Osorio mi madre, también quiero resaltar el esfuerzo de mi hermana Nancy Fernández Cárdenas que gracias a ella pude lograr cumplir esta meta.

Erley Fernández Cárdenas.

Dedicatoria

El presente trabajo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso.

A mis padres, Adolfo León Peñuela Toledo y María Nancy Ortiz Sepúlveda, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. Ha sido un orgullo y un privilegio ser su hijo.

A mi esposa Jenny Pahola Becerra Chaparro y mis hijos, Sebastián e Isabella, por el amor que me brindan y por la motivación que me dan día a día para alcanzar mis metas.

A mi hermana Erika Paola Peñuela Ortiz, por estar siempre presente, acompañándome y por el apoyo moral que me brindó a lo largo de esta etapa de mi vida.

Sergio Andrés Peñuela Ortiz

Agradecimientos

A la directora del proyecto la Ingeniera Martha Barrera Hernández, por sus motivaciones y sobre todo sus observaciones que fueron de gran valor para el desarrollo del proyecto.

A Raimund Gersther gerente y propietario de RAMBAL S.A.S. Que nos apoyó con recursos, asesoría técnica, y sobre todo por su entera disposición para el acompañamiento del proyecto.

Así mismo a todas las personas de la empresa que de una u otra forma aportaron con consejos y experiencia en polímeros, colaborando en la solución de problemas técnicos relacionados con el material utilizado en el prototipo.

Al personal docente y administrativo de la UNAD que participaron en la realización del proyecto, desde un principio.

Resumen

El presente proyecto nace de la necesidad de concientización de un grupo de estudiantes miembros del Semillero de Investigación Agroalimentario SIA, de aportar a la disminución de la generación de residuos alimentarios y a la tendencia limpia de cero emisiones, teniendo como referencia inicial la cantidad de residuos que puede generar el solo hecho de elaborar un plato típico como lo es “un sancocho colombiano”, las cifras obtenidas según la caracterización realizada se estiman un 31%. Inicialmente, se realiza como un proyecto de aula, producto de un componente práctico de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia del programa Ingeniería de Alimentos, en donde se hacen cálculos balances de materias primas de entrada y el producto obtenido. Asimismo, una caracterización de materia prima utilizada, en cuanto a lugar de origen, especie y demás datos que aporten al estudio. La metodología utilizada, es de prueba o ensayo, mediante mejoramiento de cinco diferentes prototipos tendientes a obtener un biodigestor anaerobio semi continuo, el cual cumpla con los objetivos planteados en el presente trabajo. Los referentes bibliográficos teóricos hablan de emisiones no limpias como metano y gas carbónico, resultado de esa primera digestión de residuos. Por lo expuesto, se plantea una segunda fase, que no es objeto de estudio de este trabajo, donde se propone depurar el gas obtenido.

Palabras clave: biodigestor, biol, biogás, energías renovables, residuos orgánicos, cero emisiones.

Abstract

This project arises from the need to raise awareness of a group of student's members of the Agroalimentary Research Semillero SIA, to contribute to the reduction of food waste generation and the clean trend of zero emissions, taking as an initial reference the amount of waste that can generate the mere fact of preparing a typical dish such as "a Colombian stew", the figures obtained according to the characterization made are estimated at 31%. Initially, it is carried out as a classroom project, product of a practical component of the Universidad Nacional Abierta y a Distancia of the Food Engineering program, where balance calculations of input raw materials and the product obtained are made. Also, a characterization of raw material used, in terms of place of origin, species and other data that can contribute to the study. The methodology used is that of test and trial, through the improvement of five prototypes tending to obtain a semi-continuous anaerobic biodigester, to obtain the one that is considered to meet the objectives set out in this work. The theoretical bibliographic references speak of non-clean emissions such as methane and carbon dioxide gas, as a result of this first waste digestion. Therefore, a second phase is proposed, which is not the object of study of this work, where it is proposed to purify the gas obtained.

Keywords: biodigester, biol, biogas, renewable energy, organic waste, zero emissions.

Tabla de Contenido

Pág.

Lista de Figuras 10

Lista de Tablas 12

Introducción 13

Marco Teórico y Contextual 15

Antecedentes y Generalidades 15

Biogás 20

Biol 20

Relación Carbono / Nitrógeno (C/N) 21

Digestión Anaerobia 22

Parámetros Dentro de la Digestión Anaerobia 24

pH: 24

Temperatura Y Tiempo De Retención: 24

Ácidos Volátiles 24

Relación Carbono Nitrógeno (C/N): 24

Mezclado: 25

Tipos de Biodigestores 26

Pozo Séptico 26

Biodigestor de Domo Flotante (india) 27

Biodigestor de Domo Fijo (chino) 28

Biodigestor de Estructura Flexible 29

Digestor con Tanque de Almacenamiento Tradicional y Cúpula de Polietileno 29

Tipos de Alimentación del Biodigestor 30
Diseño del Biodigestor..... 35
Objetivos 37
Objetivo General..... 37
Objetivos Específicos 37
Metodología 38
Materiales..... 38
Métodos 40
Caracterización Y Preparación Del Sustrato 41
Diseño De Los Experimentos. 42
Primer Experimento ESM:1 42
Diseño y Construcción del Biodigestor. 42
Método Utilizado Para Medir El Volumen Del Gas..... 43
Materia Prima y Relación Sustrato/Agua. 44
Segundo Experimento ESM: 2 44
Diseño y Construcción del Biodigestor. 44
Materia Prima y Relación Sustrato/Agua. 45
Tercer Experimento ESM: 3 46
Diseño y Construcción del Biodigestor. 47
Materia Prima y Relación Sustrato/Agua. 47
Cuarto Experimento ESM: 4 47
Diseño y Construcción del Biodigestor. 47
Materia Prima y Relación Sustrato/Agua. 48

Quinto Experimento ESM: 5 48

Diseño y construcción del biodigestor. 48

Materia prima y relación Sustrato/Agua/Inoculo. 51

Maquinaria y Equipos 51

Resultados y Análisis de Resultados 52

Conclusiones 56

Recomendaciones 57

Referencias Bibliográficas 58

Lista de Figuras

Pág.

Figura 1. Proceso de digestión anaerobia 23

Figura 2. Pozo Séptico 26

Figura 3. Biodigestor de domo flotante (india) 27

Figura 4. Biodigestor de domo fijo (chino) 28

Figura 5. Biodigestor de estructura flexible (polietileno) 29

Figura 6. Digestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno 30

Figura 7. Imagen Biodigestor inicial (curso biotecnología) 40

Figura 8. Diseño primer experimento ESM: 1 42

Figura 9. Biodigestor ESM:2 vista exterior 44

Figura 10. Imagen Biodigestor ESM:2 vista interior 45

Figura 11. Imagen Biodigestor ESM:3 47

Figura 12. Imagen Biodigestor ESM:4 47

Figura 13. Imagen Biodigestor ESM:5 49

Figura 14. Imagen Detector múltiple de gases Ventis MX4..... 51

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1. Proyectos realizados en Colombia 15

Tabla 2. Comparación de relación C/N baja-elevada 21

Tabla 3. Características fisicoquímicas de la cascara de papa 32

Tabla 4. Características fisicoquímicas de la cascara de yuca 32

Tabla 5. Características fisicoquímicas de la cascara de plátano 33

Tabla 6. Características fisicoquímicas de la porcinaza 34

Tabla 7. Cálculo de los parámetros constructivos del digestor 36

Tabla 8. Materiales utilizados en cada experimento 38

Tabla 9. Lista de materiales para el experimento ESM: 2 46

Tabla 10. Lista de materiales para el experimento ESM: 5 49

Tabla 11. Relación del peso del residuo generado y peso de entrada del producto 52

Introducción

La tecnología de biodigestión es una alternativa energética que nos aportar a la disminución en los residuos que se generan a diario, aportando a la tendencia limpia de cero emisiones, se basa en el aprovechamiento de los residuos orgánicos, para producir biogás, el cual contribuye en el aprovechamiento adecuado de los residuos orgánicos, siendo a su vez una alternativa al petróleo. Esta alternativa nos brinda un ciclo energético sostenible de una forma económica y eficiente en el tratamiento de residuos orgánicos, donde a su vez se puede considerar como una 'tecnología limpia de cero emisiones'.

El presente proyecto está enmarcado en el aprovechamiento de los residuos sólidos generados de la producción de un alimento típico colombiano para la obtención de biogás, con base en la mezcla de cáscaras de plátano, yuca, papa, mazorca; como alternativa de generación de energía no convencional.

Por otra parte, se busca generar cultura ambiental con el aprovechamiento de subproductos y/o residuos generados que se abandonan y se degradan convirtiéndose en biogás, en un medio anaeróbico, pero en presencia de aire se convierte en dióxido de carbono, agua y en algunos casos en metano.

A su vez convirtiéndose en uno de los principales problemas que acecha a muchas ciudades debido a que el proceso de recolección, trasporte y almacenamiento es cada vez más caro, pues hay que pagar a empresas que se encarguen de todos estos procesos para poder destruir toda esa masa contaminante que se genera a diario en los hogares colombianos. Un biodigestor es una de algunas de las soluciones a gran parte de esos problemas, pues además de usar los residuos generan una alternativa de uso como lo es el biol y el biogás.

En una casa donde viven cuatro personas se puede llegar a producir cerca de 2 kilogramos de residuos por día. Estos residuos generan malos olores y a su vez atraen a roedores, moscas e infinidad de animales. También pueden ser foco de enfermedades e infecciones. Un biodigestor de biogás es una gran solución para atajar este tipo de problemas porque logran un tratamiento eficiente y responsable de los residuos y además, permiten obtener una ganancia extra.

Marco Teórico y Contextual

Antecedentes y Generalidades

En el año 1.600, se identificó un gas proveniente de la descomposición de la materia orgánica y a través del tiempo se han logrado avances en la investigación aplicada, obteniéndose grandes innovaciones en el campo tecnológico.

En el año 1866 Bechamp (alumno de Pasteur) demostró que la formación de Metano es un proceso biológico, en 1875 Popof, agregó materiales celulósicos a los lodos fluviales produciendo hidrogeno y metano.

Para el año 1890, se construyó el primer biodigestor a escala real en la India y en 1896 en Exeter, Inglaterra, las lámparas de alumbrado público eran alimentadas por el gas recolectado de los digestores producto de los lodos cloacales de la ciudad.

En el año 1901, Schengon, describió detalladamente las características morfológicas de las metanobacterias y surgió un concepto de su capacidad de conversión. (García Páez, V. s.f.)

Los países con tecnologías más avanzadas en la aplicación de biodigestores son: China, India, Holanda, Francia, Gran Bretaña, Suiza, Italia, EE.UU., Filipinas y Alemania. A lo largo de los años, la tecnología para la digestión anaeróbica fue especializándose y se utiliza en diferentes campos con fines diversos.

En las zonas rurales de Colombia, se han implementado pequeños proyectos por iniciativa de los agricultores o de agencias de cooperación. La Tabla 1 muestra un resumen de los algunos de estos proyectos hasta el 2014.

Tabla 1.

Proyectos realizados en Colombia

Proyecto nombre o localización	**Descripción**	**Referencias**
Palmeras del Llano	Planta de extracción de aceite de palma. Biodigestor hormigón, 750 m^3 de capacidad. Aplicación biogás para la generación de electricidad. Instalado en 1987.	Conil, 2009
Palmar Santa Elena	Planta de extracción de aceite de palma. Biodigestor hormigón, 500 m^3 de capacidad. Aplicación biogás para la generación de electricidad. Instalado en 1991.	Conil, 2009
Palmeiras	Planta de extracción de aceite de palma. Carpa cubierta laguna, 7.000 m^3 de capacidad. Aplicación del biogás para la generación de electricidad. Instalado en 1999.	Conil, 2009
Cali	Proyecto MDL: Autogeneración de biogás como energía renovable en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo de EMCALI.	MDL, UNFCCC, 2009
Cali	Proyecto MDL: Recuperación y combustión de metano en el tratamiento de lodos existente sistema de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cañaveralejo de EMCALI.	MDL, UNFCCC, 2009
Pasto		MDL, UNFCCC,

Proyecto nombre o localización	Descripción	Referencias
	Proyecto MDL: Construcción, operación y mantenimiento de sistema de colección y quema de biogás en el relleno sanitario Antanas.	2009
Puerto Leguizamo (Putumayo)	Planta piloto de Biogás para generación de energía.	MME, 2010
San Carlos de Guaroa (Meta)	Aceites Manuelita, 2 biodigestores 19.000 m^3, procesa 300.000 Ton/año de material, aplicación en Planta de Biodiesel.	Biotec, 2013
Sabana de Torres (Santander)	Oro Rojo, Grupo Indulpalma, biodigestor 16.000 m^3, procesa 150.000 ton/año de material, sin aplicación (tea).	Biotec, 2013

Fuente: MDL: Mecanismo de Desarrollo Limpio, UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change

En la actualidad se ha evidenciado un incrementado en el número de proyectos para generar energía a través de plantas de biomasa, como el caso de Villanueva y Casanare, mejorando el suministro de energía.(Valora, 2021)

En Suramérica son varios los esfuerzos en la búsqueda de fuentes de energías renovables, que contribuyan a mejorar la calidad de vida de los sectores vulnerables y además apoyen la idea de cero emisiones.

En Perú, en la Universidad Antenor Orrego de Trujillo, se emplearon materiales parecidos a los utilizados en el presente estudio, mezclando agua, e estiércol de vaca y agua de

desagüe como inoculo en proporción 1:5, consiguiendo biogás a la quinta semana. En el laboratorio de ingeniería de la Universidad Nacional de Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (Perú) se empleó estiércol fresco y agua de desagüe, adicionando cascaras de papa para demostrar que los desechos orgánicos también podrían servir para la fermentación, los resultados de dichos estudios fueron presentados en el I simposio internacional sobre el gerenciamiento de residuos de animales en el 2009 en Brasil (Barrena, *et al*., 2009).

A través de los años, se han venido mejorando dichos experimentos consiguiendo Biogás a los 27 días agregando chips de totora. Por otra parte, mediante convenios entre la comunidad campesina y las Universidades investigadoras se han instalado sistemas de producción de biogás y biobancos en diferentes lugares de Perú (Barrena, *et al*., 2009)

En Cuba, se han realizado varios estudios con diferentes sustratos e inóculos, donde se han determinado propiedades físico-mecánicas y químicas, tales como: relación carbono nitrógeno (C/N), rendimiento especifico de metano (m3/kg VS), solidos totales (TS), sólidos totales orgánicos (OTS), acidez (pH) y sólidos volátiles (VS) en residuos orgánicos de diferentes tipos, los cuales son usados para la producción de biogás mediante la co-fermentación con excretas de origen animal las investigaciones se han realizado a escala de jeringas, de biodigestores plásticos de pequeño formato y a escala real. Para el estudio en cuestión las muestras de las biomasas investigadas (sorgo 49V-96, sorgo-132 R, girasol JE-94, yuca, maíz, cáscara de malanga, pan, cáscara de boniato, papa y cáscara de maní); así como de los afluentes y efluentes de la planta de biogás fueron analizados en laboratorios de la Universidad Central de las Villas y en el laboratorio de biogás de la Universidad de Hohenheim, Alemania. (Martinez Hernández et al., 2014)

La tendencia es hacia las producciones limpias, por lo tanto, es importante la utilización de subproductos generados en los procesos alimentarios. Los efectos ambientales de estos residuos no solo se limitan al uso del suelo y del agua, por esto es importante el uso eficiente de los recursos para dar valor agregado a los procesos, obteniendo beneficios ambientales y económicos.

Se conocen como energías renovables las que provienen del sol, el viento, el agua y de los residuos orgánicos sólidos que se generan a diario en las diferentes actividades humanas. Estas energías tienen gran importancia ya que son limpias, se puede decir que son inagotables, ayudan a equilibrar la naturaleza y su vez contribuyen con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, la disminución de la dependencia energética, la creación de empleo y el desarrollo tecnológico. (André, De Castro, & Cerdá, 2011)

La unión Europea en su directiva 2018/2001 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, define la biomasa "como la fracción de los productos, residuos y desechos de origen biológico procedentes de actividades agrarias, incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal, de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos, incluidos los residuos industriales y municipales de origen biológico".

Por lo tanto, la biomasa es materia orgánica utilizada como fuente energética, se caracteriza por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza.

La producción de gas y las tasas de descomposición de los residuos orgánicos son influenciados por diferentes factores, entre los que tenemos: ácidos grasos volátiles (AGV), pH, tiempos de residencia (TR), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos totales (ST), sólidos

volátiles (SV), temperatura, concentración de sustrato, biomasa, tamaño de partícula del sustrato y relación sustrato/inóculo (S:I) (Deublein y Steinhauser 2008).

La composición elemental de carbohidratos (C-40 %), proteínas (C-46 %) y lípidos (C-76 %) indica que cierta cantidad de carbono está disponible en los residuos de alimentos, lo que hace que sean degradables (Iacovidou et al. 2012).

Nuestro estudio es una biomasa que se abandona, se degrada y se convierte en biogás en un medio anaeróbico, pero, si se está en presencia de aire se convierte en dióxido de carbono y agua y en algunos casos en metano.

La biomasa se puede clasificar en tres grandes grupos:

- **Biomasa natural**. Es la que se produce en la naturaleza sin la intervención humana.
- **Biomasa residual**. Son los residuos orgánicos que provienen de las actividades de las personas (residuos sólidos urbanos, RSU, por ejemplo).
- **Biomasa producida**. Son los cultivos energéticos, es decir, campos de cultivo donde se produce un tipo de especie en concreto con la única finalidad de su aprovechamiento energético. (Fundación Endesa, 2021).

Es importante para entrar en materia aclarar algunos conceptos:

Biogás

Es un gas combustible un poco más liviano que el aire, que está compuesto principalmente por: metano (CH_4) (50% a 70%), dióxido de carbono (CO_2) (30% a 50%), ácido sulfhídrico (H_2S) (0,1% a 1%) y nitrógeno (N_2) (0,5% a 3%). (López G., 2008, pág. 15).

Biol

Es un fertilizante líquido con todas las características de los abonos orgánicos que reemplaza con ventaja los abonos químicos y que además proporciona al suelo una serie de

efectos beneficios para sus características físicas, químicas y biológicas. (López G., 2008, pág. 15).

Relación Carbono / Nitrógeno (C/N)

Es un valor que nos facilita saber si la composición de la biomasa es adecuada para la digestión. El carbono es utilizado por las bacterias metanogénicas como una fuente de energía mientras que el nitrógeno es utilizado para la reproducción o formación de nuevas células, muchos autores han proporcionado diferentes intervalos en el que debería estar el valor adecuado para una digestión óptima. La tabla 1 muestra dicha relación.

Tabla 2.

Comparación de relación C/N baja-elevada

Si la relación C/N es elevada (demasiado Carbono)	**Si la relación C/N es baja (demasiado Nitrógeno)**
Evacuación en forma de CO2 (se genera mucho CO2 y esto hace que la calidad del gas sea baja)	Evacuación en forma de amoniaco (se hace ácida la mezcla y se vuelve tóxica)
Temperatura baja.	Olores desfavorables
Si la relación es superior a 35:1 la descomposición ocurre más lentamente porque la producción y desarrollo de bacterias es bajo.	Temperaturas altas
	Aumenta el pH
	Si la relación es inferior a 8:1 se inhibe la actividad bacteriana

Fuente: (Varnero, 2012).

Respecto a la limpieza de estas energías, es preciso decir que en todas las fuentes de energía producen un cierto grado de impacto ambiental, en nuestro caso, la energía generada a partir de la biomasa produce contaminación durante la combustión por emisión de CO_2, pero este puede ser reabsorbido por el crecimiento de las plantas. (Bautista, 2010), u otros medios de depuración.

Para entender el comportamiento de la biomasa de estudio, se puede definir los parámetros de la digestión anaerobia, partiendo de su definición:

Digestión Anaerobia

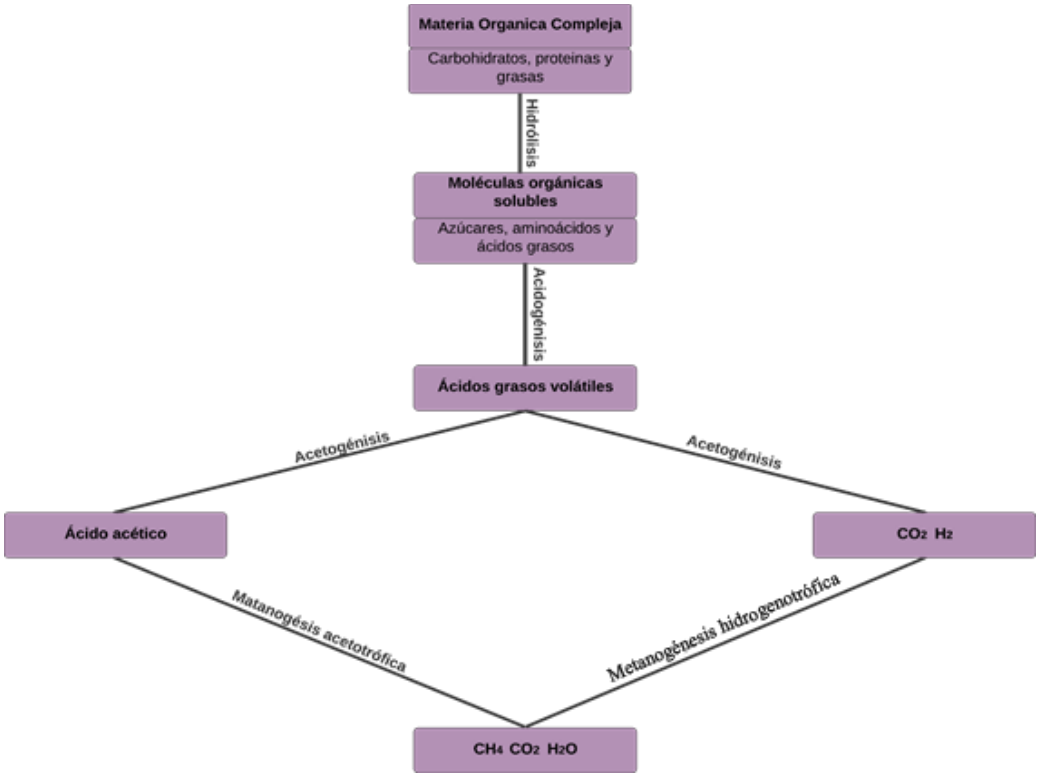
Es un proceso de fermentación y/o degradación de materia orgánica en un medio el cual se caracteriza por la ausencia de oxígeno, la cual se puede generar a pequeña y a gran escala, generando como producto una mezcla de gases, la cual se compone principalmente por dos gases, el metano (50-70%) y el dióxido de carbono (30-50%), en donde se encuentran inmersos el nitrógeno, oxígeno, hidrógeno y sulfuro de hidrógeno, pero cada uno de estos en menor magnitud. La materia prima e insumos para este proceso deben presentar un valor de actividad acuosa (Aw) alto para que el proceso se lleve a cabo de la mejor manera. Por otra parte, el residuo de este proceso es un lodo en el cual se encuentra una gran concentración de nutrientes, que ayudan a la fertilidad agrícola, por lo que no es considerada un residuo como tal, sino todo lo contrario un subproducto aprovechable. (Arenas, 2019). Donde se identifican las siguientes etapas:

- **Etapa hidrolítica:** En esta etapa los compuestos orgánicos complejos (lípidos, proteínas y carbohidratos), se despolimerizan, por la acción de enzimas hidrolíticas en moléculas solubles.

- **Etapa acidogénica:** En esta etapa, las moléculas solubles obtenidas anteriormente se transforman en ácidos grasos volátiles.
- **Etapa acetogénica:** En esta etapa, los ácidos grasos volátiles son transformados por bacterias acetilénicas, obteniendo ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono.
- **Etapa metanogénica:** Es la etapa final de nuestro proceso de digestión anaerobia, en la cual los compuestos obtenidos en la etapa anterior son transformados a CH_4 y CO_2. Por la acción de dos bacterias (metanogénicas acetoclásicas y metanogénicas hidrogenófilas). La Figura 2 muestra el proceso de la digestión anaerobia en detalle.

Figura 1.

Proceso de digestión anaerobia



Fuente: Adaptado de Parra-Ortiz, D. L., Botero-Londoño, M. A., & Botero-Londoño, J. M. *(2019).*

Parámetros Dentro de la Digestión Anaerobia

En la digestión anaerobia se deben mantener bajo control los siguientes parámetros:

pH: Juega un papel importante, ya que está asociado a la acidificación, lo cual afecta negativamente el proceso, su rango debe estar entre 6,6 y 7,6, valores por encima o por debajo inhibe el proceso de fermentación, pudiendo incluso detenerse. En el caso de un pH alto, se puede corregir retirando una cantidad de efluente agregando residuos frescos, ya que sus ácidos lo reducen buscando una estabilidad y en el caso contrario, cuando su valor es bajo se puede aumentar utilizando fertilizantes, cenizas, agua amónica diluida, etc. (Bautista, 2010).

Temperatura Y Tiempo De Retención: Esta digestión es un proceso muy lento, por lo cual es necesario aplicar calor para acelerar las reacciones bioquímicas implicadas. En la mayoría de estos sistemas convencionales funciona en una gama mesófílica entre 12 y 35 °C, optimizando entre los 29 y 33 °C. El tiempo de retención es la duración del proceso de digestión anaerobia, o tiempo que las bacterias requieren para digerir el lodo y producir el biogás, este tiempo será inversamente proporcional a la temperatura del sistema (Bautista, 2010).

Ácidos Volátiles**:** La concentración de ácidos volátiles, producto de fermentación, tiene una gran importancia en el proceso de la digestión, pues puede llegar a acidificar el fango provocando el fallo del proceso.

El aumento de la concentración de ácidos volátiles puede venir producido por sobrecarga de alimentación, o por una inhibición de las metanobacterias. A su vez, una gran concentración puede provocar la rotura de la capacidad tampón del fango, disminución del pH y, en consecuencia, inhibición de las bacterias formadoras de metano. (Bautista, 2010).

Relación Carbono Nitrógeno (C/N): Sabemos que toda la materia orgánica es capaz de degradarse y por ende producir biogás al ser sometida al proceso de digestión anaerobia, pero su

calidad y su cantidad depende de la composición y naturaleza de los residuos utilizados, es donde entra a jugar la relación C/N. Esta relación influye de manera muy importante para la producción de biogás, es por esta razón que se debe tener un rango entre 20:1 y 30:1 con el fin de obtener la cantidad de producto esperado aceptable. (Arenas, 2019).

Mezclado: En los digestores convencionales se llevaba a cabo un depósito de fangos aislados de la atmósfera, en los cuales se producía una estratificación de abajo para arriba de la siguiente manera: fango digerido, fango de digestión, sobrenadante, capa de espuma y gases de digestión. Con el paso del tiempo, se desarrollaron mejoras en el proceso, llegando a la denominada digestión de alta carga y se estableció que es fundamental que el contenido del biodigestor fuera mezclado de una manera más o menos continua, para lograr disminuir los tiempos del proceso. (Bautista, 2010).

Existen alternativas tecnológicas disponibles para el aprovechamiento de subproductos alimentarios que pueden permitir la diversificación de las fuentes de energía, entre los que podemos mencionar está el biodigestor.

Un digestor de desechos orgánicos o biodigestor es un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (Da Silva & Ariane Correia, 2020), en el caso de estudio residuos alimentarios orgánicos y cáscaras. El mencionado biodigestor es capaz de descomponer materia orgánica y generar biogás, un combustible renovable que puede producir electricidad y calor.

Es necesario aclarar, que no se debe confundir fuentes de energía con formas de energía, las fuentes de energía son el lugar de donde se puede obtener la energía, ejemplo un embalse; se clasifican en función de su procedencia renovable o no renovable.

En 1840 James Joule observó que en la transformación de energía mecánica en calor existía una relación cuantitativa conocida como equivalente mecánico de calor, con lo que se determinó que el calor es una fuente de energía.

Ahora bien, cuando se suministra calor (energía) a un sistema esta se almacena como energía cinética, en el caso de la energía almacenada en un combustible depende exclusivamente de la naturaleza de su análisis o del análisis elemental (C, H, S) susceptible de liberar energía en contacto con el oxígeno.

En el caso de la biomasa contenida en una instalación de última tecnología, con mínimo exceso de aire será capaz de generar en una caldera un vapor de agua a elevada presión que a su vez producirá una notable cantidad de electricidad al expandirse en la turbina. En cambio, si la combustión se lleva a cabo con exceso de aire, la temperatura de los gases de combustión será tan pequeña que el vapor no podrá enviarse a la caldera de recuperación.

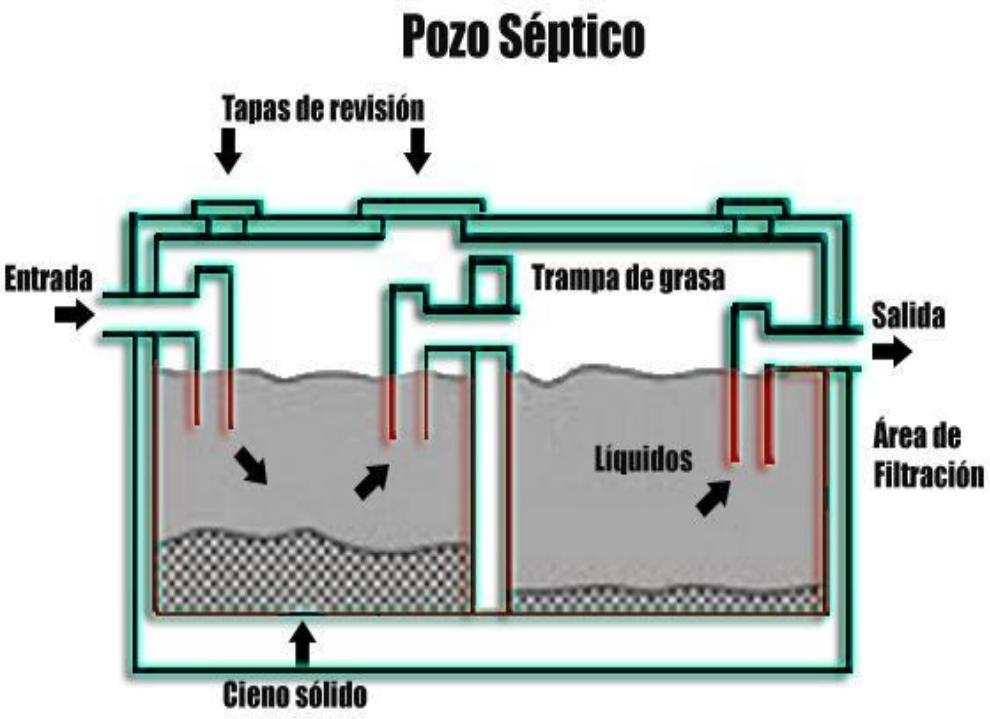
Tipos de Biodigestores

Pozo Séptico

Según la historia es el biodigestor más antiguo que se conoce, su principal característica es que posee un diseño realmente simple y su utilización se da para dar disposición a residuos líquidos domésticos (aguas residuales). Para que genere un buen funcionamiento se debe separar el agua mezclada con tensoactivos para evitar que inhiban la actividad microbiana de degradación de la materia orgánica. La figura 2 muestra este tipo de digestor.

Figura 2.

Pozo Séptico



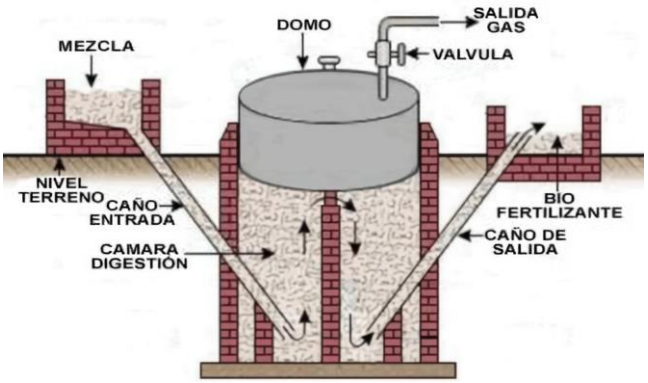
Fuente: De Arenas, (2019). "*Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto "La Villa Solar" ubicado en la ciudad de Buenaventura- Colombia"*

Biodigestor de Domo Flotante (india)

Este biodigestor cuenta con un diseño simple y su funcionamiento es adecuado para que los habitantes rurales los puedan manejar sin tener mucha preparación. Normalmente es construido con paredes y fondo de ladrillo, con un domo flotante haciendo que el gas quede atrapado debajo de este domo, el cual sube y baja dependiendo del volumen generado de gas. Es un biodigestor de alimentación semicontinua. La figura 3 muestra este tipo de digestor.

Figura 3.

Biodigestor de domo flotante (india)



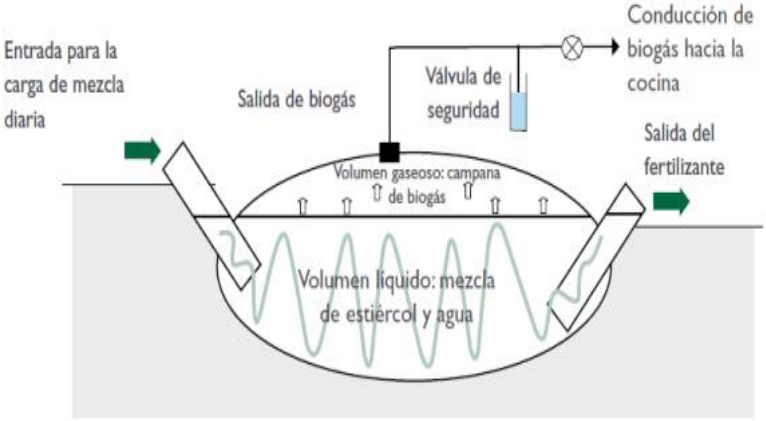
Fuente: Buhigas, A. (2010). *Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos*

Biodigestor de Domo Fijo (chino)

Este biodigestor cuenta con una cámara de volúmenes de gas constante, la cual es construida en ladrillos y hormigón, la cúpula y el fondo son redondos a raíz de las altas fuerzas estructurales ejercidas por la presión. Su mayor ventaja es que ofrece una amplia vida útil (aproximadamente 20 años), pero implica un alto costo. La figura 4 muestra este tipo de digestor.

Figura 4.

Biodigestor de domo fijo (chino)



Fuente: De Arenas, (2019). "*Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto "La Villa Solar" ubicado en la ciudad de Buenaventura- Colombia."*

Biodigestor de Estructura Flexible

Actualmente son fabricados con polietileno (bolsas), lo cual implica un costo bajo; en este digestor el gas se acumula en la parte superior de a bolsa, la cual permanece parcialmente llena con la biomasa que es sujeto en la degradación y/o fermentación, la cual se va inflando a medida que se va produciendo el biogás, se debe una presión de operación baja. Este biodigestor se puede trabajar en la tierra y/o flotando en el agua. La figura 5 muestra este tipo de digestor.

Figura 5.

Biodigestor de estructura flexible (polietileno)

Fuente: Multee Biogás (2017) "*Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos*"

Digestor con Tanque de Almacenamiento Tradicional y Cúpula de Polietileno

Este tipo de biodigestor resulta ser más económico que los prototipos tradicionales, ya que en la parte superior se usa una estructura semiesférica hecha en polietileno (capa delgada) y en la parte inferior un tanque en piedra y ladrillo donde se lleva a cabo la degradación y/o

fermentación de la biomasa y presenta una vida útil de 10 años, ya que se utiliza polietileno. (Bautista, 2010). La figura 6 muestra este tipo de digestor.

Figura 6.

Digestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno

Fuente: Buhigas, A. (2010). "*Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos*"

Tipos de Alimentación del Biodigestor

Lote o discontinuo: el sistema se carga una vez al iniciar el proceso, hasta que la materia orgánica se degrada en su totalidad y se usa en procesos en que la biomasa no se genera continuamente. (Arenas, 2019).

Semicontinuo: la alimentación en este caso se realiza con cargas pequeñas con intervalos de tiempo establecidos y se debe retirar el mismo volumen de biomasa que se agrega teniendo en cuenta la relación del agua presente dentro del sistema (4:1), para que su funcionamiento sea óptimo. (Arenas, 2019).

Continuo: es principalmente usado en el tratamiento de aguas residuales, donde el caudal de ingreso al sistema es de gran magnitud y se obtiene un óptimo aprovechamiento. Se requiere

ciertos equipos para controlar los diferentes factores que influyen en la generación de esta cantidad de biogás. (Arenas, 2019).

Insumos para la alimentación del biodigestor

Según Gómez et al., (2013) los residuos agroindustriales son una fuente importante de azúcares, almidón y carbohidratos estructurales la cáscara de plátano, cáscara de yuca, presentan un buen contenido de materia seca, materia orgánica, proteína bruta, extractos libres de nitrógeno, cenizas, extracto etéreo y energía bruta, haciéndoles aptos para uso en biodigestores (Aguiar, S et al., 2019).

Las materias primas de este proyecto corresponden al residuo de otros procesos, los cuales se mencionan a continuación:

La papa: en Colombia se producen alrededor de 250 variedades de papa, aunque solo se consumen aproximadamente 7 de ellas, es un producto natural y autóctono de consumo básico a nivel mundial. Cada variedad tiene tres partes principales: piel, cáscara y zona medular. Siendo la última la más importante y aprovechable por su contenido de almidón y energía, lo que implica que la piel y la cáscara sean desechadas. (Anón s. f.).

La papa colombiana no pasa por su mejor momento, por varias razones entre los que se destacan las consecuencias de la pandemia y el precio de los insumos, lo que desencadena el aumento del precio para el consumidor y el hecho de que alrededor de 15.000 paperos dejarían de producir este alimento durante 2022 en el país. Sin embargo, esta es una de las materias primas utilizadas en la alimentación del biodigestor, ya que en su momento resultaba de fácil adquisición y consumo.

Tabla 3.

Características fisicoquímicas de la cascara de papa

Parámetros	Valor
Relación C/N	25:1
Carbono	39%
Nitrógeno	1,57
Humedad	70-75%
pH	6,3
Densidad	0,51 kg/L

Fuente: De Arenas, (2019). "*Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto "La Villa Solar" ubicado en la ciudad de Buenaventura- Colombia."*

La yuca: la yuca es un tubérculo el cual es una fuente importante de energía alimentaria después del arroz, la caña de azúcar y el maíz. Apreciada por los pequeños agricultores por su tolerancia a la sequía y a los suelos infértiles, el cultivo es eco eficiente por naturaleza y brinda una fuente confiable de alimentación.

Su cáscara corresponde aproximadamente al 5% de su peso total, es empleada como biomasa vegetal buscando su aprovechamiento y la disminución de residuos sólidos generados a partir de la utilización de este alimento (Albis, et al., 2016).

Tabla 4.

Características fisicoquímicas de la cascara de yuca

Parámetros	Valor
Relación C/N	20:1

Parámetros	Valor
Carbono	30 %
Nitrógeno	1,5 %
Humedad	13 %
pH	6
Densidad	0,53 kg/L

Fuente: De Arenas, (2019). "*Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto "La Villa Solar" ubicado en la ciudad de Buenaventura- Colombia."*

El plátano: en Colombia su cultivo tiene una gran importancia, se estima que en el mercado de este alimento en un año se produce aproximadamente 12 mil toneladas y se destina para el consumo humano y consumo animal, el porcentaje de peso de su cascara es de 30 a 40% de su peso total, esta se compone de celulosa en un 10,5%, hemicelulosa en un 14% y lignina en un 17%. (Manjarres, Castro, & Sandoval, 2010).

Tabla 5.

Características fisicoquímicas de la cascara de plátano

Parámetros	Valor
Relación C/N	50:1
Carbono	57 %
Nitrógeno	1,13 %
Humedad	9,3 %
pH	5,8
Densidad	0,47 kg/L

Fuente: De Arenas, (2019). "*Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto "La Villa Solar" ubicado en la ciudad de Buenaventura- Colombia."*

Estiércol de porcino (porcinaza): La porcinaza es utilizada como fertilizante ya que contiene gran cantidad de nutrientes, la porcinaza está compuesta por heces fecales y orina, su producción se ve afectada por varios factores como, las condiciones ambientales, alimentación del animal y a cantidad de agua que este consume. El porcentaje de humedad oscila entre los 88% y 90%, el contenido de materia seca oscila entre 10 y 12%, Los sólidos presentes en la materia seca corresponde a 90% de las heces y 10% de la orina. El pH varía dependiendo de qué tan frescas sean las heces dado que entre más fresco este más neutro. (Arenas, 2019). El cálculo teórico de su potencial energético es de 15,85 Mcal/año. (Ariza, et al. 2017)

Tabla 6.

Características fisicoquímicas de la porcinaza

Parámetros	Valor
Relación C/N	20:1
Carbono	30 %
Nitrógeno	1,5 %
Humedad	9.3 %
pH	6
Densidad	0.53 kg/L

Fuente: De Arenas, (2019). "*Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto "La Villa Solar" ubicado en la ciudad de Buenaventura- Colombia."*

En los resultados y análisis de resultados se expondrá la cuantificación de los residuos generados para el estudio.

Diseño del Biodigestor

Para el diseño del equipo se debe predecir las líneas de entrada y salida, volumen requerido, entre otros. Tomando como base proyectos anteriores donde se determinó la composición fisicoquímica de los residuos del estudio, se procede al desarrollo de los cálculos de los parámetros bases de los aditamentos complementarios de instalación y diseño del biodigestor. En este proyecto se consideraron los siguientes parámetros de diseño.

- Determinación del tamaño: se parte del principio que es un prototipo que se pretende utilizar en zonas rurales.
- Volumen requerido: se utiliza la carga volumétrica a soportar, teniendo en cuenta que el 80% será ocupado por la mezcla residuos más agua y el 20% para el biogás que se está generando, se utiliza la metodología de Campos Cuní, en el 2011 para adaptar los cálculos del volumen de digestor, volumen de la cámara de fermentación, volumen de la cúpula y los diferentes cálculos de los parámetros para la construcción del digestor. De acuerdo a las variables propuestas por Campos Cuni (2011) relacionadas en la tabla 6, donde las columnas 3 y 4 son condiciones preestablecidas y la columna 11 representa la interrelación entre $\boldsymbol{V_d}$ $\boldsymbol{V_{cf}}$ y $\boldsymbol{V_c}$ se registra en una hoja de cálculo Excel los datos del estudio y en conformidad con Campos Cuni, se encuentra que los valores óptimos para una buena construcción y relación entre digestor, cámara de digestión y cúpula entre los parámetros establecidos está dado por la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{V_{cf} = (0.75 \sim 0.80) V_d}$$

$$\boldsymbol{V_c = (0.25 \sim 0.20) V_d}$$

Donde

$\boldsymbol{V_{cf}}$ = Volumen de la cámara de fermentación

$\boldsymbol{V_d}$ = Volumen del digestor

$\boldsymbol{V_c}$ = Volumen de la cúpula

Tabla 7.

Cálculo de los parámetros constructivos del digestor

Parámetros constructivos del digestor										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X	V_d	V_{cf}	V_c	h_{cf}	d_{cf}	r_{cf}	r_c	h_c	V_c	V_d

$\boldsymbol{X}$: Variable

$\boldsymbol{V_d}$: Volumen de la cámara de fermentación

$\boldsymbol{h_{cf}}$: Altura de la cámara de fermentación

$\boldsymbol{d_{cf}}$: Diámetro de la cámara de fermentación

$\boldsymbol{r_{cf}}$: Radio de la cámara de fermentación

$\boldsymbol{r_c}$: Radio de la cúpula

$\boldsymbol{h_c}$: Altura de la cúpula

$\boldsymbol{V_c}$: Volumen de la cúpula

Objetivos

Objetivo General

Obtener biogás a partir de cáscaras y residuos sólidos de alimentos

Objetivos Específicos

Caracterizar los residuos generados en una comida típica tales como cáscaras y residuos sólidos de alimentos.

Diseñar un biodigestor para el tratamiento de los residuos generados.

Obtener biogás a partir de los residuos generados.

Metodología

La metodología utilizada en este proceso es experimental, para el diseño inicial origen de la propuesta, realizado en el laboratorio se utilizaron como sustrato cáscaras de plátano, papa, yuca y como como inóculo orina humana. Cualquier residuo orgánico sirve para alimentar un biodigestor y cada sustrato tendrá un potencial de generación de biogás, la materia prima utilizada como sustrato de nuestro estudio tiene teóricamente un potencial de 50 litros de biogás/kg de solido fresco. (Manual de uso del biodigestor, s.f.)

Por su parte la orina posee la mayor cantidad de nutrientes presentes en las excretas, con contenido de nitrógeno, potasio y fosforo de 90,73 y 65% en su orden, es una sustancia casi estéril al momento de ser expulsada por el cuerpo.

Basados en Arenas Guayazan, B. D. (2019), quien identifico que la mezcla de residuos sólidos orgánicos que presenta condiciones más favorables en cuanto a la producción de biogás dentro del biodigestor anaerobio se compone de 37,5% cáscara de plátano, 37,5% cáscara de yuca y 25% cáscara de papa, la cual presenta una eficiencia del 37%.

Finalmente, en los diferentes prototipos diseñados para el estudio solo se utiliza inoculo en el prototipo denominado ESM:5 de acuerdo a lo establecido por Ariza, et al, 2017.

Materiales

A continuación, en la Tabla 6, se presenta la lista de materiales y equipos necesarios para la consecución de cada experimento realizado.

Tabla 8.

Materiales utilizados en cada experimento

Nombre	Cantidad	Material
Recipiente 18 L.	1	Plástico

Flanche 1"	1	PVC
Recipiente plástico con tapa de 10ml	2	Plástico
Tubo 1 pulgada X 2 m	1	PVC
Válvula de bola de ½	3	Cobre
Pegante para PVC X 120 m^3	1	Pegante solvente
Limpiador PVC X 120 m^3	1	Alcohol
Codo	3	PVC
Neumático	1	Caucho
Tapón de 3"	1	PVC
Unión roscada 1/2"	1	PVC
Tubo de 3" X 0.5 m	1	PVC
Teflón 3/4" x 15mm	1	Teflón
Collarín	4	Cobre
Válvula de bola 1"	1	PVC
Caneca de plástico con tapa 45 L	1	Plástico
Conector macho de 1 ½ pulgada PVC	2	Cobre
Conector hembra de 1 ½ pulgada PVC	2	Cobre
Semi codo 1 ½ pulgada PVC	1	PVC
Válvula de bola de 1 pulgada PVC	2	PVC
Manómetro seco C2 0-30 PSI	1	Otros
Reducción tigre roscable 1" x ½	1	Cobre
Tubo 1 ½ pulgada PVC (50cm)	1	PVC
Codos de PVC	4	PVC

Caneca de plástico con tapa 15 L	1	Plástico
Conector macho de 2 pulgada PVC	1	PVC
Conector hembra de 2 pulgada PVC	1	PVC
PH Meter renge 0.00-14.00	1	Otros
Buffer PH 4.01 @ 25°C	1	Otros
Buffer PH 6.86 @ 25°C	1	Otros
Agua destilada 500 ml	1	Otros

Métodos

Para el diseño del biodigestor del presente estudio se tomó como prototipo base el modelo diseñado para una práctica de laboratorio como lo muestra la Figura 7, diseñada por estudiantes del curso de biotecnología y pertenecientes al semillero SIA, donde se evaluó un biodigestor de uso simple y de fácil adquisición. La mezcla y los componentes iniciales de alimentación del biodigestor del laboratorio se detallan a continuación: 240 gramos de residuo alimentario (partes iguales de los componentes del sustrato) se introducen en una lata con capacidad de 5 litros, más 100 cc de orina humana (teóricamente 20 gramos de urea por litro), se agrega agua destilada hasta completar 3 litros.

Figura 7.

Imagen Biodigestor inicial (curso biotecnología)

En el ensayo inicial del laboratorio no se realiza ningún tipo de pretratamiento, posteriormente esta mezcla base (sustrato) se diluyó con agua destilada para mejorar la concentración de SV (sólidos volátiles) del inóculo a utilizarse en los experimentos de digestión anaerobia del biodigestor del estudio.

Caracterización Y Preparación Del Sustrato

Teniendo en cuenta que se desea utilizar como sustrato los residuos orgánicos provenientes de hogares, se tomó las cascaras de plátano, yuca y papa, generados durante un periodo de 20 días consecutivos, las familias seleccionadas corresponden a las de los estudiantes del estudio, que cumplen con el promedio integrantes en las familias a nivel nacional (3,1), según datos del DANE en el 2019.

Siguiendo lo recomendado por Browne y Murphy (2014), se define una concentración menor al 10% de SV (solidos volátiles) en base al contenido de sólidos totales. Se consideró iniciar con 7% de SV para un mejor control del pH, según lo recomendado por Grimberg et al.(2015), un rango óptimo de pH para la producción de metano esta entre 6,5 y 7,5 pero este

valor puede variar de acuerda a los diferentes sustratos y técnicas de digestión. (Nakasima-López et al., 2017)

Para realizar la primera prueba se seleccionó el municipio de Girón Santander, con promedios de temperatura entre 26.7 °C y 24.4 °C, considerando los meses de mayor y menor calor (Mayo y Noviembre). Para estimar la producción diaria residual se consideró el número total de integrantes de una familia promedio (3,1 integrantes), y se estimó la cantidad de residual generado por día, equivaliendo al 31% del peso total de residuos en los alimentos utilizados para la prueba. Obteniendo una cantidad de residuos utilizados como sustrato de 0.24 kg/día. Para fabricar los ESM:1 se utilizaron los siguientes materiales (ver tabla 6).

Diseño De Los Experimentos.

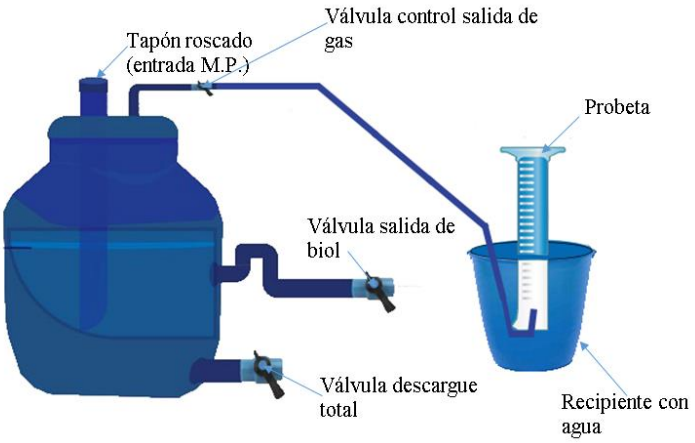
Se basa en la relación S/I: (Sustrato/Inóculo), los cálculos se realizan de acuerdo cada experimento

Primer Experimento ESM:1

Diseño y Construcción del Biodigestor. Se diseña de acuerdo como lo muestra la Figura 8.

Figura 8.

Diseño primer experimento ESM: 1



El prototipo ESM:1, consta de un recipiente de Polietileno de Alta Densidad, al cual se le adiciona a su tapa un tubo de 3 pulgadas, con tapón roscado para realizar la alimentación de materia prima (cascaras de plátano, yuca y papa), a la misma tapa, antes mencionada, también se le adapta una manguera utilizando un conector macho de ½ pulgada en PVC, que facilita la salida y control de gas mediante una válvula de bola.

La manguera va a un recipiente que contiene agua y una probeta graduada con el fin de medir por desplazamiento el volumen de gas generado de manera directa.

El prototipo consta de una válvula de descargue total, para evacuar el contenido del recipiente, así mismo, el diseño cuenta con una válvula de salida de biol, la cual mantiene el nivel del sustrato al interior del biodigestor

Método Utilizado Para Medir El Volumen Del Gas. Por desplazamiento. Se utiliza un recipiente que contiene agua y se sumerge una probeta (boca abajo), el volumen del gas obtenido se mide directamente observando el desplazamiento de este en la probeta, al llegar el gas a la probeta el agua se desplaza determinados mililitros y se procede a realizar la lectura directamente.

Probeta marca Simax de 500 ml, con las siguientes especificaciones:

- Fabricada en vidrio borosilicatado
- Clase A
- Con pico y base hexagonal
- Clase de precisión +/- 2,5 mL
- Graduación en color azul 5 mm
- Diámetro 53.2 mm / Altura 380 mm

Materia Prima y Relación Sustrato/Agua. Se emplea una mezcla de cáscaras de plátano, yuca y papa en proporciones iguales, utilizando para el plátano cáscara y pedúnculo y para la yuca cáscara, venas, corazón o fibras centrales. En el caso de la papa se utiliza la cáscara.

Se realiza el cargue del biodigestor con una relación Sustrato/agua 1:1, el biodigestor tiene una capacidad total de 18.6 kg y este se carga con el 80% de la capacidad total, dejando un 20% para la cámara de digestión (espacio libre donde ocurren los procesos bioquímicos que transforman la materia prima en biogás).

Segundo Experimento ESM: 2

Denominado ESM: 2

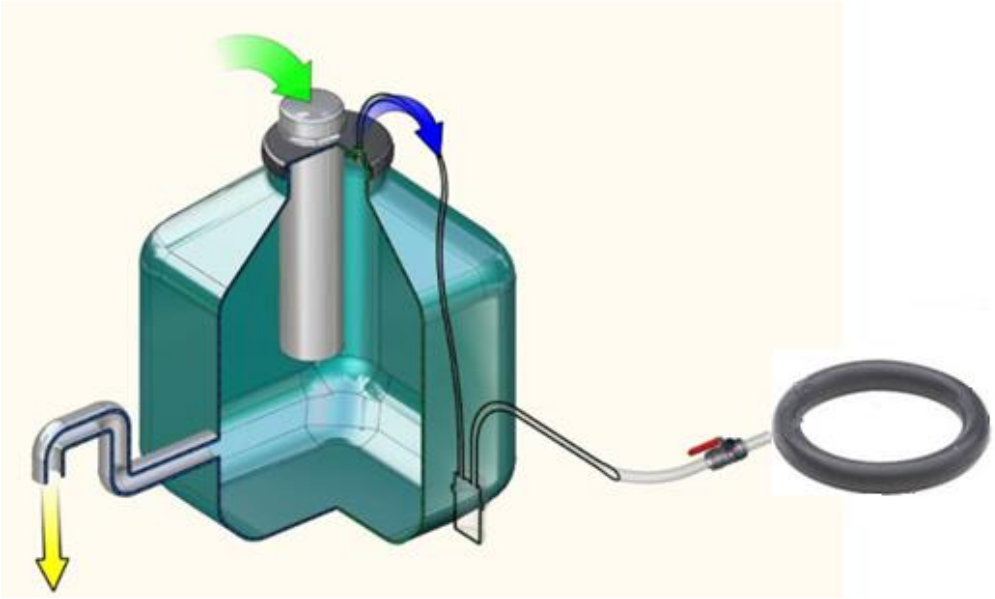
Diseño y Construcción del Biodigestor. Se diseña como lo muestran la Figura 9 y Figura 10.

Figura 9.

Biodigestor ESM:2 vista exterior

Figura 10.

Imagen Biodigestor ESM:2 vista interior



Se utiliza el mismo prototipo del ESM:1, cambiando el recipiente con agua y la probeta, por un neumático para el almacenamiento del gas generado. Se adiciona una válvula anti retorno para evitar presurización, esta válvula se fabrica utilizando un recipiente plástico (PET) de 10 ml, al cual se le realizan dos perforaciones en su tapa, por una de estas perforaciones ingresa la manguera "*salida de gas",* que llega hasta la parte inferior del recipiente y por la otra perforación una manguera que conduce la salida de gas de la válvula al medio de almacenamiento o neumático; entre la válvula anti retorno y el neumático, se adiciona una válvula o llave de paso para el control del gas generado.

Finalmente al recipiente (PET), se le adiciona agua hasta la mitad de su capacidad (5ml), con el fin de evitar que el gas se devuelva y se tapa.

Materia Prima y Relación Sustrato/Agua. Se mantiene la relación Sustrato/Agua de la prueba anterior y para el cargue del biodigestor se continua con la misma materia prima.

Los materiales utilizados para el modelo experimental ESM: 2 se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9.

Lista de materiales para el experimento ESM: 2

Nombre	Cantidad	Material
Recipiente 18 L.	1	Plástico
Flanche 1"	1	PVC
Recipiente 10ml.	1	Plástico
Tubo 1 pulgada	2 m	PVC
Válvula de bola de ½"	3	Cobre
Soldadura PVC	120 m^3	Pegamento solvente
Limpiador PVC	120 m^3	Alcohol
Codo	3	PVC
Manguera trasparente ½"	3 m	Poliuretano
Neumático	1	Caucho
Tapón de 3"	1	PVC
Unión roscada 1/2"	1	PVC
Tubo de 3"	0.5m	PVC
Teflón 3/4" x 15mm	1	Teflón
Collarín	4	Cobre
Válvula de bola 1"	1	PVC

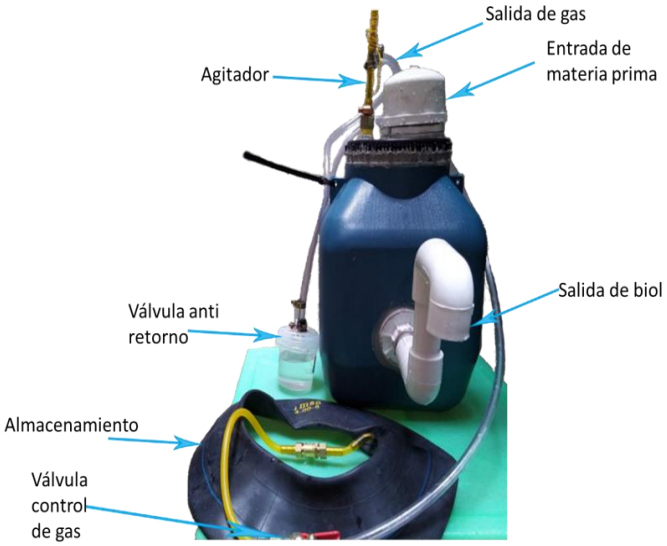
Tercer Experimento ESM: 3

Diseño y Construcción del Biodigestor. Los materiales utilizados son los mismos que se muestran en la Tabla 8, incorporando un agitador, así mismo un empaque de neumático en la tapa, con el fin de minimizar las posibles fugas y así mismo fallas en el proceso de digestión.

La Figura 11 muestra una vista cenital del ESM:3.

Figura 11.

Imagen Biodigestor ESM:3



Materia Prima y Relación Sustrato/Agua. El cargue del biodigestor se realiza bajo las mismas condiciones del ESM:2

Cuarto Experimento ESM: 4

Diseño y Construcción del Biodigestor. Se diseña y se construye el prototipo ESM:4 como lo muestra en la Figura 12.

Figura 12.

Imagen Biodigestor ESM:4

En este punto del estudio se decide diseñar un nuevo prototipo, en el cual se adecuo la entrada de materia prima por un lateral de dicho recipiente, utilizando un tubo de PVC de 2" y las salidas tanto de gas, como de biol por el otro lateral, para la salida de gas se utiliza manguera en PVC con recubrimiento multicapa de textil en polipropileno. Adicional se realizan algunos ajustes para corregir fugas, se utiliza silicona líquida 3000 Acuablock que tiene 400% de elasticidad resistente a rayos ultravioleta y aprobación técnica europea. ETA-08/0299. Así mismo se elimina el agitador, ya que este permitía fugas en el sistema.

Materia Prima y Relación Sustrato/Agua. Se mantiene la relación Sustrato/Agua de la prueba anterior y para el cargue del biodigestor se continua con la misma materia prima.

Quinto Experimento ESM: 5

Diseño y construcción del biodigestor. Se cambia el enfoque técnico de los experimentos realizados hasta el momento. Surge la necesidad de asesoría externa especializada y se cuenta con personal experto de RAMBAL S.A.S. Empresa santandereana dedicada al desarrollo, producción y comercialización de dosificadores plásticos innovadores y sostenibles,

quienes apoyan el experimento en cuanto a los materiales utilizados y los aditamentos adecuados. Así mismo un experto en obtención de gas de Ecopetrol quien sugiere la forma de evaluar la presencia de gas sin tener que ir al laboratorio.

La Figura 13 muestra el prototipo final y la Tabla 10 los materiales utilizados en su orden.

Se reemplazan las mangueras trasparentes por mangueras Festo Nº 6, y se emplean racores para sus uniones y/o acoples, así mismo se cambia la válvula anti retorno por una válvula anti retorno para acuarios.

Se utiliza silicona líquida 3000 Acuablock, en todos los pegues de las entradas y salidas del sistema para garantizar que dicho sistema sea hermético, se prueba adicionando aire comprimido, se sumerge en agua para evidenciar la no presencia de fuga y se procede a cargar

Figura 13.

Imagen Biodigestor ESM:5

Tabla 10.

Lista de materiales para el experimento ESM: 5

Listado de materiales
Recipiente de plástico con tapa (capacidad 45 L)
Válvula antirretorno
Válvula de bola de 2 ½ pulgada para uso de gas
Conector macho de 1 ½ pulgada PVC
Conector hembra de 1 ½ pulgada PVC
Semi codo 1 ½ pulgada PVC
Flanche 1 pulgada
Válvula de bola de 1 pulgada PVC
Reducción tigre roscable 1" x ½
Teflón 3/4" x 15 mm
Tubo 1 ½ pulgada PVC (50cm)
Pegante para PVC
Limpiador PVC
Codos de PVC
Conector macho de 2 pulgada PVC
Conector hembra de 2 pulgada PVC
Manguera festo N° 6. 3 m.
Racor festo N°6. 3
Neumático (Pequeño)

Materia prima y relación Sustrato/Agua/Inoculo. Para el cargue se mantiene la misma relación Sustrato/Agua y se adiciona porcinaza como iniciador del proceso de biodigestión. Teniendo en cuenta los siguientes datos:

- $Volumen\ de\ cargue\ materia\ prima = 36\ l$
- $Agua = 18\ l$
- $Materia\ prima\ (cáscara\ de\ yuca, papa\ y\ plátano) = 17.5\ kg$
- $Porcinaza = 500\ g$

Maquinaria y Equipos

La maquinaria y equipos utilizados para la realización de la presente investigación son detallados a continuación:

Balanza electrónica: Marca SCOUT PRO con resolución de 1 mg

Detector múltiple de gases Ventis MX4: Detector portátil que mide hasta 4 gases simultáneamente. Clasificados según directiva ATEX 94-9-CE con un alto nivel de seguridad, pantalla digital LCD con indicación en tiempo real de la concentración del gas detectado, alarmas por deficiencia y exceso de oxígeno y alarmas para sensores tóxicos.

La Figura 13 muestra el equipo utilizado y un registro en la pantalla LCD de una de las lecturas realizadas.

Figura 14.

Imagen Detector múltiple de gases Ventis MX4

Resultados y Análisis de Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el presente proyecto, en coherencia con los objetivos propuestos.

Inicialmente se cuantifican los residuos generados en una comida típica colombiana (sancocho), como cáscaras y residuos sólidos de alimentos. Por facilidad de adquisición y como consecuencia de la pandemia, se toman como base del estudio sólo las cáscaras de plátano, yuca y papa. Para su caracterización dada la imposibilidad de usar laboratorios se toman los datos obtenidos por (Arenas, 2019).

Los promedios de residuos generados durante un seguimiento de 20 días se muestran en la Tabla 11 denominada Relación del peso del residuo generado y peso de entrada del producto.

Tabla 11.

Relación del peso del residuo generado y peso de entrada del producto

Papa			Yuca			Plátano		
Entrada (g)	**Residuo (g)**	**Residuo %**	**Entrada (g)**	**Residuo (g)**	**Residuo %**	**Entrada (g)**	**Residuo (g)**	**Residuo %**
760	223	29%	505	170	34%	500	192	38%
800	230	29%	500	153	31%	790	295	37%
800	226	28%	800	265	33%	815	300	37%
810	225	28%	750	251	33%	800	299	37%
790	200	25%	600	160	27%	500	186	37%
800	222	28%	1000	285	29%	750	265	35%
810	210	26%	720	230	32%	850	315	37%
800	241	30%	500	143	29%	1000	342	34%
795	205	26%	500	151	30%	512	200	39%
815	230	28%	500	160	32%	690	261	38%
800	219	27%	500	146	29%	800	290	36%
500	151	30%	650	165	25%	750	258	34%
750	220	29%	505	150	30%	600	210	35%
850	239	28%	510	143	28%	1000	335	34%
1000	274	27%	990	260	26%	720	220	31%
350	97	28%	1000	263	26%	500	185	37%
690	186	27%	1010	257	25%	500	179	36%
1100	245	22%	1100	297	27%	500	196	39%
950	231	24%	750	222	30%	500	160	32%
500	129	26%	510	165	32%	650	193	30%

Papa			Yuca			Plátano		
Entrada (g)	**Residuo (g)**	**Residuo %**	**Entrada (g)**	**Residuo (g)**	**Residuo %**	**Entrada (g)**	**Residuo (g)**	**Residuo %**
Promedio		**27%**	**Promedio**		**29%**	**Promedio**		**36%**
Varianza		**0,00039**	**Varianza**		**0,00074**	**Varianza**		**0,0007**
Desviación		**0,0198**	**Desviación**		**0,0272**	**Desviación**		**0,0265**
Promedio Total						**31%**		

De acuerdo con los resultados obtenidos en la cuantificación de los residuos generados en el estudio, se puede encontrar que se generan 31% de residuos, siendo el de mayor aporte el plátano, seguido de la yuca y la papa en su orden. Los resultados obtenidos muestran una desviación estándar y varianza cercana a la media lo que indica la confiabilidad de los datos del estudio.

Los residuos orgánicos domésticos tienen un potencial de generación de metano de 0.1 a 0.93 m3 sobre 1 kg de materia seca (Surendra, Takara, Hashimoto, & Khanal, 2014). En la cuantificación de los residuos de estudio en una comida de una familia colombiana promedio se puede generar más de 2 kg de residuos de este tipo.

Los residuos sólidos orgánicos se degradan bajo condiciones de anaerobiosis no controladas dando como resultado la generación de biogás CH_4 60%, CO_2 40% lixiviados e insectos y roedores (Hernández, 2013).

Por lo expuesto, es posible obtener biogás de residuos sólidos de alimentos (cáscaras), contribuyendo al mejoramiento del medio ambiente y a la tendencia de cero emisiones.

Adaptando la tabla Excel de la metodología de Campus Cuní y bajo estos parámetros se realizaron los diferentes experimentos o pruebas, mejorando el prototipo de acuerdo con los resultados y la experimentación en campo, se evidencio que en los ensayos ESM:1, ESM:2, ESM:3 y ESM:4 no se obtuvieron resultados favorables en términos de alta producción de gas, debido a que presentaban fugas tanto de gas como de sustrato y por la ausencia de un inoculo iniciador.

En la prueba ESM:5 se pudieron corregir estos problemas antes mencionados, alcanzando el cumplimiento de nuestro objetivo principal “Obtener biogás a partir de cáscaras y residuos sólidos de alimentos”.

De acuerdo a lo expuesto se pudo determinar que el tiempo de retención de la prueba es de 30 días, aclarando que este tiempo se refiere al requerido por las bacterias para degradar la materia orgánica.

La velocidad de degradación depende en gran parte de la temperatura, mientras mayor sea la temperatura, menor es el tiempo de retención o fermentación para obtener una buena producción de biogás. (Rodríguez Pachón & García Cepeda, 2017, pág. 26)

Las temperaturas máximas diarias de la población de Girón Santander para la época del estudio oscilaron entre 27 y 25 °C y el biodigestor inicia su trabajo de degradación a partir del tercer día de acuerdo con lo observado en el neumático utilizado como medio de almacenamiento de gas, donde se presume que hay presencia de gas, debido a que la digestión anaeróbica puede ocurrir entre un amplio rango de temperaturas (5-60°C).

Para determinar la presencia de gas se utiliza el Detector múltiple de gases Ventis MX4 y se determina presencia de gas en mayor volumen a partir del día 16, consiguiendo el logro tercer objetivo específico.

Se puede identificar la presencia de gas metano (CH_4) con permanganato de potasio diluido, pero dadas las condiciones de la pandemia esta prueba no se realiza.

Asimismo, se ha desarrollado una técnica por columnas de desplazamiento para la medición del metano mediante un procedimiento indirecto con sensores de bajo costo y para concentraciones del 1% de volumen, pero de acuerdo con los argumentos ya expuestos solo se utiliza la determinación mediante el dispositivo Ventis MX4.

Conclusiones

De acuerdo con lo establecido en el proyecto los residuos generados en la cocción de plátano, yuca y papa están en un promedio del 31% lo que indica que con los residuos generados en las comidas diarias se puede alimentar un biodigestor del prototipo diseñado. Los resultados obtenidos en la cuantificación de los residuos generados muestran una desviación estándar y varianza cercana a la media lo que indica la confiabilidad de los mismos.

Es posible obtener biogás de residuos sólidos de alimentos (cáscaras), contribuyendo al mejoramiento del medio ambiente y a la tendencia de cero emisiones optimizando el uso integral de los alimentos consumidos.

Para el diseño de un biodigestor se deben tener en cuenta parámetros tales como: relación entre el volumen del digestor, volumen de la cámara y volumen de la cúpula. Asimismo, es importante tener en cuenta la compatibilidad entre los materiales a utilizar en las diferentes partes del diseño (polímeros, solventes y pegantes para la fijación mecánica) teniendo en cuenta las características físicas, mecánicas y químicas de los materiales utilizados.

El prototipo diseñado debe ubicarse en un lugar fijo bajo condiciones estables de temperatura y en estado de reposo, de tal forma que los aditamentos no se fracturen generando fugas.

El prototipo diseñado es de bajo costo, de fácil adquisición y puesta en marcha viable como alternativa de solución a la generación de energía limpia para la población rural y urbana con poco acceso a este tipo de servicios básicos.

Recomendaciones

Se debe continuar con el proyecto de tal forma que se puedan cuantificar los componentes del gas resultante mediante análisis cromatográfico para poder determinar la concentración de CH_4, aunque, el tema no estaría dentro de nuestras áreas de estudio la optimización de los recursos y el cuidado del medio ambiente es un tema transversal a todas las disciplinas.

Como la revisión bibliográfica demuestra que los gases obtenidos en este tipo de biodigestores no son del todo limpias (por la presencia de sulfuros y otros elementos contaminantes) se debe trabajar en el manejo de sistemas de limpieza de dichos compuestos.

Es necesario implementar este tipo de proyectos a nivel rural con el apoyo de entes gubernamentales ya que los datos reportados hasta el momento dan cuenta de pocos proyectos de este tipo.

Debe haber mayor apoyo institucional para este tipo de iniciativas de los semilleros de investigación.

Referencias Bibliográficas

André, F. J., De Castro, L. M., & Cerdá, E. (2011). Las energías renovables en el ámbito internacional. *Cuadernos económicos de ice N.º 83*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Andre/publication/277269010_Las_energias_renovables_en_el_ambito_internacional/links/5582861308ae12bde6e4c5bf/Las-energias-renovables-en-el-ambito-internacional.pdf

Arenas Guayazan, B. D. (2019). *Propuesta para el diseño de un biodigestor anaerobio como sistema de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos, generados en las viviendas del proyecto "La Villa Solar" ubicado en la ciudad de Buenaventura- Colombia.*

Ariza Martínez, J., Sanabria Velandia, R., López Martínez, G., & Gómez Torres, L. (2017). Propuesta para el tratamiento de porcinaza generada en la granja porcícola "El Encanto" ubicada en San Juan de Rioseco. Letras ConCiencia TecnoLógica, (17), 3-11.

Bautista Buhigas, A. (2010). *Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos: (Estelí, Nicaragua).*

Browne, J. D., & Murphy, J. D. (2014). The impact of increasing organic loading in two phase digestion of food waste. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148114002778

Da Silva, J. E., & Ariane Correia, L. (2020). Biodigestor Sertanejo Como Alternativa Para a Conservação Do Semiarido Potiguar. *Holos 6*, 1–11. doi:10.15628/holos.

Demirel, B., Scherer, P., Yenigun, O., &amp, & Onay, T. T. (2010). Production of methane and hydrogen from biomass through conventional and high-rate anaerobicdigestion processes. *Critical Reviews in Environmental Science andTechnology (Vol. 40, Issue 2)*.

Fundación Endesa. (junio de 2021). *Cómo funciona una central eléctrica de biomasa*. Obtenido de https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-de-biomasa

García Páez, V. (s.f.). Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático. Obtenido de Conceptos básicos. Beneficios de su producción y la aplicación de sus sub-productos. Virginia García Páez. Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio: https://www.gba.gob.ar/sites/default/files/agroindustria/docs/Manual_de_Biogas01.pdf

Hernández, P. (2013). Evaluación del balance de masa y energía para el diseño de un biodigestor de flujo continuo. *Cuerpo Académico de Sustentabilidad Enérgetica, Ciencias Básicas e Ingenierías de la Universidad Autónoma de Nayarit, Ciudad de la Cultura "Amado Nervo", Col. Los Fresnos Tepic, Nayarit. México. C.P. 63190.* Obtenido de edisa.net/doc/artSim2013/TratamientoYValorizacionDeResiduos/Evaluacion%20Balance%20Masa%20Energia%20Diseno%20Biodigestor%20Biogas%20Biomasa.pdf

Hettiaratchi, P., Jayasinghe, P., Tay, J., &amp, & Yadav, S. (2015). Recent Advances of Biomass Waste to Gas Using Landfill Bioreactor Technology. *A Review.Current Organic Chemistry, 19(5)*, 413–422.

Kalia, V. C., & Joshi, A. P. (1995). Conversion of waste biomass (pea-shells) intohydrogen and methane through anaerobic digestion. *Bioresource Technology 53(2), ,* 165–168.

Manual de uso del biodigestor. (s.f.). https://www.santafe.gob.ar/ms/academia/wp-content/uploads/sites/27/2019/09/Manual-de-uso-de-biodigestores-1000l.pdf

Martinez Hernández, C. M., Oechsner, H., Brulé, M., & Marañon Maison, E. (2014). Estudio de algunas propiedades físico-mecánicas y químicas de residuos orgánicos a utilizar en la

producción de biogás en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, *23*(2), 63-69. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2071-00542014000200011&lng=es&nrm=iso&tlng=en

Multee Biogás . (2017). *Sistema Lagoa Coberta – Fluxo Constante*. Obtenido de https://biogas.agr.br/plantas/

Nakasima-López, M., Taboada-González, P., Aguilar-Virgen, Q., & Velázquez-Limón, N. (2017). Adaptación de Inóculos Durante el Arranque de la Digestión Anaerobia con Residuos Sólidos Orgánicos. *Información tecnológica*, *28*(1), 199-208. https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000100020

Parra-Ortiz, D. L.-L.-L. (2019). Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos. *UIS Ingenierías, 18(1),* 149–160. Obtenido de https://www.redalyc.org/journal/5537/553762463014/html/

Quintero Jaramillo, J. A., Gámez Ávila, C. C., & Lozano Triana, S. M. (2018). *(). Produciendo biogás y abono en mi finca : estrategias para el aprovechamiento de residuos orgánicos mediante la construcción e instalación de biodigestores.* Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA).

Rodríguez Pachón, D. A., & García Cepeda, A. F. (2017). *Diseño y construcción de un biodigestor para la producción de biogas*. Obtenido de https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/6949/DavidAlexanderRodriguezPach%c3%b3n2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rojas, J. F., & Ñañez, L. (2017). *Diseño e implementación de un Biodigestor en la granja porcícola San Sebastián del municipio de Timaná – Huila, como estrategia de*

aprovechamiento de los residuos generados para la fertilización de pasturas y la generación de biogás.

SantiagoAguiar, N., Chicaiza, E., Diéguez-Santana, K., & Caicedo, W. O. (2019). Composición química de subproductos agroindustriales destinados para la alimentación de cerdos. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*. Obtenido de https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/04/subproductos-alimentacion-cerdos.html

Surendra , K., Takara, D., Hashimoto, A., & Khanal, S. (2014). Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 31*, 846–859. DOI: 10.1016/j.rser.2013.12.015.

“Valora. (2021, noviembre 12). Nueva planta de biomasa busca asegurar suministro de energía en Puerto Carreño. *Valora Analitik*. https://www.valoraanalitik.com/2021/11/12/planta-biomasa-asegurar-suministro-energia-puerto-carreno/