

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN SISTEMA DE BIODIGESTIÓN PARA EL
APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS EN LA PLAZA DE
MERCADO DE VILLA DE LEYVA, BOYACÁ**

PRESENTADO POR:

PLAZAS LÓPEZ, KATERIN DAYANA

VARGAS SUÁREZ, XIMENA ALEJANDRA

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL

TUNJA, COLOMBIA

2024

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN SISTEMA DE BIODIGESTIÓN PARA EL
APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS GENERADOS EN LA PLAZA DE
MERCADO DE VILLA DE LEYVA, BOYACÁ**

PRESENTADO POR:

PLAZAS LÓPEZ, KATERIN DAYANA

VARGAS SUÁREZ, XIMENA ALEJANDRA

**OPCIÓN DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:**

INGENIERA AMBIENTAL

DIRECTORA:

PhD. VEGA LINA PATRICIA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA AMBIENTAL

TUNJA

2024

*A nuestros padres y angelitos en
el cielo, gracias por el apoyo y las
bendiciones que nos permitieron
hacer esto realidad.*

Agradecimientos

En primer lugar, queremos expresar nuestra profunda gratitud a Dios por brindarnos la fortaleza y la sabiduría necesarias para completar este trabajo de grado. A nuestra directora de tesis, la PhD. Lina Patria Vega, le agradecemos sinceramente por su invaluable guía, asesoría y constante apoyo a lo largo de todo el proceso. Su dedicación y experiencia han sido fundamentales para el desarrollo exitoso de este proyecto.

A nuestros familiares, padres y amigos, cuyo amor, comprensión y apoyo incondicional han sido el motor que nos impulsó a lo largo de este camino. Sin su aliento y paciencia, este logro no habría sido posible.

A la Universidad Santo Tomás, agradecemos profundamente por proporcionarnos los recursos y el entorno académico propicio que han permitido el desarrollo de nuestras habilidades y conocimientos. Nuestro reconocimiento también se extiende a todos los docentes que, con su compromiso y esfuerzo, contribuyeron significativamente a nuestra formación integral.

Por último, agradecemos sinceramente a todos aquellos que brindaron su apoyo y colaboración, facilitando así la culminación de esta tesis. Sus contribuciones han sido invaluable para este logro académico.

Tabla de contenido

Agradecimientos	4
Resumen	8
Abstract	9
Introducción	10
Objetivos	12
Objetivo General	12
Objetivos Específicos	12
Antecedentes	13
Antecedentes internacionales	13
Antecedentes nacionales.....	15
Antecedentes Regionales	17
Antecedentes locales.....	19
Marco Teórico	21
Aprovechamiento de los residuos orgánicos.....	22
Biodigestión	24
Eficiencia de la fermentación en biodigestores.....	24
Microorganismos implicados en el proceso de biodigestión.....	25
Partes de un biodigestor.....	26
Prototipo de biodigestores.....	27
Biodigestor tipo Plug Flow o tubular.....	28
Biodigestor domo flotante o biodigestor indio.....	29
Biodigestores semicontinuos o continuos húmedos.....	29
Marco Conceptual	30

Medio Ambiente.....	30
Educación ambiental.....	31
Contaminación por residuos orgánicos.....	31
Contaminación del suelo.....	31
Contaminación del agua.....	32
Contaminación del aire.....	32
Proliferación de vectores.....	32
Biodigestores.....	32
Marco Legal.....	33
Metodología	36
Etapa 1: Revisión bibliográfico	37
Etapa 2: Diagnostico de los residuos orgánicos generados en la plaza de mercado...	38
Etapa 3: Revisión de alternativas tecnológicas para la selección del biodigestor.....	39
Etapa 4: Factibilidad técnica y económica	40
Análisis y Discusión de resultados	42
Etapa 1: Revisión bibliográfico	42
Etapa 2: Diagnostico de los residuos orgánicos generados en la plaza de mercado...	46
Etapa 3: Revisión de alternativas tecnológicas para la selección del biodigestor.....	54
Etapa 4: Factibilidad técnica y económica	61
Impacto social y humanístico del proyecto.....	67
Conclusiones	69
Recomendaciones	71
Referencias	73

Lista De Tablas

Tabla 1 Marco Legal.....	33
Tabla 2 Cuadro Comparativo Biodigestores.....	42
Tabla 3 Ventajas Y Desventajas Biodigestores.....	44
Tabla 4 Caracterización De Los Residuos Orgánicos.....	48
Tabla 5 Relación Carbono – Nitrógeno. Mezcla De Residuos Y Gallinaza.....	51
Tabla 6 Humedad.....	51
Tabla 7 Relación Carbono – Nitrógeno Residuos Orgánicos.....	54
Tabla 8 Evaluación Comparativa.....	54
Tabla 9 Matriz DOFA.....	56
Tabla 10 Calculo Volúmenes Biodigestor.....	61
Tabla 11 Presupuesto Biodigestor Tubular Tipo Plug Flow.....	63
Tabla 12 Calculo Valor Presente Neto – Tasa Interna De Retorno.....	64

Lista De Figuras

Figura 1 Clasificación De Los Residuos Solido.....	20
Figura 2 Etapas De Gestión De Residuos.....	22
Figura 3 Diseño Metodológico.....	35
Figura 4 Sitio De Caracterización.....	46
Figura 5 Proceso De Caracterización.....	47
Figura 6 Diseño Biodigestor Software AutoCAD	60
Figura 7 Matriz Combinada EMP – Arboleda Y Conesa.....	65

Resumen

Esta investigación presenta una evaluación técnica y económica de un sistema de biodigestión para aprovechar los residuos orgánicos generados en la Plaza de Mercado de Villa de Leyva, Boyacá. El estudio aborda la problemática de la gestión de desechos orgánicos en espacios públicos de alta afluencia, proponiendo una solución que genera biogás.

La investigación se centra en analizar la viabilidad de implementar este sistema mediante la evaluación de volúmenes y tipos de residuos orgánicos, realizando un análisis técnico-económico adaptado a las condiciones locales y estimando los beneficios potenciales. La metodología empleada combina investigación de campo, análisis de tecnologías disponibles y evaluación económica.

El alcance del proyecto abarca desde la caracterización de los residuos hasta la propuesta detallada del sistema, con resultados potencialmente aplicables a otras plazas de mercado en Colombia y América Latina, contribuyendo así significativamente a la búsqueda de soluciones sostenibles para la gestión de residuos orgánicos en entornos urbanos y rurales.

Palabras Claves: Análisis Técnico- Económico, Biodigestión, Biogás, Evaluación Económica, Gestión, Investigación De Campo, Residuos Orgánicos, Sostenibilidad.

Abstract

This research presents a technical and economic evaluation of a biodigestion system to take advantage of the organic waste generated in the Market Square of Villa de Leyva, Boyacá. The study addresses the problem of organic waste management in public spaces of high affluence, proposing a solution that generates biogas.

The research focuses on analyzing the feasibility of implementing this system by evaluating volumes and types of organic waste, performing a technical-economic analysis adapted to local conditions and estimating the potential benefits. The methodology employed combines field research, analysis of available technologies and economic evaluation.

The scope of the project ranges from waste characterization to the detailed proposal of the system, with results potentially applicable to other marketplaces in Colombia and Latin America, thus contributing significantly to the search for sustainable solutions for organic waste management in urban and rural environments.

Key words: Technical-Economic Analysis, Biodigestion, Biogas, Economic Evaluation, Management, Field Research, Organic Waste, Sustainability.

Introducción

La gestión adecuada de los residuos orgánicos se ha convertido en un desafío crucial para las comunidades urbanas y rurales en todo el mundo. En este contexto, la presente evaluación se centró en la viabilidad técnica y económica de un sistema de biodigestión para aprovechar los residuos orgánicos generados en la Plaza de Mercado de Villa de Leyva, Boyacá. El proyecto surgió de la necesidad de abordar la problemática de los desechos orgánicos en espacios públicos de alta afluencia, como las plazas de mercado, que generaban cantidades significativas de residuos biodegradables diariamente.

La implementación de un sistema de biodigestión no solo representó una solución para la gestión de estos residuos, sino que también ofreció la posibilidad de generar energía renovable y subproductos útiles como biofertilizantes (Arauz, 2015). Se evaluó la viabilidad técnica y económica de implementar un sistema de biodigestión en la Plaza de Mercado de Villa de Leyva. Para esto, se analizaron los volúmenes y tipos de residuos orgánicos generados mediante una evaluación técnica y económica de un sistema de biodigestión adecuado a las condiciones locales y sus particularidades, estimando los potenciales beneficios económicos y ambientales. (Peláez Merchán, 2019).

Siguiendo este razonamiento, la metodología empleada combinó la investigación de campo para la recolección de datos sobre la generación de residuos, el análisis de tecnologías de biodigestión disponibles y la evaluación económica mediante herramientas de análisis financiero. Este enfoque integral permitió una visión completa de la viabilidad del proyecto, cuyo alcance abarcó desde la caracterización de los residuos orgánicos de la plaza de mercado hasta la propuesta detallada del sistema de biodigestión. Los resultados de este estudio no solo fueron aplicables a Villa de Leyva, sino que también podrían servir como referencia para proyectos similares en otras plazas de mercado de Colombia y América Latina (Arce, 2011).

Enmarcado en el área de la gestión ambiental y la ingeniería de procesos, contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles para el manejo de residuos y la generación de energía limpia en entornos urbanos. El proyecto demostró cómo la aplicación de tecnologías de biodigestión logra transformar un problema ambiental en una oportunidad de desarrollo sostenible para la comunidad.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnica y económica de un sistema de biodigestión que permita el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en la plaza de mercado de Villa de Leyva, Boyacá.

Objetivos Específicos

- Identificar la cantidad y composición de los residuos orgánicos generados por la Plaza de mercado de Villa de Leyva con el fin de establecer las condiciones del diseño del biodigestor.
- Determinar las especificaciones técnicas de biodigestores propuestos de acuerdo con el diagnóstico realizado.
- Realizar un estudio de factibilidad técnica y económica del biodigestor.

Antecedentes

A continuación, se presenta una revisión de los antecedentes internacionales, nacionales, regionales y locales que sustentan la relevancia de este estudio sobre la implementación de sistemas de biodigestión en la gestión de residuos orgánicos en plazas de mercado

Antecedentes Internacionales

Como primera referencia, se tiene el trabajo de Chillo y Paguay (2015), cuyo objetivo de estudio fue la implementación de un sistema de digestión anaeróbica de flujo constante para generar combustible gaseoso a partir de las excretas bovinas recolectadas en el predio rural denominado "La Poderosa" Dentro del marco teórico, se aborda la definición de biodigestor, su clasificación y tipos, componentes, ventajas y desventajas, la utilización y beneficios del biogás, los procesos del metano y los componentes del estiércol. Para el desarrollo e implementación del proyecto, se establecieron metodologías para la elección del material a analizar y el cálculo del volumen de insumos diario de estiércol que fue de ocho (8) vacas en un lapso de siete (7) días y la construcción e instalación de este, junto a la toma de muestras.

Dentro de la misma línea de investigación, Basurto y Huiza (2017), indagan en la instalación de un sistema de digestión anaeróbica utilizando desechos de origen bovino. El objetivo principal fue implementar un dispositivo de fermentación para producir gas combustible mediante el procesamiento de excrementos vacunos para uso doméstico en un predio agrícola denominado La Esperanza del municipio Calceta, Bolívar. El marco teórico abordó aspectos relacionados con el estiércol, sus ventajas y desventajas, la composición del biogás, las características de los biodigestores, los tipos de biodigestores, sus ventajas y desventajas, y las etapas de la biodigestión. La metodología empleada

fue de campo a nivel cuantitativo para la identificación de variables, distribuyéndolo en tres fases: la recopilación de información, la producción de residuos orgánicos ganaderos y la elaboración de cálculos necesarios para la implementación del biodigestor. Como técnica, se realizó una entrevista al propietario de la hacienda para conocer el estado del lugar y la cantidad de ganado. Como resultado, se construyó un biodigestor con plástico de polietileno de doble capa, produciendo alrededor de 2,506 m³ de gas en veinte (20) días, utilizable para fines domésticos como la cocción de alimentos.

Otro trabajo destacado es el realizado por Macas (2018), que propone la concepción y montaje de un sistema de digestión anaeróbica tipo salchicha en la provincia de Sucumbíos. Este estudio tenía como objetivo construir un digestor anaeróbico de estructura tubular flexible que beneficiaría agricultores residentes en el predio rural. Abordando temas como la contaminación, las alteraciones en los patrones climáticos globales, sus orígenes e impactos, el desarrollo sostenible, la responsabilidad social, el concepto de biodigestor, su historia, los diferentes tipos, sus beneficios, funcionamiento y mantenimiento. El enfoque metodológico adoptado fue de carácter analítico-observacional, ya que se analizaron las características del objeto de estudio, complementada con una investigación experimental mediante trabajo in situ. Además, se utilizó el método deductivo, partiendo de la teoría sobre energías renovables hasta llegar a las etapas de planificación y fabricación del sistema de digestión anaeróbica.

En cuarto lugar, Peláez (2019) por su parte diseña un sistema de fermentación sin oxígeno de carga intermitente para generar gas combustible en áreas económicamente vulnerables del municipio de Jipijapa. El marco teórico, ubicado en el capítulo 2, abordó conceptos relacionados con biodigestores, sus componentes, tipos, parámetros de funcionamiento, ventajas, desventajas y características, la digestión anaerobia y sus etapas, la biomasa y sus beneficios, la composición y utilización del biogás, y las energías renovables en Ecuador. En cuanto a la metodología, el trabajo adoptó un enfoque experimental, centrándose en el análisis de los procesos de descomposición sin oxígeno

utilizando desechos derivados de excrementos bovinos. Los métodos utilizados fueron cuantitativo, experimental, analítico y descriptivo, con el fin de identificar los componentes del biodigestor y su respectiva construcción. Las técnicas empleadas incluyeron el muestreo, el análisis de muestras para el estudio de parámetros, la observación directa e indirecta para conocer y explicar el propósito del problema investigado, y la revisión bibliográfica para la consecución y logro de las metas establecidas en la investigación.

Para finalizar los antecedentes internacionales, se encuentra el trabajo realizado por Martínez (2020), acerca de la generación de energía renovable a partir de desechos animales en una granja del área de Ipala. El objetivo de este estudio fue analizar la capacidad de obtención de combustible gaseoso utilizando los subproductos orgánicos del ganado. Se implementó una metodología que combina aspectos cuantitativos y descriptivos para la evaluación de la capacidad de generación de gas combustible a partir de los subproductos biodegradables ganaderos. La investigación se llevó a cabo en siete etapas distintas, comenzando con un análisis de literatura existente, seguido por la implementación del sistema de digestión, la cuantificación del gas generado y una estimación para identificar el impacto ambiental. En cuanto al marco teórico, abordó aspectos relacionados con la digestión anaerobia, sus etapas y parámetros clave, la composición, estimación, ventajas y aprovechamiento del biogás, el concepto de biodigestor y los diferentes tipos de biodigestores.

Antecedentes Nacionales

En Colombia, uno de los referentes más valiosos es la propuesta del desarrollo de un sistema de digestión sin oxígeno para aprovechar desechos biodegradables en un sector de Buenaventura, autoría de (Brandon Danilo Arenas Guayazan, 2019). El proyecto se enfocó en la gestión de desperdicios orgánicos generados en la preparación de alimentos en áreas habitacionales, destacando su valor como recurso dentro de una economía circular, esta iniciativa busca no solo beneficiar a la comunidad local, sino también contribuir

al ecosistema al disminuir el uso de vertederos, evitar la polución de fuentes hídricas y la tala de bosques, crear energía sostenible y generar fertilizante natural

Por otro lado, (Romero & Mendoza, 2022) realizaron un plan educativo sobre la gestión de desechos en el centro de abastos de Piedecuesta, en donde se revelaron desafíos significativos en la administración de desperdicios en locales que comercializan productos naturales, la investigación identificó incumplimientos normativos, como un amontonamiento de desechos biodegradables y la aparición de fauna nociva. La mayoría de los encuestados conocen los métodos de gestión de desperdicios, pero no las aplican, por estas problemáticas, se propone implementar una estrategia pedagógica de capacitación para el centro de distribución alimentaria de Piedecuesta, para mejorar la gestión de residuos y promover prácticas más sostenibles en este entorno comercial.

Así mismo, (Tapase & pawar, 2020) realizaron el diseño de biodigestor doméstico de cúpula fija para la degradación de residuos de cocina mediante reacciones mesófilas y termófilas (anaeróbicas), en donde se encontró que las tasas de producción de desechos no líquidos están aumentando rápidamente. Por lo que se determina la necesidad de resolver este problema segregando y degradando los residuos utilizando diversos avances tecnológicos. El objetivo de la tecnología de biogás es delinear las condiciones bajo las que los biodigestores serían viables para la sociedad y ayudar en el manejo ecológico de desperdicios hogareños y la obtención de gas combustible como recurso energético alternativo.

En este caso, los desechos orgánicos húmedos de los hogares se trituraron, se mezclaron con agua y se alimentó al biodigestor de cúpula fija que produjo alrededor de 0,4 metros cúbicos de gas por día. Al operar el biodigestor doméstico si no hay oxígeno en tanques sellados, se reducen los problemas relacionados con los olores, éste puede equiparse con paneles solares o

calentadores eléctricos, dependiendo del clima. La agenda principal es diseñar y fabricar un biodigestor económico, compacto y funcione eficazmente.

Adicionalmente, Cedeño (2019) construyó un biodigestor para estimar el potencial energético a partir de estiércol bovino en la zona rural de Santa Bárbara, municipio de Íquira, departamento del Huila. La finca presentaba una gestión deficiente de los subproductos y desechos originados de las heces del ganado vacuno, lo cual afectaba a la población vecina, causando problemas sanitarios. Ante esto, el trabajo pretendía instalar un sistema de digestión anaeróbica y analizar su capacidad para producir electricidad usando excrementos de vacunos en el predio. El marco teórico se basó en conceptos relacionados con biodigestores, digestión anaerobia y la generación de electricidad mediante el uso de gas combustible de origen biológico. La investigación empleó una metodología cuantitativa, siguiendo un proceso secuencial, probatorio y con medición de análisis de los procedimientos.

Antecedentes Regionales

Según (Chaves y Gelves, 2022), y su proyecto titulado acerca de la utilización de desechos biodegradables no líquidos para producir gas combustible y fertilizante líquido mediante un sistema de digestión anaeróbica casero en la zona rural de Cubará, Boyacá, con el fin de generar biogás como energía alternativa y biol como abono líquido, aprovechando los residuos de cocina. Aunque tuvieron desafíos técnicos que requirieron modificar el diseño y la frecuencia de alimentación del biodigestor, ninguno de los dos biodigestores produjo biogás, ambos demostraron su capacidad para generar abono líquido de alta calidad. Este abono líquido fertiliza suelos y mejora la producción agrícola en la finca, respaldados por ensayos de laboratorio que avalan su calidad, planteando su uso comercial en el futuro y ofreciendo un enfoque sostenible para manejar residuos orgánicos y la agricultura en la región. De igual manera, (María Fernanda Sotaquira Medina, 2021) diseñaron un sistema de digestión sin

oxígeno para utilizar la materia biodegradable producida en el centro de abastos de Sogamoso, en donde se determinó el diseño apropiado de un sistema de digestión anaeróbica para administrar los desperdicios orgánicos producidos según las directrices PGIRS la localidad a través del diagnóstico que incluyó el acopio y medición del peso de los desperdicios biodegradables, así como inspecciones al centro de abastos y al relleno sanitario, los datos recopilados permitieron identificar los promedios de generación en diferentes períodos.

Asimismo, (D Rodríguez Convers, 2022) evaluaron la viabilidad de implementar un biodigestor en la Granja Avícola La Carolina para generar energía renovable a partir de la gallinaza. Se determinó que la implementación del biodigestor es factible desde las perspectivas técnica, financiera y ecológica ya que podría cubrir el 70% de las necesidades energéticas de la granja, reduciendo costos y el impacto ambiental de la gallinaza. Se recomendó la implementación del biodigestor como una alternativa sostenible para el manejo de los excrementos avícolas y la producción de energía sustentable en el establecimiento avícola. De igual forma (ABELLO, 2018) en su proyecto presentó un análisis valioso de los desafíos que dificultan la implementación amplia de este avance tecnológico en la región. El estudio identificó una amplia gama de factores relevantes, incluyendo aspectos técnicos, socioeconómicos, institucionales y ambientales; tales como: la falta de conocimiento, la inversión inicial, la ausencia de apoyo institucional y las condiciones climáticas.

En ese mismo orden de ideas (Esther Nayive Gómez López, 2017) Ofreció un planteamiento alentador para la gestión ecológica de los desechos de porcinos en la región. Con un análisis económico más profundo, un estudio de mercado, un plan de gestión detallado, el involucramiento de los habitantes locales y la evaluación de factores de largo alcance, el proyecto puede aumentar sus posibilidades de éxito y producir un efecto beneficioso en la sociedad local y el ecosistema.

Antecedentes Locales

Al realizar la búsqueda de antecedentes a nivel local, hay una tesis del año 2021 hecha para el municipio de Villa de Leyva que buscó promover el emprendimiento y el desarrollo de habilidades empresariales en los estudiantes. Con una definición clara de objetivos, una estructura pedagógica sólida, mecanismos de evaluación y seguimiento, estrategias para garantizar la sostenibilidad y una vinculación efectiva con el sector empresarial.

La Corporación Autónoma Regional de Boyacá (CORPOBOYACA) propuso en el año 2018 construir un pequeño biodigestor para solucionar el manejo inapropiado de desechos sólidos y efluentes en la vereda El Roble Alto. Su estudio demostró la importancia de desarrollar iniciativas de esta naturaleza para promover la educación y sensibilización en la sociedad, al igual que la satisfacción de necesidades y problemáticas actuales sin poner en riesgo la habilidad de las próximas generaciones para cubrir sus propias necesidades. Esto se traduce en una utilización más racional de los recursos del entorno natural y la adopción de fuentes de energía renovables (MUNEVAR, 2021).

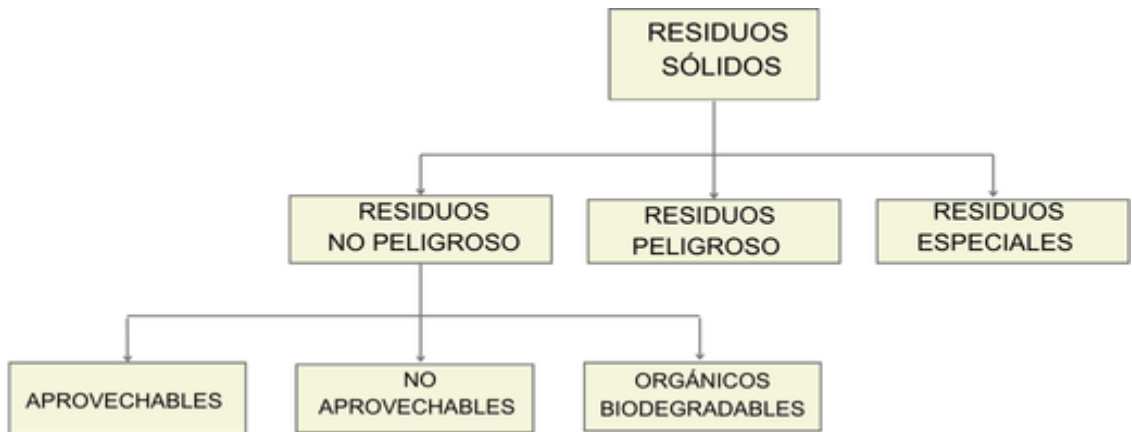
En general, la importancia de estos antecedentes radica en proporcionar una base sólida de conocimiento y experiencias previas que guían a la implementación de sistemas de biodigestión en diversos contextos. Al aprender de estas experiencias, se pueden adaptar y mejorar las prácticas a nuestros contextos, promoviendo soluciones innovadoras y efectivas para la gestión ambiental y la generación de energía limpia.

Marco Teórico

Los residuos sólidos comprenden cualquier material o sustancia desechada que ya no se desea o necesita, procedente de hogares, negocios, industrias y otras actividades humanas. Es fundamental clasificar estos residuos adecuadamente para gestionarlos y tratarlos de manera efectiva.

Como se muestra en la Figura 1, se presenta una clasificación detallada de los residuos sólidos, resaltando su diversidad según su origen y composición. Esta categorización permite identificar los diferentes tipos de residuos que deben manejarse de manera específica para minimizar su impacto ambiental y promover prácticas sostenibles.

Figura 1. Clasificación de los residuos sólidos



Fuente: Autores 2024

Dentro de la clasificación de los residuos sólidos se encuentran varias categorías que facilitan la identificación y gestión efectiva de diferentes tipos de desechos

1.1. Desechos inofensivos: Se trata de materiales descartados que no suponen una amenaza para el bienestar de las personas ni para la naturaleza. Entre estos se pueden mencionar elementos como papelería usada, envases plásticos, objetos metálicos, recipientes de cristal y sobras alimenticias. (Arauz, 2015).

1.2. Residuos peligrosos: Son residuos que pueden ser nocivos para la salud humana o el medio ambiente. Algunos ejemplos incluyen productos químicos, baterías, pintura y aceite de motor. (Sáez, Urdaneta,2014)

1.3. Residuos Especiales: Estos desechos necesitan un tratamiento particular debido a su composición y propiedades específicas, con el fin de prevenir daños a la salud de las personas y al entorno natural. Se diferencian de los desechos ordinarios por su naturaleza potencialmente nociva, su tamaño o su masa. (Tapase, Pawar,2020)

1.4. Utilización Eficiente De Desechos Biodegradables

La utilización de los desechos biodegradables constituye una alternativa sostenible para convertirlos en recursos útiles, evitando así su impacto negativo en el medio ambiente. Este proceso involucra la transformación de residuos biodegradables en productos beneficiosos como biogás o fertilizantes, mediante métodos que promueven la reutilización y la reducción de residuos orgánicos.

Es crucial diferenciar y clasificar adecuadamente los tipos de residuos para evitar la mezcla con materiales peligrosos, metales pesados u otros contaminantes que podrían comprometer el proceso de aprovechamiento (Xavier, 2022). En este orden de ideas, según el autor son tres los factores que inciden para llevar a cabalidad dicho procedimiento como se muestra a continuación:

1.4.1. Humedad: La humedad adecuada fomenta la presencia de un nivel apropiado de agua resulta fundamental para el proceso de degradación de los

residuos orgánicos. El exceso de humedad puede dificultar el proceso y la falta de humedad puede retardarlo. (Arauz, 2015).

1.4.2. Temperatura: La temperatura ideal para la descomposición de la materia orgánica varía según el método utilizado. El compostaje, por ejemplo, funciona mejor a temperaturas entre 40°C y 60°C. (Tapase, Pawar,2020)

1.4.3. Tamaño de partículas: El tamaño de las partículas de la materia orgánica también afecta el proceso. Las partículas más pequeñas se descomponen más rápido que las partículas más grandes. (Tapase, Pawar,2020)

Al implementar alternativas de aprovechamiento de residuos, es crucial considerar el entorno para minimizar impactos ambientales. Esto es relevante para la selección de mecanismos de biodigestión a partir de residuos orgánicos. Estos procesos transforman los desechos en recursos útiles, reduciendo la generación de residuos y promoviendo prácticas sostenibles que reduzcan cualquier efecto adverso en el entorno circundante. (Arauz, 2015).

Algunos factores por considerar son:

1.4.4. Espacio disponible: El espacio disponible determinará la escala del proyecto y el método de aprovechamiento más adecuado.

1.4.5. Disponibilidad de recursos: Se debe verificar la disponibilidad de recursos como agua, energía y mano de obra.

1.4.6. Impacto ambiental: Se debe evaluar el impacto ambiental del proyecto y tomar medidas para mitigarlo.

2. Manejo Responsable De Desperdicios

El manejo de desechos implica la recogida, transporte, tratamiento y disposición de materiales descartados de manera segura y eficaz. El objetivo del manejo de desechos busca salvaguardar el entorno natural y el bienestar de las personas (Juan Camilo Buitrago, 2018).

En la Figura 2 se presenta un diagrama de procesos que detalla meticulosamente las diferentes etapas críticas involucradas en la gestión de residuos, ofreciendo una representación visual exhaustiva del ciclo completo de gestión desde la generación inicial de residuos hasta su disposición final.

Figura 2. Etapas de gestión de residuos



Fuente: Autores 2024

Basado en lo anterior, se procede a profundizar en cada una de las etapas del proceso de gestión de residuos, tal como se detalla en la Figura 2:

2.1. Generación: Es la fase inicial del ciclo en la que se generan residuos, los cuales pueden originarse en hogares, empresas, industrias y otras actividades humanas. (Sáez,Urdaneta,2014)

2.2. Recolección: Implica la acción de recolecta de residuos desde los puntos de generación por parte de empresas públicas o privadas. (Arauz, 2015).

2.3. Transporte: Etapa en la cual los residuos se trasladan desde los puntos de recolección hasta las instalaciones de tratamiento o eliminación. (Tapase, Pawar,2020)

2.4. Disposición final: Comprende el proceso donde se eliminan los residuos según su composición mediante métodos de eliminación que incluyen vertederos e incineración. (Sáez,Urdaneta,2014)

2.5. Reducción, reutilización y reciclaje (3R): Estrategias fundamentales para la gestión de residuos. La disminución en la adquisición y uso de bienes y prestaciones conlleva a una menor generación de desechos, lo que genera menos residuos, y reutilizar significa prolongar el uso de productos y materiales para un propósito diferente al diseñado originalmente, cerrando el ciclo reciclando la cual convierten los residuos en nuevos materiales y objetos que fomenten la economía circular. (Arauz, 2015).

3.Biodigestor

Un biodigestor se define como un recipiente herméticamente cerrado y libre de oxígeno, diseñado para descomponer la materia orgánica como desechos de animales y cultivos mediante bacterias anaeróbicas. Este proceso origina biogás, que es principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), junto con un subproducto llamado biol o lodo digerido, que se constituye como un fertilizante rico en nutrientes (JHON CAMILO ESPAÑOL AVILEZ, 2022).

3.1. Eficiencia de la fermentación en biodigestores (Factores)

La eficiencia de la fermentación en biodigestores está altamente influenciada por varios factores que regulan la degradación de los compuestos orgánicos y producción del biogás. Cada factor juega un rol fundamental en la eficacia del proceso, determinando tanto la cantidad generada como su composición. (Sáez,Urdaneta,2014)

A continuación, se profundiza en los factores claves que conforman el proceso de eficiencia de la fermentación en los biodigestores:

3.1.2. Tipo de materia orgánica: La eficiencia del biodigestor depende del tipo de materia orgánica que se utiliza. Los materiales con alto contenido de celulosa y lignina, como los residuos agrícolas, son más difíciles de descomponer y pueden tener un menor rendimiento de biogás. (Arauz, 2015).

3.1.3. Proporción C: N: El equilibrio entre carbono y nitrógeno (C/N) óptima para el proceso de descomposición sin oxígeno se sitúa en 25 partes de carbono por 1 de nitrógeno. Si la relación C/N es demasiado alta, la digestión se ralentizará y se producirá menos biogás. Si la proporción entre carbono y nitrógeno es, se producirán compuestos amoniacales, que obstaculizarían el funcionamiento de los microorganismos. (Sáez,Urdaneta,2014)

3.1.4. Temperatura: La temperatura ideal para la digestión anaeróbica es de 35-38°C. Las temperaturas más bajas ralentizarán la digestión, mientras que las temperaturas más altas pueden matar las bacterias. (Tapase, Pawar,2020)

3.1.5. pH: El pH ideal en el proceso de descomposición anaeróbica es de 6.5-7.5. Si el pH es demasiado bajo, la digestión se ralentizará y se producirá menos biogás. Si el pH es demasiado alto, se producirá compuestos nitrogenados, que podrían obstaculizar el funcionamiento de los microorganismos. (Arauz, 2015).

3.1.6. Tiempo de retención hidráulico (TRH): El TRH es el tiempo que la materia orgánica permanece en el biodigestor. Un TRH más largo permite una mayor descomposición de la materia orgánica y una mayor producción de biogás, por lo tanto, el TRH de la materia orgánica es aproximadamente de dos a tres semanas. (Sáez,Urdaneta,2014)

3.1.7. Inhibidores: Algunos materiales pueden inhibir la actividad bacteriana en el biodigestor, como los metales pesados, los detergentes y los antibióticos.

3.1.8. Diseño y construcción: El diseño y la construcción del biodigestor también pueden afectar su eficiencia. Un biodigestor bien diseñado tendrá una

buena mezcla de la materia orgánica y una eficiente separación del biogás. (Tapase, Pawar,2020)

4. Microorganismos Implicados en el proceso de biodigestión

En este apartado, se abordó el proceso de biodigestión como un mecanismo biológico anaeróbico, donde interactúan microorganismos especializados encargados de descomponer materia orgánica y residuos de alimentos en ausencia de oxígeno. Esto permite evaluar la eficiencia y el rendimiento del proceso, haciendo énfasis en su simplicidad operativa. El enfoque principal es garantizar la sostenibilidad y la composición de los grupos de microorganismos que intervienen en el proceso de biodigestión (Tapase, Pawar,2020):

4.1. Grupo I “Bacterias hidrolíticas y fermentativas”: Este primer grupo, son microorganismos que inician el proceso de biodigestión, su función principal es la producción de enzimas extracelulares que descomponen polímeros complejos, como los polisacáridos, proteínas y lípidos, en moléculas más pequeñas y simples. Estas moléculas de bajo peso molecular, como azúcares, aminoácidos, ácidos grasos y alcoholes, logran ser transportadas mediante la membrana celular de las bacterias logrando así la fermentación. (*JHON CAMILO ESPAÑOL AVILEZ, 2022*)

4.2. Grupo II “Bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno”: Siguiendo esta cadena de grupos, las bacterias acetogénicas se encargan de fabricar el hidrógeno mediante ácidos grasos volátiles (AGV). Las producen las bacterias hidrolíticas y fermentativas para originar acetato e hidrógeno. (Sáez,Urdaneta,2014)

4.3. Grupo III “Bacterias metanogénicas”: Finalmente, las bacterias metanogénicas participan en el proceso de biodigestión utilizando el acetato e hidrógeno producidos por las bacterias acetogénicas para generar metano y dióxido de carbono como resultado final. (Sáez,Urdaneta,2014)

5. Alternativas Bioquímicas para la Obtención de Biogás: Fases y Procesos

Para la obtención de biogás, se describen a continuación una serie de alternativas bioquímicas que se desarrollan en las siguientes fases:

5.1. Hidrólisis: En esta fase, las bacterias hidrolíticas descomponen los polímeros complejos (como macronutrientes orgánicos) en compuestos más pequeños y que se disuelven fácilmente (por ejemplo, monosacáridos, componentes proteicos y componentes lipídicos) mediante la acción de enzimas extracelulares. (Arauz, 2015).

5.2. Acidogénesis: Las bacterias ácido génicas fermentan las moléculas de azúcar y aminoácidos producidas en la hidrólisis, generando ácidos grasos volátiles (AGV) tales como compuestos orgánicos de cadena corta (por ejemplo, etanoico, propanoico y butanoico), además de H₂ y CO₂ (derivados de carbohidratos, proteínas y lípidos). (Tapase, Pawar, 2020)

5.3. Acetogénesis: Las bacterias acetogénicas convierten los AGV de la acidogénesis en acetato, junto con más hidrógeno y dióxido de carbono.

5.4. Metanogénesis: Las bacterias metanogénicas utilizan el acetato e hidrógeno producidos en las fases anteriores para generar metano (CH₄), el principal componente del biogás, y dióxido de carbono (CO₂).

6. Partes de un biodigestor

Se define como biodigestor a una estructura diseñada encargada de facilitar el proceso de biodigestión, el cual consiste en microorganismos descomponedores de materia orgánica en ausencia de oxígeno que da como resultado producción

de biogás, principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), lo cual desencadena un subproducto conocido como digestato, que actúa como un fertilizante rico en nutrientes. (Tapase, Pawar, 2020)

A partir de lo anterior, se crea un sistema conocido como biodigestor diseñado para maximizar la eficiencia del proceso, en esta sección se hablará específicamente de la conformación interna criticada para el funcionamiento óptimo.

6.1. Cámara de carga: Es donde se introduce la materia orgánica a digerir.

6.2. Reactor: Encargado del proceso químico de degradación de los componentes orgánicos orgánica se puede construir utilizando diversos elementos, incluyendo reciclables, tales como envolturas de polímeros. Sus dimensiones están vinculadas a la producción de gas biológico obtenido y almacenado, además de los recursos iniciales necesarios para su funcionamiento. (Arauz, 2015).

6.3. Cámara de descarga: Sección de depósito del material a emplear.

6.4. Tubería: Conducto de transporte del biogás.

6.5. Válvula: Dispositivo mecánico que el flujo de biogás, mediante la apertura o cierre de los gases de forma automática cuando el usuario no este vigilando.

6.6. Medidor de biogás: Dispositivo que permite al usuario conocer siempre la concentración de emisiones gaseosas dentro del recipiente y su liberación si es necesario. Los sistemas caseros de biodigestión suelen emplear instrumentos sencillos como medidores de presión y válvulas operadas manualmente para situaciones críticas. Por otro lado, las instalaciones industriales pueden contar con mecanismos más sofisticados y automatizados, que facilitan el monitoreo y la regulación remota de la presión. (Arauz, 2015).

6.7. Trampa de agua: Encargada de evitar que el agua retroceda hacia el reactor, actuando como una barrera que impide el paso de un lugar al otro.

7. Tipos de Biodigestores

En el ámbito global, existen diversos tipos de biodigestores que se seleccionan según la capacidad de tratamiento de materia orgánica. Algunos de los tipos utilizados son:

7.1. Biodigestores Domésticos: Trabajan como alternativa sostenible para el hogar, siendo una tecnología simple y eficiente que convierte los desechos orgánicos en biogás, un combustible limpio y renovable. Estos biodigestores son ideales para fincas o propiedades donde se generan diversos tipos de desechos orgánicos, como restos de cosecha, estiércol animal y residuos de cocina. (Arauz, 2015).

7.2. Biodigestores de tipo Comunitario: Es una solución energética comunitaria, ya que este tipo de tecnologías representa una alternativa sostenible y eficiente para la gestión de residuos orgánicos y la generación de energía limpia a nivel comunitario. Estos biodigestores operan de manera similar a los domésticos, pero a mayor escala, permitiendo procesar grandes cantidades de materia orgánica procedente de diversas fuentes, como:

7.2.1. Residuos agrícolas: Restos de cosecha, cáscaras, estiércol animal.

7.2.2. Residuos domésticos: Restos de comida, cáscaras de frutas y verduras.

7.2.3. Residuos industriales: Desechos orgánicos de la industria alimentaria

7.3. Biodigestores Industriales: Son sistemas a gran escala que descomponen los compuestos orgánicos en un entorno anaeróbico, produciendo gas combustible y un efluente rico en nutrientes. Estos sistemas se utilizan en diversos sectores industriales, incluyendo:

7.3.1. Rellenos sanitarios: Los biodigestores capturan el metano generado por rellenos sanitarios, convirtiéndolo en biogás. Este biogás se puede utilizar para generar electricidad o combustible para vehículos.

7.3.2. Plantas de tratamiento de aguas residuales: Los biodigestores procesan los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales, produciendo biogás y un efluente que puede ser utilizado como fertilizante.

7.3.3. Industrias de alimentos: Los biodigestores descomponen los residuos orgánicos generados en las industrias de alimentos, como la vinaza de la industria azucarera o los residuos de mataderos, produciendo biogás y un efluente que puede ser utilizado como fertilizante o para riego. (Peláez Merchán, 2019).

7.4. Biodigestor tipo Plug Flow o tubular: Este sistema se presenta como una alternativa de bajo costo y fácil manejo para la producción de biogás a partir de materia orgánica. Se caracteriza por su diseño simple, utilizando una bolsa o balón inflable de plástico resistente, generalmente de polietileno de alta densidad (HDPE).

Al igual que otros tipos de biodigestores, funciona mediante la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. Los desechos orgánicos se mezclan con agua y se introducen en la bolsa, donde las bacterias anaeróbicas presentes descomponen la materia orgánica, liberando biogás como producto final. Este biogás se almacena en la bolsa y se puede utilizar para cocinar, generar electricidad o alimentar motores (Peláez Merchán, 2019).

7.5. Biodigestor Domo Flotante o Biodigestor Indio: Este tipo de biodigestor se distingue por contar con un recipiente móvil en forma de cúpula que se eleva sobre el material en fermentación o sobre un anillo lleno de agua, dependiendo de su diseño particular. El componente principal donde ocurre la biodigestión se fabrica utilizando materiales resistentes como hormigón o albañilería. Este sistema, al igual que otros biodigestores, aprovecha el proceso de degradación de sustancias orgánicas en ausencia de oxígeno. Se introduce una mezcla de residuos orgánicos y agua en la cámara principal, donde los microorganismos que operan sin oxígeno transforman estos desechos, generando biogás como resultado. Este gas se acumula en la cúpula móvil, la cual se eleva a medida que aumenta la producción de gas. (Peláez Merchán, 2019).

7.6. Biodigestor Con Tanque De Almacenamiento Tradicional Y Cúpula De Polietileno: Este tipo de biodigestor combina un tanque de almacenamiento tradicional, construido con materiales como piedra o ladrillo, con una cúpula semiesférica de polietileno de película delgada. La cúpula actúa como depósito de gas, almacenando el biogás producido durante la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. Similar a otros biodigestores, los desechos orgánica se mezcla con agua y se introduce en el tanque de almacenamiento, donde las bacterias anaeróbicas descomponen la materia orgánica, liberando biogás como subproducto. El biogás se acumula en la cúpula de polietileno, que se expande a medida que aumenta la cantidad de gas (Arauz, 2015).

7.7. Biodigestores Semicontínuos o Continuos Húmedos en dos Etapas: Estos biodigestores se caracterizan por dividir el proceso de digestión en dos fases:

7.7.1. Hidrólisis: En esta etapa, la materia orgánica se descompone en compuestos más simples mediante la acción de bacterias acidogénicas. Este proceso ocurre en un reactor con un pH ácido (alrededor de 5.5).

7.7.2. Metanogénesis: En esta etapa, los compuestos simples producidos en la hidrólisis se convierten en biogás por bacterias metanogénicas. Este proceso ocurre en un reactor con un pH neutro (alrededor de 7). La materia orgánica se introduce en el primer reactor, donde las bacterias acidogénicas la descomponen en ácidos orgánicos. Estos ácidos son luego transportados al segundo reactor, donde las bacterias metanogénicas los convierten en biogás.

El biogás se almacena y se utiliza para diferentes propósitos, como cocinar, generar electricidad o alimentar motores (Peláez Merchán, 2019).

Marco Conceptual

Según el Ministerio de Ambiente (2018), el proceso de gestión de materiales reciclables es un componente adicional en el manejo integral de desechos. Este proceso involucra varias fases: inicialmente, se procede a la recolección de elementos reutilizables que han sido previamente segregados en origen por los consumidores. Posteriormente, se lleva a cabo el traslado específico de estos materiales ya preseleccionados hacia centros especializados en su procesamiento. Finalmente, en estas instalaciones se ejecuta una evaluación detallada y cuantificación de los elementos recolectados. (p.11).

La implementación de procesos de aprovechamiento busca disminuir el volumen de desechos depositados en los rellenos sanitarios, reduciendo así el impacto ambiental negativo y promoviendo un enfoque más sostenible en el manejo de los residuos desde su generación hasta su transformación.

El medio ambiente, según la Universidad de Cambridge (2010), hace referencia las condiciones y factores que influyen en la vida y desarrollo de los individuos y las comunidades. Este incluye elementos naturales y artificiales interrelacionados y modificados por la acción humana. Según un estudio, el medio ambiente natural contiene “El ambiente natural está compuesto por elementos no vivos como la atmósfera, el clima, la topografía, el suelo y los recursos hídricos, además de organismos vivos como la flora, la fauna y los microorganismos” (p.5). Es decir, incluye sistemas abióticos y bióticos que interactúan entre sí para conformar diferentes ecosistemas con características propias. La conservación del medio ambiente resulta fundamental para preservar estos equilibrios naturales, mantener la diversidad biológica del planeta y garantizar la calidad de vida de las futuras generaciones.

La educación ambiental, según la UNESCO (2022), puede definirse como un proceso que dota a las personas de conciencia, aptitudes, valores y determinación que les capacita para actuar de forma individual y colectiva en la

resolución de los problemas ambientales actuales y futuro (P.5). Es una poderosa herramienta que permite investigar problemáticas relacionadas con el medio ambiente, involucrarse en su solución y actuar para mejorar el entorno. La educación ambiental resulta fundamental para crear conciencia sobre la importancia de conservar y proteger el medio ambiente, promoviendo el conocimiento, los valores y habilidades necesarias para que las personas tomen decisiones responsables, adopten modos de vida sostenibles, preserven la biodiversidad y garanticen un futuro saludable para las próximas generaciones.

El impacto ambiental causado por desechos biodegradables es un problema ambiental y sanitario que afecta a todo el mundo. Los residuos orgánicos son aquellos originados a partir de la degradación de componentes naturales, tales como restos de alimentos, frutas, verduras, carnes, pescados, huevos, entre otros. Si no se manejan adecuadamente, los residuos orgánicos pueden generar contaminación del suelo, el agua y el aire, además de ser un foco de proliferación de vectores de enfermedades.

En cuanto, la contaminación del suelo los residuos orgánicos depositados en vertederos o en el medio ambiente, pueden contaminar el suelo. La descomposición de estos residuos produce sustancias tóxicas que pueden filtrarse al suelo y contaminar las aguas subterráneas. Además, pueden atraer moscas, ratas y otros animales que pueden transmitir enfermedades.

Respecto a la contaminación en el agua, los residuos orgánicos depositados en vertidos en ríos, lagos o mares generan contaminación en estas aguas. La descomposición de estos residuos produce sustancias tóxicas que afectan la vida acuática y a los seres humanos que consumen estas aguas. Además, los residuos orgánicos pueden obstruir los sistemas de alcantarillado, lo que puede provocar inundaciones y la propagación de enfermedades.

La putrefacción de los desechos en los basureros genera emanaciones gaseosas orgánicas en los vertederos produce gases contaminantes, como el

metano y El CH₄ es un compuesto que retiene el calor atmosférico, agravando el calentamiento global. Además, los residuos orgánicos pueden generar olores desagradables que afectan el bienestar de los residentes cercanos a los depósitos de basura se ve perjudicado.

Con lo que se establece, que la proliferación de vectores de moscas y ratas en los residuos orgánicos atrae enfermedades como la salmonelosis, la disentería, la tuberculosis, la peste, la leptospirosis y la rabia.

Finalmente, usando biodigestores, se puede aprovechar eficientemente la materia orgánica para producir biogás, un recurso energético renovable y sostenible, ya que involucra a los biodigestores al actuar como biorreactor para convertir la materia orgánica en biogás, una mezcla de gases compuesto por metano y dióxido de carbono, que puede utilizarse para generar energía eléctrica, calor o combustible. El proceso de biodigestión se realiza en ausencia de oxígeno, donde las bacterias anaerobias descomponen la materia orgánica. En resumen, los biodigestores son versátiles y pueden se empleados para tratar unos diversos tipos de residuos orgánicos, como estiércol animal, residuos de alimentos, lodos de depuradora y residuos agrícolas.

Marco Legal

En este apartado se describen las normas necesarias para instalar biodigestores en las plazas de mercado en Colombia, y para aprovechar los residuos orgánicos generados en estos espacios.

Tabla 1. Marco Legal

Número Norma	De	De Qué Trata La Norma	Cómo Se Relaciona Con El Proyecto
Ley 99 de 1993		Establecimiento de una entidad gubernamental dedicada a temas ambientales y estructuración de un sistema nacional para la gestión del medio ambiente	Establece los principios generales ambientales aplicables
Ley 142 de 1994		Régimen de servicios públicos domiciliarios	Aplica al servicio de aseo prestado por la plaza de mercado
Decreto de 2013	2981	Suministro de servicios de limpieza y recolección de desechos a nivel municipal.	Responsabilidades sobre manejo de residuos sólidos
Resolución de 2014	754	Metodología para el desarrollo de estrategias integrales para el manejo de desechos sólidos.	Lineamientos para proyectos de Aprovechamiento de residuos orgánicos
Ley 1753 de 2015		Programa de gobierno para el desarrollo nacional durante el periodo 2014-2018	Promueve gestión de materiales biodegradables desechados provenientes de fuentes naturales
CONPES de 2016	3874	Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos	Define lineamientos de política normativa enfocada en la utilización y procesamiento de materiales biodegradables
Decreto 596 de 2016		Incentivos ambientales en los servicios públicos de aseo	Aplica incentivo por aprovechamiento de residuos orgánicos

Resolución 2184 de 2019	Reglamentación técnica sobre aprovechamiento de residuos orgánicos	Establece requisitos técnicos para proyectos de biodigestión
Ley 1955 de 2019	Estrategia gubernamental para el progreso del país entre 2018 y 2022.	Promueve economía circular en manejo de residuos
Resolución 316 de 2018 de la Entidad reguladora encargada de supervisar los servicios de agua y saneamiento	Regulación de calidad de actividades relacionadas con la limpieza y gestión de residuos en áreas urbanas	Aplica regulación tarifaria sobre servicio de aseo prestado en la plaza de mercado
Acuerdo Municipal 02 de 2017 de Villa de Leyva	Adopta el PGIRS del municipio 2017- 2027	Contempla programas y proyectos para el aprovechamiento de los desechos biodegradables producidos en el centro de abastecimiento municipal
Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Define los criterios y niveles máximos aceptables para descargas específicas en aguas superficiales y redes de alcantarillado urbano.	Aplica para el vertimiento del efluente del biodigestor
NTC 3656 de 1994	Biodigestores. Criterios generales de diseño y construcción	Establece requisitos técnicos para el diseño y construcción del biodigestor
NTC ISO 5667-13 de 1998	Guía para el muestreo de lodos	Aplica para el monitoreo y caracterización del sustrato y los lodos del biodigestor
RAS 2000	Conjunto de normas para el sector de suministro de agua potable e infraestructura sanitaria básica.	Establece pautas técnicas para los componentes del sistema de tratamiento de lodos y efluentes

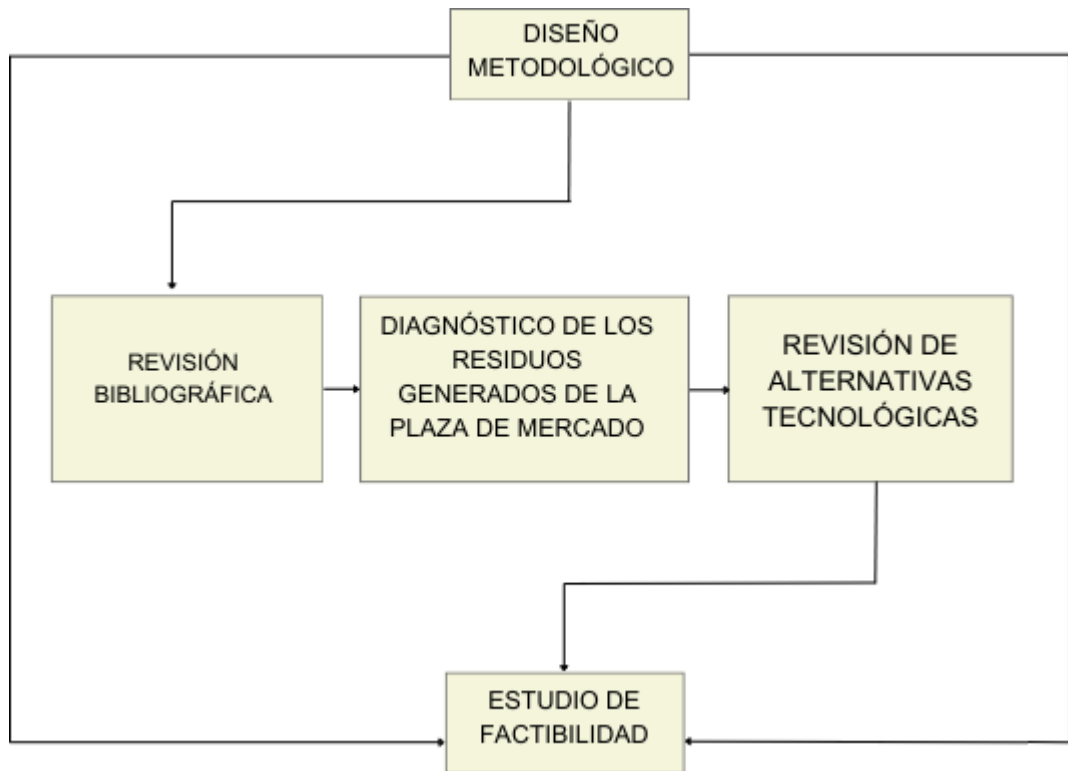
Decreto de 2015	1076	Compila normas del sector ambiente	Incluye consideraciones ambientales relacionadas
Decreto de 2015	1077	Compila normas sobre servicios públicos de saneamiento básico y aseo	Incluye regulaciones aplicables de estos sectores
NTC 6190 - Transporte de biogás		Determina las especificaciones mínimas para la implementación y operación de sistemas de transporte de gas biológico.	Aplica en caso de aprovechar el biogás generado en el biodigestor para su distribución a posibles usuarios
Decreto 1287 de 2014		Establece requisitos técnicos para acopio y valorización de residuos orgánicos y dicta disposiciones en el contexto de la provisión de servicios municipales de limpieza y recolección.	Define las características que debe tener el centro de acopio de los materiales biodegradables del centro de abastecimiento que se emplearán como materia prima para el reactor biológico.
Ley 1931 de 2018		Establece lineamientos para abordar las alteraciones climáticas.	Promueve la implementación de proyectos de aprovechamiento de residuos orgánicos y producción de energías renovables que mitiguen el cambio climático, como el biodigestor

Fuente: Autores, 2024

Metodología

A continuación, se presenta el desarrollo metodológico que se utilizó en la realización de este proyecto. La figura 3 ilustra el paso a paso para obtener la información necesaria y cumplir con los objetivos planteados. En esta figura, se describe el proceso seguido a lo largo de la investigación, detallando cada una de las etapas que contribuyeron al desarrollo del proyecto, todas ellas enmarcadas en una rigurosa toma de datos y análisis.

Figura 3. Sistema de biodigestión



Fuente: Autores, 2024

Las etapas ejecutadas se alistan a continuación:

Etapas 1. Revisión bibliográfica

En esta fase inicial, se realizó una investigación bibliográfica sobre biodigestores, enfocada en aquellos que se catalogan como adecuados para manejar residuos orgánicos en plazas de mercado. Se consultarán fuentes académicas, artículos científicos, informes técnicos y casos de estudio relevantes. Esta investigación abarcó aspectos como tipos de biodigestores, principios de funcionamiento, eficiencia, costos de implementación y mantenimiento, y requisitos operativos,

se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Cuadro comparativo de biodigestores: Se elaboró un cuadro comparativo detallado de cinco tipos de biodigestores considerados adecuados para una plaza de mercado. El cuadro comparativo incluyó criterios como capacidad de procesamiento, eficiencia en la producción de biogás, requisitos de espacio, costos de instalación y mantenimiento, vida útil esperada y complejidad de operación. Esta comparación se realizó de manera sistemática, asignando valores cuantitativos o cualitativos a cada criterio para facilitar una evaluación objetiva.

2. Análisis de ventajas y desventajas: Para cada uno de los cinco tipos de biodigestores seleccionados, se analizaron sus ventajas y desventajas, considerando aspectos técnicos, económicos, operativos y ambientales. Se presentó en forma de tabla para cada biodigestor, permitiendo una comparación clara y directa entre las diferentes opciones.

Etapas 2. Diagnóstico de los residuos orgánicos generados en la plaza de mercado

Esta etapa se realizó para determinar la cantidad y composición de los residuos, teniendo en cuenta las siguientes actividades:

1. Visitas de observación directa: Se programaron una serie de visitas a la plaza de mercado de Villa de Leyva en diferentes días de la semana y horarios, para obtener una visión completa de la dinámica de generación de residuos. Durante estas visitas, se realizó una observación sistemática y detallada de los procesos de generación, manejo y disposición de residuos orgánicos.

2. Registro fotográfico: Se llevó a cabo un exhaustivo registro fotográfico que documentó el proceso completo de generación de materia orgánica en la plaza de mercado. Este registro abarcó desde el inicio de la jornada comercial hasta su finalización, capturando imágenes en intervalos regulares y en puntos estratégicos de la plaza.

3. Diferencia de pesos y cuarteo: Para determinar la cantidad y composición de los residuos sólidos generados en la plaza de mercado, se implementó el método de diferencia de pesos y cuarteo durante un período representativo de una semana, para capturar las variaciones diarias en la generación de residuos. Se pesarán todos los residuos recolectados al final de cada jornada, registrando el peso total. Luego, se realizó el proceso de cuarteo, que implicó mezclar los residuos, dividirlos en cuatro partes iguales, y seleccionar una muestra representativa para su análisis detallado. Esta muestra se clasificó por tipos de residuos orgánicos (frutas, verduras, etc.), pesando cada categoría por separado. Este método proporcionó datos cuantitativos sobre la composición y cantidad de residuos generados.

4. Análisis de relación carbono-nitrógeno y humedad: Para cada tipo de residuo orgánico identificado (principalmente frutas y verduras), se realizaron análisis para determinar su relación carbono-nitrógeno (C/N) y contenido de humedad.

Estos análisis se realizarán para cada tipo principal de residuo orgánico, proporcionando datos cruciales para el diseño y optimización del proceso de biodigestión. Los resultados se tabularon, mostrando la relación C/N y el porcentaje de humedad para cada tipo de residuo, lo que permitió calcular la mezcla óptima de residuos para alimentar el biodigestor y predecir su rendimiento en la producción de biogás.

Etapa 3. Revisión de alternativas tecnológicas para la selección del biodigestor

Esta etapa se realizó para seleccionar el tipo de biodigestor más adecuado para las condiciones de la plaza de mercado, así como para determinar su capacidad y dimensiones. se consideraron los siguientes factores:

1. Selección del biodigestor: Se elaboró una tabla de evaluación comparativa de cinco tipos de biodigestores considerados apropiados para el manejo de residuos orgánicos en plazas de mercado, Cada criterio fue ponderado según su importancia relativa para el proyecto. Se asignaron puntuaciones a cada biodigestor en cada criterio, utilizando una escala predefinida (de 1 a 5). La suma ponderada de estas puntuaciones proporcionó una calificación total para cada biodigestor, facilitando una comparación objetiva y la toma de decisiones basada en evidencia. El biodigestor con mayor puntuación se eligió como la opción más adecuada para el proyecto.

2. Análisis DOFA del biodigestor seleccionado: Una vez seleccionado el biodigestor más apropiado, se realizó un análisis DOFA (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas) detallado. Este análisis examinó factores internos (fortalezas y debilidades) y externos (oportunidades y amenazas) relacionados con la implementación y operación del biodigestor en el contexto específico de la plaza de mercado de Villa de Leyva

3. Cálculos de dimensionamiento del biodigestor: Se revisaron trabajos académicos, tesis y proyectos similares que hayan implementado el mismo tipo de biodigestor. Se extrajeron y adaptaron los métodos de cálculo relevantes y apropiados para las condiciones específicas de Villa de Leyva. Los cálculos incluyeron la determinación del volumen total del biodigestor, considerando el volumen diario de residuos, el tiempo de retención hidráulica y un factor de seguridad. Se calcularon las dimensiones de la cámara de digestión, incluyendo diámetro y altura, y otros parámetros. Todos estos cálculos se basaron en los datos recopilados sobre la cantidad y composición de los residuos orgánicos de la plaza de mercado, así como en las características ambientales locales.

4. Diseño sugerido del biodigestor: Basándose en los cálculos realizados y en las mejores prácticas identificadas en la literatura, se elaboró una propuesta de diseño detallada del biodigestor seleccionado para la plaza de mercado de Villa de Leyva por medio del software AutoCAD, este diseño incluyó planos técnicos que mostraron la estructura general del biodigestor.

Etapa 4. Factibilidad técnica y económica

Para determinar la factibilidad técnica y económica del presente proyecto se deben realizar análisis detallados de los aspectos técnicos y financieros del proyecto, el cual se deben considerar los siguientes aspectos:

1.Elaboración del presupuesto detallado: Se desarrollo un presupuesto exhaustivo y detallado para la implementación del biodigestor seleccionado.

Este presupuesto se dividió en varias categorías principales: inversión inicial, costos de mano de obra, costos de materia prima y costos indirectos. La inversión inicial incluyó todos los gastos relacionados con la adquisición de equipos, materiales de construcción, y costos de instalación. Los costos de mano de obra abarcaron la fase de construcción y los salarios del personal operativo cuando el biodigestor estuviera funcionando.

Para la materia prima, se consideraron los costos asociados con la recolección y preparación de los residuos orgánicos, así como cualquier aditivo necesario para el proceso de biodigestión. Los costos indirectos incluyeron los gastos como permisos, seguros, mantenimiento regular y costos de capacitación del personal. Cada ítem del presupuesto se desglosó en detalle, proporcionando una visión clara y completa de todos los gastos asociados con el proyecto.

2.Cálculo de indicadores financieros: Para evaluar la viabilidad económica del proyecto, se realizaron cálculos detallados de varios indicadores financieros clave. En primer lugar, se determinó el Valor Actual (VA) de los flujos de caja futuros del proyecto, utilizando una tasa de descuento apropiada que reflejara el costo de capital y el riesgo asociado con el proyecto. A continuación, se calculó el Valor Presente Neto (VPN), que considero tanto la inversión inicial como los flujos de caja descontados a lo largo de la vida útil proyectada del biodigestor. Este cálculo proporcionó una medida clara de la rentabilidad potencial del proyecto. Además, se calculó la Tasa Interna de Retorno (TIR),

que indicó la tasa de rendimiento interno que el proyecto generaría. Estos cálculos se realizaron utilizando herramientas como Excel

3.Desarrollo de matriz combinada (cualitativa y cuantitativa): Se elaboró una matriz combinada que integró aspectos tanto cualitativos como cuantitativos del proyecto. Esta matriz sirvió como una herramienta integral para la evaluación y toma de decisiones. En la dimensión cualitativa, se incluyeron factores como el impacto ambiental. Cada uno de estos factores se evaluó utilizando una escala predefinida. Esta matriz también incluyó una ponderación de cada factor según su importancia relativa para el éxito del proyecto.

Análisis Y Discusión De Resultados

Etapas 1. Revisión bibliográfica:

En el proceso de selección del biodigestor óptimo, se consideraron diversos factores cruciales. Inicialmente, se realizó un análisis exhaustivo de las variedades de biodigestores disponibles, evaluando sus características distintivas mediante un estudio comparativo. La elección se basó en criterios específicos adaptados al contexto local, en este caso, el municipio de Villa de Leyva. Entre los aspectos fundamentales a evaluar se encuentran:

- **Cuadro comparativo:** Para identificar la opción más adecuada, fue fundamental elaborar una matriz que contrastara las características de diversos biodigestores, considerando las particularidades y necesidades específicas de Villa de Leyva.

- **Vida útil:** El modelo seleccionado debía ofrecer una durabilidad excepcional, idealmente cercana a veinte años. Además, fue crucial que el diseño permitiera adaptaciones y modificaciones para ajustarse a posibles variaciones en el volumen y naturaleza de los desechos biodegradables accesibles, garantizando de este modo, un rendimiento estable y eficiente de biogás a lo largo del tiempo.

- **Efecto de presión de gas en el sistema:** Fue esencial que el biodigestor incorporara mecanismos de regulación de presión robustos y precisos. Estos debían asegurar un funcionamiento seguro y eficiente, cumpliendo rigurosamente con las normativas vigentes y adaptándose a las fluctuaciones en la producción de gas del sistema.

- **Materiales de construcción:** La selección de materiales equilibró tres factores clave: calidad superior, durabilidad excepcional y costo razonable. Se buscaron

componentes con resistencia a las condiciones ambientales locales y el uso continuo, sin comprometer la viabilidad económica del proyecto.

- **Costos:** La propuesta económica del biodigestor se ajustó al presupuesto establecido por la entidad financiadora. Fue crucial realizar un análisis detallado de costos para incluir no solo la inversión inicial, sino también los gastos operativos y de mantenimiento a largo plazo.

- **Mantenimiento:** El diseño del sistema priorizó la facilidad y eficiencia en las tareas de mantenimiento. Esto implicó considerar la accesibilidad a todas las partes del biodigestor, la simplicidad de los procedimientos de limpieza y restauración, y el acceso a componentes de recambio. El objetivo fue minimizar los tiempos de inactividad y optimizar la operatividad del sistema.

Seguidamente, el cuadro número dos presenta el comparativo de los tipos de biodigestores analizados, que contiene las propiedades de diseño, vida útil, mantenimiento, entre otros aspectos clave. Este cuadro evaluó cinco tipos de biodigestores considerados adecuados para el contexto específico de Villa de Leyva, lo que facilitó la identificación de la opción más viable, asegurando que éste cumpliera con los requisitos técnicos y económicos y se ajustara a las necesidades del proyecto.

Tabla 2. Cuadro comparativo biodigestores

Biodigestor	Vida Útil	Efecto De Presión En El Sistema	De Gas	Materiales De Construcción	De Mantenimiento
Biodigestor de flujo pistón	5-10 años	Presión constante		Concreto, PVC o geomembrana	Relativamente sencillo, requiere limpieza periódica (energy, 2022)
Biodigestor Batch	5-10 años	Presión variable		Plástico, metal o concreto	Facilidad de realizar mantenimiento (energy, 2022)

Biodigestor hindú (domo móvil)	tipo	3-5 años	Presión constante	Metal, acero	Relativamente sencillo, vulnerable a daños físicos (energy, 2022)
Biodigestor chino (Domo fijo)	tipo	5-20 años	La presión es variable	Ladrillo, bloque, sementó	Complejo, requiere personal especializado (energy, 2022)
Biodigestor tubular (Plug. Flow)		3-5 años	Presión constante	Materiales poliméricos filamentos sintéticos, incluyendo conductos de policloruro de vinilo	Fácil mantenimiento (energy, 2022)

Fuente: Autores, 2024

En cuanto a la Tabla 3 se muestra las ventajas y desventajas de los cinco tipos de biodigestores evaluados. Esta tabla proporcionó una caracterización detallada de las propiedades de cada biodigestor, incluyendo aspectos técnicos, económicos, operativos y ambientales. El análisis comparativo proporcionó una comprensión clara de las fortalezas y debilidades de cada alternativa, facilitando así la toma de decisiones informada y objetiva.

Tabla 3. Ventajas y desventajas biodigestores

TIPO DE BIODIGESTOR	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Biodigestor de flujo pistón	Alta eficiencia en la producción de biogás, buen control del proceso se emplea para capacidades mayores a 15m ³ donde los modelos previos muestran complicaciones en su construcción.	Costos de instalación moderados, Requiere mantenimiento regular, Puede ser complejo de operar (desarrollosacd, 2022)

Biodigestor Batch	Facilita las tareas de conservación, ofrece una buena protección contra filtraciones, y su diseño es estanco, evitando la entrada de aire.	La producción de biogás se reduce si la alimentación no es constante, Control necesario de pH, Control de temperatura. (Minenergia, 2022)
Biodigestor tipo hindú (domo móvil)	Opera bajo presión estable, generando gas de manera uniforme, es de fácil construcción, Su eficiencia varía entre 45 – 60% ³³	El costo se incrementa debido al componente de almacenamiento; si es metálico, su durabilidad es limitada, requiriendo mayor mantenimiento. (energy, 2022)
Biodigestor tipo chino (Domo fijo)	Abre puestos de empleo, la generación de gas es cotidiana con alimentación continua, cuanta con un depósito de gas completamente sellado, el rendimiento de la unidad oscila entre 40% y 60%.	Complejidad en controlar la presión del gas y asegurar la estanqueidad de las uniones, la edificación requiere supervisión experta, bajas temperaturas de procesamiento y costos elevados debido a la forma y complejidad de la cúpula. (energy, 2022)
Biodigestor tubular (Plug. Flow.)	Bajo costo, Facilidad de transporte y construcción, Facilidad de mantenimiento de sus partes, soporta altas temperaturas y alcanza un alto rendimiento respecto a, los anteriores digestores Que fluctúa entre 50% y 62%.	Muestran baja resistencia a la radiación solar y es preciso cubrirlo bajo techo, para aumentar la presión de gas a la salida es necesario colocar sobrepesos sobre el gasómetro de acumulación (Duque, 2017)

Fuente, Autores, 2024

Etapa 2. Diagnóstico de los residuos orgánicos generados en la plaza de mercado

En esta etapa se realizó la caracterización de los residuos sólidos de la comunidad de la plaza de mercado. Este tipo de técnica consistió en tomar una muestra representativa de los residuos, mezclarla, dividirla en cuatro partes iguales y analizar la composición de una de esas partes. Esto permitió estimar la composición general de los residuos generados.

En la figura 4 se detalla el proceso de diagnóstico de residuos orgánicos generados en la plaza de mercado de Villa de Leyva, haciendo uso del primer registro fotográfico, el cual sirve como evidencia del desarrollo de la investigación:

Figura 4. Sitio de caracterización





Autores, 2024

Como se aprecia en la figura, se hizo un diagnóstico de los desechos sólidos producidos, comenzando por la separación de los desechos orgánicos en subclases. Las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4 ilustraron la clasificación y medición de los desperdicios producidos por una comunidad pequeña. A continuación, se determinó la masa de cada tipo de desecho, y la suma de todos ellos conformó el total de la muestra. La proporción de cada categoría de desechos (biodegradables, no biodegradables o inutilizables) se calculó mediante la fórmula que se presenta a continuación:

$$W_T = \sum_{i=1}^{\infty} W_i \quad \%i = \frac{W_i}{W_T} \times 100$$

Donde:

W_t = *Peso total de los R.S aforados*

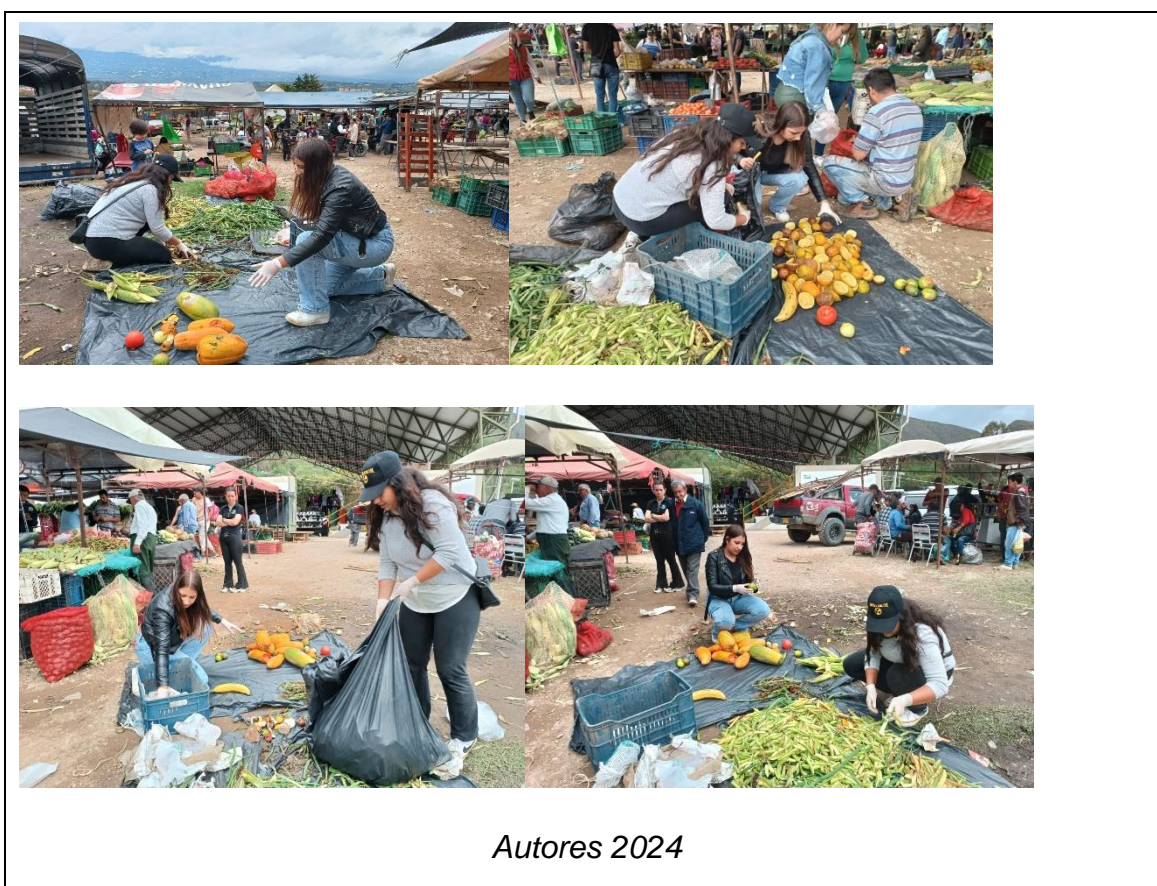
W_i = *Equivalente al peso de cada clase de R.S*

$\%i$ = *Porcentaje en peso de cada fracción de R.S en la muestra.*

Fuente: (YEISON OLAYA ARBOLEDA, 2009)

Dada la Figura 5 se presenta, el segundo registro fotográfico que sustenta la caracterización detallada de los residuos. Estas imágenes ilustran cómo se clasificaron los diferentes tipos de residuos, proporcionando una visión mucho más clara de la composición y las características específicas de cada fracción

Figura 5. proceso de caracterización



Cabe destacar que la plaza de mercado de Villa de Leyva trabaja solo los fines de semana, en este caso, únicamente los sábados. Por lo tanto, se realizó la caracterización de los residuos un fin de semana festivo y el otro fin de semana normal. Esta variación en los períodos de recolección generó resultados

importantes para obtener una muestra representativa de las tendencias en la producción de residuos en la comunidad (Sagarpa, 2010).

- CARACTERIZACION RESIDUOS

La caracterización de residuos en la plaza de mercado de Villa de Leyva, Boyacá, Colombia, reveló una diversidad de materiales orgánicos e inorgánicos típicos de un mercado local en una ciudad histórica y turística. Este proceso de caracterización fue fundamental para comprender la composición de los desechos y desarrollar estrategias efectivas de manejo de desechos. (Gomero2, 2020)

La Tabla 4 muestra la caracterización de los residuos orgánicos recogidos durante el período de recolección de muestras. La tabla proporciona un desglose de los tipos de residuos orgánicos identificados en las diferentes fechas, así como las cantidades totales de residuos generados gracias a los patrones y tendencias en la generación de los desechos.

Tabla 4. Caracterización residuos orgánicos

Día 1 ° CARACTERIZACION RESIDUOS ORGANICOS		
TOTAL		
RESIDUOS	kg	g
Papaya	18.14	18140
Cascara Naranja	8.16	8160
Limón	1.2	1200
Cebolla larga	11.84	11840
Cascara arveja	2.26	2260
Tomate	2.12	2120
Cascara Mazorca	0.90	900
Plátano	2.88	2880
Cebolla Cabezona	7.34	7340
Habichuela	0.34	340
Apio	0.32	320
Criolla	0.5	500
Papa	3.44	3440

Auyama	0.5	500
Repollo	0.86	860
Acelga	1	1000
Fresa	1.98	1980
Mango	1.4	1400
Hoja de frijol	4.53	4530
Total	69.71	69710

Día 2 ° CARACTERIZACION RESIDUOS ORGANICOS

TOTAL

RESIDUOS	kg	g
Papaya	15.01	15010
Cascara Naranja	6.10	6100
Limón	0.8	800
Cebolla larga	9.94	9940
Cascara arveja	1.20	1200
Tomate	1.10	1100
Cascara Mazorca	0.50	500
Plátano	2.88	2880
Cebolla Cabezona	6.25	6250
Habichuela	0.19	190
Apio	0.17	170
Criolla	0.3	300
Papa	2.37	2370
Auyama	0.2	200
Repollo	0.76	760
Acelga	0.7	700
Fresa	0.88	880
Mango	0.20	200
Hoja de frijol	3.43	3430
Total	52.98	52980

Total, de los residuos generados	KG	GR
	122.69	122.690

Fuente: Autores, 2024

Respecto a la Tabla 5, se presenta el análisis detallado de la relación carbono-nitrógeno (C/N) en la mezcla de residuos orgánicos junto con gallinaza, obtenida de la plaza de mercado de Villa de Leyva. Este análisis proporcionó una evaluación de cómo la incorporación de gallinaza de residuos y piso influye en la relación C/N de la mezcla de residuos.

Tabla 5. Relación Carbono-Nitrógeno mezcla de residuos y gallinaza

Relación C-N de la mezcla de los residuos	22.9
Relación de C-N de la gallinaza de piso	12.1

Fuente: Autores, 2024

La relación carbono-nitrógeno (C/N) de la mezcla de desechos orgánicos en la plaza de mercado de Villa de Leyva influye de manera importante en el funcionamiento óptimo del biodigestor. Esta relación influye directamente en el rendimiento del procedimiento de descomposición sin oxígeno y la producción de biogás. La relación C/N de la gallinaza de piso es mejor que la gallinaza de jaula, aunque esta última presenta mayor humedad, con un valor de 53.8 en comparación con el valor de 34.8 de la gallinaza de piso (ARGOTI, 2015).

La Tabla 6, muestra los valores de la humedad en diversos tipos de desechos orgánicos. Estos valores permiten evaluar la cantidad de humedad presente en cada tipo de desecho, proporcionando datos cruciales para el manejo y transformación de los desechos biodegradables. La tabla presenta una estandarización de mediciones precisas de humedad contenida en fracciones de residuos garantizando la precisión de los resultados.

Tabla 6. Humedad

Humedad	%
Papaya	88
Cascara Naranja	75
Limón	88
Cebolla larga	89
Cascara arveja	72

Tomate	94
Cascara Mazorca	60
Plátano	74
Cebolla Cabezona	89
Habichuela	15
Apio	95
Criolla	79
Papa	80
Auyama	90
Repollo	92
Acelga	95
Fresa	90
Mango	83
Hoja de frijol	30

Fuente: Autores, 2024

La humedad de los desperdicios orgánicos originados en la plaza de mercado de Villa de Leyva es un factor crucial para el funcionamiento eficiente de un biodigestor. Estos residuos, especialmente los de frutas, verduras y otros alimentos perecederos, presentaron un alto contenido de humedad, favorable para la digestión anaerobia (B.soudi, 2017).

Se observó que los residuos orgánicos que más se produjeron son los de papaya como se puede evidenciar en la tabla 6, este tipo de residuo, en la mayoría de las investigaciones, se implementó como uno de los residuos que genera mayor materia orgánica, por lo que este producto resultó ser importante para la generación de gas. De igual forma, se identificó que otro de los productos que más se desechó en la plaza es la cebolla larga. Este producto también mostró ser adecuado para la producción de metano (Guzman, 2014).

- **RELACION CARBONO-NITROGENO**

La relación carbono-nitrógeno (C/N) en los residuos orgánicos es un factor fundamental en el manejo de desperdicios y en operaciones como el compostaje. Esta relación se refería a la cantidad relativa de carbono respecto al nitrógeno presente en los materiales orgánicos. El carbono proporciona energía a los microorganismos descomponedores, mientras que el nitrógeno es esencial para su crecimiento y reproducción. Una relación C/N equilibrada es fundamental para una descomposición eficiente de los residuos orgánicos (Pareja1, 2005).

En la presente tabla nos indican los valores de relación- nitrógeno. Los valores más altos señalaron materiales más ricos en carbono, mientras que los valores más bajos indican materiales más ricos en nitrógeno.

Tabla 7. Relación carbono nitrógeno residuos orgánicos

Producto	Relación C/N
Papaya	25:1
Cascara de Naranja	40:1
Limón	30:1
Cebolla larga	15:1
Cascara de arveja	15:1
Tomate	12:1
Cascara de mazorca	60:1
Plátano	35:1
Cascara cebolla cabezona	15:1
Habichuela	12:1
Apio	11:1
Papa criolla	25:1
Papa normal	25:1
Auyama	25:1
Repollo	12:1
Acelga	11:1
fresa	22:1
Mango	30:1
Hoja de frijol	11:1

Fuente: (Pareja1, 2005)

Etapa 3. Revisión de alternativas tecnológicas para la selección del biodigestor

Selección Del Biodigestor

En el proceso de selección del biodigestor más adecuado para el proyecto, se realizó una evaluación comparativa de cinco alternativas de diseño: biodigestor de flujo pistón, Batch, tipo hindú (domo móvil), tipo chino (domo fijo) y tubular (Plug Flow). Esta evaluación se basó en seis características clave que influyeron en el rendimiento y la viabilidad del sistema. Se empleó un sistema de evaluación con puntuaciones de 1 a 5, donde 1 representó el nivel más bajo y 5 el más alto, para cada criterio. Este enfoque sistemático permitió una comparación objetiva de las opciones, facilitando la toma de decisiones informada sobre el tipo de biodigestor más apropiado para las necesidades específicas del proyecto.

La siguiente tabla resume los resultados de esta evaluación:

Tabla 8. Evaluación comparativa

CARACTERISTICAS	ALTERNATIVAS				
	1	2	3	4	5
	Biodigestor de flujo pistón	Biodigestor Batch	Biodigestor tipo hindú (domo móvil)	Biodigestor tipo chino (Domo fijo)	Biodigestor tubular (Plug. Flow.)
Facilidad de construcción	4	4	3	3	5
Facilidad de mantenimiento	2	4	3	2	4
Fiabilidad de funcionamiento	3	4	4	3	4
Costos de construcción	3	4	3	3	4

Eficiencia	3	2	3	4	4
Vida útil	4	3	3	4	3
Total	19	21	19	19	24

Fuente: Autores, 2024

DOFA Biodigestor Biodigestor Tubular (Plug- Flow)

El análisis DOFA (Debilidades, Oportunidades, Fortalezas y Amenazas) del biodigestor tubular (Plug Flow) proporcionó una visión integral de sus atributos y su lugar en el panorama comercial actual. Esta herramienta estratégica permitió evaluar los elementos internos (puntos fuertes y débiles) y externos (posibilidades y riesgos) que afectan la ejecución y desarrollo de este tipo de biodigestor. Al examinar estos aspectos, se obtuvo una comprensión más profunda de las ventajas competitivas del biodigestor tubular, así como de los desafíos que enfrentó y las posibles áreas de mejora.

A continuación, se presenta la matriz DOFA del biodigestor tubular (Plug Flow):

Tabla 9. Matriz DOFA

MATRIZ DOFA	
DEBILIDADES	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Vulnerable a daños por objetos punzantes • Requiere protección contra rayos UV • Necesita sobrepeso para aumentar la presión del gas • Posible cristalización parcial del plástico 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial para perfeccionar la técnica y prolongar la durabilidad • Posibilidad de desarrollar materiales más resistentes • Adaptable a diferentes escalas de producción • Posibilidad de expandir el modelo a otras plazas de mercado o municipios. • Acceso a incentivos gubernamentales para proyectos de energía limpia.
FORTALEZAS	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none"> • Económico y de fácil transportar • Simple de construir y mantener 	<ul style="list-style-type: none"> • Competencia de biodigestores más duraderos

-
- No requiere personal especializado
 - Alto rendimiento (50-62%)
 - Resistente a la corrosión por biogás
 - Diseño hermético que previene fugas
 - Fácil de limpiar y vaciar
 - Cambios en regulaciones ambientales
 - Fluctuaciones en el costo de materiales plásticos
 - Percepción negativa del uso de plásticos
-

Fuente: Autores, 2024

Cálculos del dimensionamiento del biodigestor tubular tipo Plug Flow

En este estudio, se determinaron los volúmenes fundamentales del biodigestor, sus fases de estado líquida, gaseosa y el volumen real total. Un parámetro crítico en este cálculo fue el lapso de permanencia, entendido como el intervalo necesario para que los compuestos orgánicos se degraden eficientemente y genere biogás bajo las condiciones ambientales específicas del emplazamiento.

La investigación de Chungandro y Manitio (2010), sugiere que el tiempo de retención óptimo oscila entre 20 y 40 días. Considerando este rango recomendado y las características particulares del proyecto, se estableció un tiempo de retención de 30 días para este estudio. Esta elección buscó equilibrar la eficiencia de la degradación orgánica con la producción de biogás, adaptándose a las condiciones locales y maximizando el rendimiento del sistema.

Adicionalmente, se tuvieron en cuenta valores como el total de los residuos orgánicos generados por la plaza de mercado de villa de Leyva y el total de gallinaza necesaria, que corresponde a 150 bultos, cada uno con un peso de 40 kg, para un total de 6000 kg de gallinaza, lo que en promedio diaria sería un valor de 28.57Kg/semanal

La tabla 9 que se presenta a continuación, sintetiza los resultados obtenidos para los diversos volúmenes del biodigestor, acompañados de sus respectivas fórmulas de cálculo.

Tabla 9. Volúmenes biodigestor

VOLUMEN	FORMULA	VALOR TOTAL
Volumen líquido	$VL = E * TR * FD$	$2.05m^3$
Volumen fase gaseosa	$VG = 1/3 * VL$	$0.78m^3$
Volumen real del biodigestor	$VDR = VL + VG$	$2.83m^3$

Fuente: Autores, 2024

Para el biodigestor tubular tipo “Plug Flow”, se adoptó una distribución de volumen que destinó el 75% del espacio total a la porción líquida y el 25% restante a la gaseosa ya que la parte líquida correspondió a la cantidad de material a procesar, mientras que el componente gaseoso se reservó para el biogás producido durante la digestión anaeróbica.

La tabla 9 presenta la fórmula para el cálculo del volumen de la fase gaseosa. En esta fórmula se empleó un factor de 1/3, derivado de la relación proporcional entre el volumen gaseoso (25%) y el volumen líquido (75%), reflejando así la distribución volumétrica establecida.

Para garantizar la estabilidad estructural, se recomienda que la fosa sea de 8 metros de largo, 80 centímetros de profundidad y 1 metro de ancho. La ubicación estratégica de la fue fundamental, debiendo estar cerca de los puntos de consumo y bajo el nivel del suelo. Esta disposición subterránea cumplió una doble función: minimizar las fluctuaciones térmicas y optimiza la conservación del calor (Duque, 2017).

Para la construcción del biodigestor, se propone la utilización de polietileno tubular de calibre 8 con protección contra rayos ultravioleta como material para la membrana. Este material presenta un perímetro de 2.5 metros, lo que se

traduce en un diámetro de 0.79 metros. Basándose en los cálculos de volumen y considerando las dimensiones del material, se determinó una longitud operativa del biodigestor de 6.4 metros.

Al adquirir el polietileno para la fabricación, se consideró una longitud adicional para conectar con las tuberías de ingreso y egreso del material a procesar, añadiendo un metro extra en cada extremo, con una longitud total de membrana de 8.4 metros. Esta extensión aseguró una instalación apropiada y un funcionamiento óptimo del sistema.

En cuanto a las dimensiones de la bolsa plástica, se sugiere tener una semicircunferencia de 2,5 metros, igual a la anchura del material plástico utilizado. Esta configuración implicó un radio de 0,75 metros y, para completar las proporciones óptimas del sistema, se recomendó extender la longitud total hasta 10 metros, para maximizar la eficiencia del proceso de digestión y la producción de biogás, adaptándose a las necesidades típicas de instalaciones a pequeña y mediana escala. (Duque, 2017)

Los tanques de carga y descarga, elementos cruciales para el manejo de la materia orgánica, se dimensionaron siguiendo criterios técnicos rigurosos. La capacidad de estos tanques se estableció con un criterio mínimo del triple del volumen de carga diaria. En el contexto específico de esta investigación, dicha capacidad se determinó en 1 m³, garantizando así un margen adecuado para la gestión eficiente del flujo de material.

En cuanto a la disposición espacial, se adoptó un enfoque que optimizó tanto el flujo gravitacional como la accesibilidad operativa. Para el tanque de carga, se recomendó una ubicación elevada respecto al digestor, con una diferencia de altura que no excediera los 50 cm. Esta configuración facilitó la alimentación del sustrato por gravedad, eliminando la necesidad de sistemas de bombeo adicionales. (Duque, 2017)

Por otro lado, el tanque de descarga se proyectó para estar al mismo nivel que el biodigestor. Esta disposición a nivel del suelo se fundamentó en consideraciones prácticas, facilitando las labores de mantenimiento y la

recolección eficiente del digestato resultante del proceso anaeróbico. Esta configuración estratégica de los componentes de almacenamiento no solo optimizó el flujo de materiales, sino que también contribuyó significativamente a la eficiencia operativa y la sostenibilidad del sistema en su conjunto.

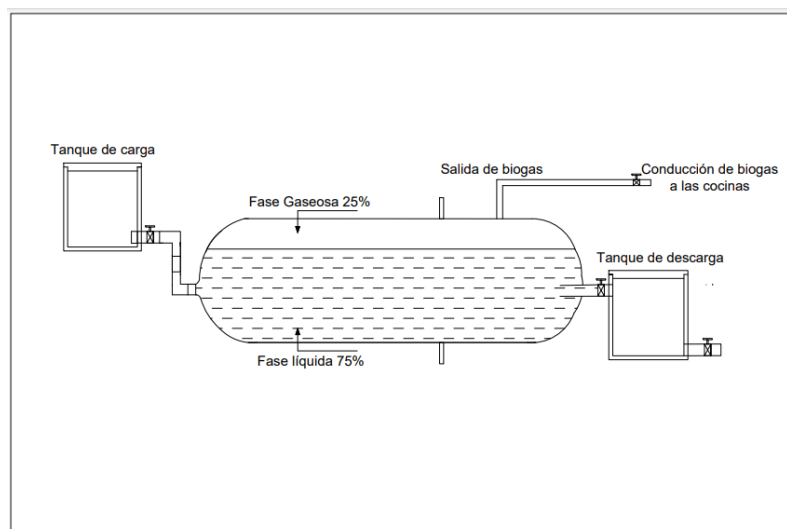
Finalmente, con los cálculos obtenidos y con los valores sugeridos de los estudios anteriores, se calcula que el biodigestor tubular tipo “Plug Flow” genera 112 m³/año de biogás. Gracias a esto, se podrán reemplazar en la plaza de mercado de villa de Leyva las pipetas de gas para los trabajadores de la zona de cocina, lo cual evidencia una reducción económica y una factibilidad ambiental positiva.

Diseño biodigestor tubular tipo Plug Flow

A continuación, se presenta el diseño del biodigestor tubular tipo “Plug Flow”, realizado mediante herramientas de modelamiento, en este caso AutoCAD. Este diseño detallado proporciona una visión clara de las dimensiones, la distribución de los componentes y la disposición general de las fases del sistema, permitiendo una implementación efectiva y eficiente del biodigestor en el lugar de instalación.

Como resultado de lo anterior, se presenta la figura 6, que muestra las partes que conforman el biodigestor y que son esenciales para su funcionamiento.

Figura 6. Diseño biodigestor – software AutoCAD



Fuente: Autores, 2024

Análisis

El diseño presentado en la figura 6 se ilustra un biodigestor tubular tipo “Plug-Flow”, un sistema eficiente para la producción de biogás. Este modelo se caracteriza por su forma cilíndrica horizontal, que permite un flujo continuo de la materia orgánica a través del digestor, el sistema está compuesto por varios elementos clave: dos tanques de carga ubicados en los extremos, el cuerpo principal del biodigestor, y las salidas para el biogás y su conducción.

La estructura interna del biodigestor se divide en dos fases principales: la fase líquida, que ocupa aproximadamente el 75 % del volumen total, y la fase gaseosa, que representa el 25 % restante en la parte superior. Esta disposición facilita la separación natural del biogás producido. El diseño incluye una entrada para la carga orgánica, una salida para el efluente tratado, y un sistema de recolección y conducción del biogás hacia cocinas de la plaza de mercado de Villa de Leyva, lo que permite una digestión anaeróbica eficiente y una fácil recolección del biogás generado, haciendo de este modelo una opción práctica para producir energía renovable a pequeña y mediana escala.

Etapa 4. Factibilidad técnica y económica

Presupuesto:

A continuación, se presenta el presupuesto para la implementación de un biodigestor tubular tipo “Plug-Flow”, diseñado específicamente para las necesidades de la región. Este presupuesto se elaboró según la información actualizada y precios de la página oficial de la Gobernación de Boyacá, garantizando su relevancia y precisión para el contexto local.

El presupuesto se dividió en cuatro categorías principales: inversión inicial del biodigestor, costos de materia prima, costos de mano de obra y costos indirectos, cada categoría es crucial en la realización exitosa del proyecto.

En relación con lo anterior, la tabla 10 presenta el presupuesto detallado para la construcción del biodigestor tubular tipo “Plug- Flow” incluyendo una visión completa del capital requerido para la implementación del proyecto en la región.

Tabla 10. Presupuesto biodigestor tubular tipo “Plug Flow”

Inversión Inicial - Biodigestor				
Ítem	Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total
Estructura				
1	Tubo galvanizado 2"	1	\$ 25,300	\$ 25,300
2	Tubo galvanizado 1/2"	1	\$ 15,000	\$ 15,000
3	Malla 5m	8	\$ 65,000	\$ 520,000
4	Bisagras 5/8	2	\$ 2,500	\$ 5,000
Biodigestor				
5	Plástico negro polietileno calibre 8" 8m	8	\$ 13,500	\$ 108,000
6	Tubo PVC de 6" 2m	2	\$ 34,000	\$ 68,000
7	Llave de paso de 1/2"	3	\$ 36,000	\$ 108,000
8	Codo PVC 4"	3	\$ 13,000	\$ 39,000
9	Adaptador macho de 4"	4	\$ 700	\$ 2.800

10	Tanques de polietileno	2	\$ 117,000	\$ 234,000
----	------------------------	---	------------	------------

Sistema De Biogás

11	Tube PVC 1/2"	1	\$ 2,500	\$ 2,500
12	Válvula de seguridad 1/2"	8	\$ 10,000	\$ 80,000
13	Adaptador macho de 1/2"	1	\$ 400	\$ 400
14	Codo de 1/2" x 45	8	\$ 1,000	\$ 8,000
15	Neplo de 1/2"	8	\$ 2,000	\$ 16,000
16	Buggsing rosca 1/4"	4	\$ 1,000	\$ 4,000
17	Filtros de tratamiento	1	\$ 50,000	\$ 50,000
18	Manguera de gas	4	\$ 12,000	\$ 48,000
19	Suelda de bronce	4	\$ 7,000	\$ 28,000
20	Manómetro	1	\$ 110,000	\$ 110,000

Total, Costos Materia Prima \$ 1,469,203

Costos Mano De Obra

Ítem	Descripción	Cantidad De Días	Valor Unitario	Valor Total
1	Limpieza De Terreno	5	\$ 50,000	\$ 250,000
2	Excavación Fosa	1	\$ 50,000	\$ 50,000
3	Moldeo De Terreno	2	\$ 50,000	\$ 100,000
4	Transporte De Materiales	3	\$ 120,000	\$ 360,000
5	Instalación Biodigestor	5	\$ 80,000	\$ 400,000
6	Soldadura	2	\$ 50,000	\$ 100,000
7	Instalación De Área	5	\$ 50,000	\$ 250,000

Total, Costos Mano De Obra \$ 1,510,000

Materia Prima

1	Aserrín 1kl	8	\$14500	\$ 116,000
2	Gallinaza (Bultos-semanal)	2	\$20,000	\$ 40,000
3	Residuos Orgánicos	Mensual	0	0

Total, Materia Prima \$156,000

Costos Indirectos

Ítem	Descripción	Cantidad-días	Valor Unitario	Valor Total
1	Alquiler de soldadura	2	\$ 25,000	\$50,000

2	Pegamento PVC	2	\$ 14,000	\$28,000
3	Teflón	4	\$ 7,000	\$28,000
4	Viáticos (1 personas)	3	\$ 43,000	\$129,000
Total, Costos Indirectos				\$ 235,000

Costos De Producción		
Ítem	Descripción	Valor Total
1	Costos Inversión Inicial - Biodigestor	\$ 1,469,203
2	Costos Por Mano De Obra	\$ 1,510,000
3	Costos Indirectos	\$ 235,000
4	Costos Materia Prima	\$ 156,000
Total, Costos Producción		\$ 3,370,203

Fuente: Autores, 2024

Basados en la tabla de costos de producción presentada, se puede concluir que el presupuesto total para la implementación del biodigestor tipo “Plug Flow” en la plaza de mercado de Villa de Leyva asciende a \$3,370,203. La inversión propuesta representa una solución integral para el aprovechamiento de los residuos orgánicos generados en la plaza de mercado. Este biodigestor no solo abordará el desafío del manejo de residuos, sino que también genero beneficios en términos de producción de biogás. Considerando el potencial impacto positivo en la sostenibilidad ambiental de Villa de Leyva, este presupuesto se presenta como una inversión estratégica para la comunidad.

Valor Presente Neto (VPN) - Tasa Interna de Retorno (TIR)

En la tabla 11, se analizó el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). El VPN midió el valor actual de los flujos esperados del proyecto, descontando la tasa de interés específica, que permite determinar si la inversión

genera más ingresos que la inversión realizada, en valores llevados al año 0. El periodo de análisis fue de 5 años

Tabla 11. VPN-TIR

Datos					
Valor invertido	\$ 3,370,202				
Biogás generado anual	120	m ³ /año			
Valor metro cubico gas	2,947	pesos			
Variación IPC anual	7,18%	0.0718			
Ingresos	\$ 353,640				

Año	1	2	3	4	5
Inversión	-\$ 3,370,203	-\$ 3,612,183	-\$ 3,871,538	-\$ 4,149,515	-\$ 4,447,450
Materia Prima	\$ 156,000	\$ 167,201	\$ 179,206	\$ 192,073	\$ 205,864
Mano De Obra	\$ 4,000,000	\$ 4,287,200	\$ 4,595,021	\$ 4,924,943	\$ 5,278,554
Ingresos	\$ 353,640	\$ 379,031	\$ 406,246	\$ 435,414	\$ 466,677
Flujo Neto	\$ 1,139,437	\$ 1,221,249	\$ 1,308,934	\$ 1,402,916	\$ 1,503,645

Valor Actual	\$ 5,315,531
Valor Actual Neto	\$ 1,945,328
Tasa Interna De Retorno	26%

Fuente: Autores, 2024

El estudio del biodigestor tubular tipo Plug Flow muestra indicadores positivos de viabilidad económica. Con una inversión inicial de \$ 3,370,202, el proyecto generaría una producción anual de 120 m³ de biogás y presentaría flujos netos positivos desde el primer año, aumentando gradualmente durante un periodo de 5 años. Además, el Valor Actual Neto (VAN) de \$ 1,945,328 y la Tasa Interna de Retorno (TIR) del 26% sugiere que el proyecto no solo permite la recuperación de la inversión inicial, sino que también la generación de beneficios adicionales.

La proyección financiera a 5 años indico un crecimiento constante en ingresos, que compensan el aumento en los costos de insumos y mano de obra. Aunque la inversión inicial es considerable, los flujos netos positivos y crecientes indicaron una recuperación gradual y sostenida de la inversión. Con un valor actual de \$5,315,531, el proyecto parece ofrecer un retorno atractivo, considerando la variación anual del IPC del 7,18 %. En general, estos indicadores sustentaron que el proyecto es económicamente viable y potencialmente rentable a largo plazo.

MATRIZ EPM Y CONESA

La Matriz EPM (Evaluación de Presiones e Impactos Ambientales) constituye un instrumento esencial para valorar los impactos ambientales potenciales de un proyecto, en este contexto, la ejecución de un sistema de biodigestión para el tratamiento de residuos orgánicos en la Plaza de Mercado de Villa de Leyva.

Con lo anterior se tiene en cuenta en la matriz los siguientes factores:

Figura 7. Matriz Combinada Epm-Arboleda Y Conesa

Aspecto Ambiental	Impacto Ambiental	Clase	Presencia	Magnitud	Duracion	Reversibilidad	IMPORTANCIA	CLASIFICACIÓN
Generación de residuos sólidos	Contaminación y alteración de la cobertura vegetal	(-)	1	0.6	1	2	6.6	SIGNIFICATIVO
Emisión de gases de efecto invernadero	Contaminación del aire	(-)	1	0.6	1	4	8.6	MUY SIGNIFICATIVO
Aprovechamiento de residuos orgánicos	Reducción de la cantidad de residuos enviados a vertederos	(+)	0.4	0.4	0.7	0.4	2.7	POCO SIGNIFICATIVO

Autores 2024

Este proyecto ofrece múltiples beneficios significativos para la comunidad. Ya que permite una gestión más eficiente de los residuos, reduciendo la cantidad enviada a vertederos y los costos asociados a su manejo. Además, genera energía renovable en forma de biogás, que puede utilizarse para abastecer

instalaciones locales disminuyendo la dependencia de fuentes energéticas convencionales. Desde una perspectiva ambiental, reduce la liberación de gases que contribuyen al efecto invernadero y mejoro la calidad del aire en la zona. Económicamente, crea nuevas oportunidades de empleo y potencialmente generó ingresos adicionales para el municipio.

Asimismo, fortalece la imagen de Villa de Leyva como destino turístico comprometido con la sostenibilidad, atrayendo a visitantes interesados en el ecoturismo. En última instancia, este proyecto no solo aborda desafíos prácticos de gestión de residuos y energía, sino que también posiciona a Villa de Leyva como un líder en innovación sostenible, mejorando el bienestar de los habitantes mejorando la calidad de vida de sus habitantes y contribuyendo a un futuro más verde y próspero para la región.

La matriz completa se puede observar en el archivo de Excel adjunto

Consecuencias Para La Sociedad Y Dimensión Humana De La Iniciativa

La implementación la instalación de un sistema de digestión anaeróbica en el centro de abasto local de Villa de Leyva, Boyacá, tuvo un impacto ambiental positivo. Los residuos orgánicos generados por la plaza, que se estimaron en unas 7 toneladas mensuales, representan un impacto ambiental negativo, ya que los residuos pueden generar emisiones que atrapan el calor y promueven alteraciones en el clima global. Además, existe el riesgo de deterioro de los recursos hídricos y edáficos, y proliferar vectores de enfermedades. Por lo tanto, el uso de un biodigestor permitió evitar la disposición de estos residuos en un relleno sanitario, lo que significativa una Disminución de las emanaciones que afectan la atmósfera y la degradación ambiental.

Además, La generación de energía a partir de desechos orgánicos del mercado plaza de mercado contribuye a Disminuir la necesidad de usar combustibles no renovables. El biogás es un combustible limpio y renovable que puede utilizarse

para generar energía eléctrica, calor o combustible para vehículos. La implementación del biodigestor en la plaza de mercado de Villa de Leyva, Boyacá también tendría una pertinencia social. Los residuos orgánicos generados por la plaza son una fuente de recursos que podrían aprovecharse para generar beneficios para la comunidad. El aprovechamiento de residuos biodegradables del mercado para crear gas combustible. Estos ingresos podrían utilizarse para financiar el mantenimiento del biodigestor o para cubrir otros gastos de la plaza. Sin embargo, para la implementación de un biodigestor en la plaza de mercado de Villa de Leyva, Boyacá, se requieren los siguientes permisos de investigación:

-Permiso de la Secretaría de Ambiente de Villa de Leyva: Este permiso es necesario para garantizar que el biodigestor cumpla con los requisitos ambientales.

-Permiso de la Alcaldía de Villa de Leyva: Este permiso es necesario para garantizar que el biodigestor se instale y opere de acuerdo con las normas municipales.

Además de estos permisos, se recomienda realizar una consulta previa con las comunidades indígenas y afrocolombianas que habitan en la región. Esto es importante para garantizar que el proyecto sea respetuoso con la cultura y los derechos de las comunidades locales(GEF, 2011).

Conclusiones

La implementación de un biodigestor tipo tubular (Plug Flow) en la Plaza de Mercado de Villa de Leyva como resultado final obtuvo un volumen total de 2.83 m³ y una inversión inicial de \$3,370,202, se determinó como una solución innovadora y económicamente viable para el manejo responsable de residuos orgánicos y la generación de biogás. Así mismo, presento un valor actual neto de \$1,945,328 y una tasa interna de retorno del 26%, el proyecto no solo promete ser rentable, sino que también ofrece beneficios ambientales significativos.

Por otro lado, presenta una solución innovadora y multifacética para la gestión de residuos orgánicos, este proyecto aborda la problemática inmediata de la disposición de desechos y transforma un reto ambiental para generar recursos valiosos, estableciendo un modelo de economía circular local.

La propuesta del biodigestor destaca como tecnología clave en la transición hacia prácticas más sostenibles, ofreciendo beneficios que abarcan desde la reducción significativa de los costos operativos asociados con el manejo de residuos hasta la generación de energía renovable en forma de biogás, esta solución integral reduce los impactos ambientales negativos relacionados con disposición tradicional de residuos orgánicos y ayuda a optimizar las condiciones ambientales del municipio, reforzando la imagen de Villa de Leyva como destino turístico comprometido con la sostenibilidad y la innovación ecológica.

Desde una perspectiva económica y ambiental, el proyecto demuestra una viabilidad robusta, respaldada por análisis financieros detallados y evaluaciones de impacto ambiental. La generación de biogás como alternativa energética renovable presenta una opción ecológica frente a los combustibles fósiles, y presenta la oportunidad de reducir costos energéticos a largo plazo para la plaza de mercado y potencialmente para otras instalaciones municipales. El impacto del proyecto se extiende más allá de sus beneficios ambientales y económicos inmediatos, abarcando dimensiones sociales y educativas cruciales para el desarrollo sostenible integral de Villa de Leyva. La implementación del

biodigestor sirve como una plataforma tangible para la educación ambiental, ofreciendo oportunidades para sensibilizar a la comunidad local, incluidos comerciantes, residentes y visitantes, sobre la importancia del manejo responsable de residuos y la producción de energía sostenible.

Finalmente, al demostrar la factibilidad operativa y financiera de implementar sistemas de biodigestión para valorizar residuos orgánicos, el proyecto establece un precedente que puede ser adaptado y escalado en diversos contextos urbanos y rurales. A medida que otros municipios adopten y adapten este modelo, se puede anticipar un impacto acumulativo significativo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la mejora de la gestión de residuos y la promoción de la energía renovable a nivel regional y nacional, incluso internacional. Este efecto dominó de sostenibilidad subraya el papel crucial que proyectos locales innovadores como este pueden desempeñar en la consecución de objetivos de desarrollo sostenible más amplios y en la transición hacia un futuro más resiliente y ecológicamente consciente.

Recomendaciones

1. Si se llega a su implementación, se recomienda establecer un sistema robusto de monitoreo y evaluación continua del biodigestor tubular Plug Flow. Este programa debería extenderse por un período significativo, idealmente de 3 a 5 años, para capturar datos a largo plazo sobre el rendimiento del sistema. El monitoreo debe incluir parámetros clave como la eficiencia en la producción de biogás, la calidad del biofertilizante producido, la reducción efectiva en el volumen de residuos orgánicos enviados a disposición final, y los ahorros económicos generados.
2. Es crucial lograr la participación activa de los miembros del mercado local en el proyecto para garantizar resultados exitosos y duraderos. Con este fin, se recomienda implementar iniciativas educativas dirigidas a vendedores, empleados y clientes, enfocadas en la relevancia de clasificar y manejar adecuadamente los desechos biodegradables. Estas iniciativas deberían incluir sesiones prácticas y formativas que destaquen las ventajas ecológicas y financieras del proceso de digestión anaeróbica, así como el impacto positivo que su colaboración puede tener en el bienestar general de la localidad.
3. Si se entabla una dinámica correcta el proyecto no solo se convierte en una solución técnica viable, sino también en un modelo de gestión comunitaria sostenible y replicable en otras plazas de mercado y localidades.
4. El sistema de biodigestión puede ser diseñado para procesar no solo residuos orgánicos, sino también otros tipos de residuos, como estiércol animal o residuos agrícolas. Esta capacidad de procesamiento múltiple puede aumentar significativamente la eficiencia del sistema al diversificar las fuentes de materia prima, es decir, se puede masificar el aprovechamiento de los recursos disponibles, lo cual es especialmente beneficioso en contextos rurales, e incluso agroindustriales.

El diseño y la implementación de este sistema debe considerar cuidadosamente las necesidades específicas y el nivel de presupuesto disponible. Una planificación adecuada y una evaluación detallada de las condiciones permitirá adaptar el sistema de manera más efectiva y rentable. De esta manera, no solo se logrará una gestión más inteligente de los residuos, sino que también contribuirá al desarrollo sostenible de la comunidad, que actualmente es una de las metas del cambio climático y la visión ambiental de los estados.

Referencias Bibliográficas

- Tapase, R. p., & pawar, p. (2020). *Diseño de biodigestor doméstico de cúpula fija para la degradación de residuos de cocina mediante reacciones mesófilas y termófilas (anaeróbicas)*. india: science direc.
- Paula Valentina Chaves Chacón Erika Yisney Gelves Vera. (2022). *Aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos para generar biogás y biol por medio de un biodigestor para una vivienda típica rural del municipio de Cubara, Boyacá*. Ciencia Unisalle.
- Brandon Danilo Arenas Guayazan. (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*. Ciencia Unisalle.
- Luis Carlos Romero Parra Yuly Paola Mendoza Jiménez. (2022). *Propuesta De Capacitación Para El Manejo De Residuos Sólidos De La Plaza De Mercado De Piedecuesta, Santander*. Corporación Universitaria Minuto de Dio.
- María Fernanda Sotaquira Medina. (2021). *Diseño de un Biodigestor para el Aprovechamiento de la Materia Orgánica Generada en la Plaza de Mercado del Municipio de Sogamoso - Boyacá*. repository
- Chillo Abril, J. F., y Paguay Cuvi, S. B. (2015). *Implementación de un biodigestor continuo para producción de biogás a partir de estiércol de ganado vacuno en la finca La Poderosa (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo)*.
- Basurto Loor, J. M., y Huiza Menéndez, S. F. (2017). *Implementación de un biodiogestor a partir de residuos ganaderos para uso doméstico en la hacienda La Esperanza, Calceta, Bolívar Manabí (Bachelor's thesis, Calceta: ESPAM)*.

Macas Gaona, H. D. (2018). *Diseño e implementación de un biodigestor tipo salchicha en la finca La Maravilla en la provincia de Sucumbíos cantón Gonzalo Pizarro (Bachelor's thesis, Quito: Universidad de las Américas, 2018).*

Peláez Merchán, J. M. (2019). *Diseño de un biodigestor anaeróbico discontinuo para la producción de biogás en zonas de bajos recursos económicos de Jipijapa (Bachelor's thesis, Jipijapa-UNESUM).*

Martínez Figueroa, K. M. (2020). *Producción de biogás a partir de los residuos orgánicos generados por el estiércol e ganado en una finca ubicada en el municipio de Ipala, departamento de Chiquimula (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).*

Cedeño Peña, M. M. (2019). *Construcción de biodigestor para estimación de potencial energético a partir de bovinaza. finca " Las Delicias", vereda Santa Barbara, Íquira-Huila (Bachelor's thesis, Universidad El Bosque).*

Vargas, C., Gutiérrez, J., Vélez, D., Gómez, M., Aguirre, D., Quintero, L., & Franco, C. (2021). Gestión del manejo de residuos sólidos: un problema ambiental en la universidad. *Pensamiento & Gestión* (50), 117-152.

Xavier, C. P. (2022). *APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS*. Bucaramanga: Universidad de Santander

Parlamento Europeo. (24 de mayo de 2023). *Economía circular: definición, importancia y beneficios*.

Quenan, J. (2020). *Plan de manejo de Residuos Sólidos de la Institución Educativa Artemio Mendoza Carvajal*. [Tesis Especialista en Educación ambiental]: Fundación Universitaria los Libertadores.

?sequence=1

- Rosas, M., & Gámez, A. L. (2019). Prevención de la generación de residuos en el marco de una economía ecológica y solidaria: un análisis del manejo de residuos en los municipios de México. *Sociedad y Ambiente*(21), [OBJ]7-24.
- Sáez, A., & Urdaneta, J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 121-135.
- Sánchez, M., Cruz, J., & Maldonado, P. (2019). Gestión de residuos sólidos urbanos en América Latina: un análisis desde la perspectiva de la generación. *Revista Finanzas y Política Económica*, 11(2), 321-336.
- Tineo, J., & Valiente, Y. (2022). Manejo de residuos sólidos para reducir la contaminación del medio ambiente: Revisión sistemática. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4), 578- 601.
- Toledo, J., & Quintero, C. (2022). Gestión de residuos sólidos urbanos en México: un caso de estudio desde la perspectiva organizacional. *Revista de Administração de Empresas*, 62(3).
- UAESP. (2023). *Relleno sanitario*.
- UAESP. [OBJ](2023a). *Residuo sólido no aprovechable*.
- UNDP. (26 de marzo de 2021). *La economía circular: un modelo económico que lleva al crecimiento y al empleo sin comprometer el medio ambiente*.
- Medina, M. F. (2021). *Diseño de un Biodigestor para el Aprovechamiento de la Materia Orgánica Generada en la Plaza de Mercado del Municipio de Sogamoso - Boyacá*. Sogamoso: Universidad Nacional Abierta y A Distancia - UNAD.

Minambiente. (2015). *Residuos Peligrosos*.

Minambiente. (2018). *Piensa un minuto antes de actuar: gestión integral de residuos sólidos*.

MinVivienda. (2023). *Planes de gestión integral de residuos sólidos*.

Minvivienda. (s.f.). *Plan de Manejo Ambiental*.

Murcia, C. (2020). *Diseño e implementación de un plan de gestión integral de residuos sólidos en la institución educativa departamental José de San Martín, sede rural Lourdes de Tabío Cundinamarca*. [Tesis de Maestría en Gestión Ambiental]: Pontificia Universidad Javeriana.

Observatorio Ambiental de Bogotá. (18 de mayo de 2021). *Secretaría de Ambiente recuerda la importancia de separar residuos y aprovecharlos*.

Ojeda, A., Ojeda, H., & García, L. (2022). Educación Ambiental para el buen manejo de los residuos sólidos. *Inclusión y Desarrollo*, 9(1), 74-86.

Abelló, a. h. (2018). *análisis de los posibles factores que dificultan la implementación de biodigestores tipo tubular y cúpula flotante en las zonas rurales y urbanas de la región norte de Colombia*. barranquilla : programa de ingenierías universidad del norte.

d Rodríguez convers, j. c. (2022). *diseño de un biodigestor para la producción de biogás en granja avícola, estudio de caso granja la carolina vereda kiwua, garagoa, boyacá*. bogota : universidad el bosque.

Esther nayive gómez lópez, j. s. (2017). *implementacion de un biodigestor para el aprovechamiento de los residuos de las granjas porcinas en el municipio de tibana*. Bogotá: universidad católica de Colombia.

- vera, p. v. (2022). *aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos para generar biogás y biol por medio de un biodigestor para una vivienda típica rural del municipio de cubará, Boyacá*. Bogotá: universidad de la Salle.
- Arauz, J. &. (2015). *Estudio de Viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Arce, J. (2011). *Diseño de un Biodigestor para generar Biogas y abono a partir de desechos orgánicos de animales aplicable en las zonas agrarias del Litoral*. Universidad Politécnica Salesiana de Guayaquil. Ecuador.
- ARGOTI, E. E. (2015). *“DETERMINACIÓN DE CARBONO Y NITRÓGENO DE LOS RESIDUOS ORGÁNICOS DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO*. .
- B.soudi. (2017). *Composting parameters and compost quality: a literature review*.
- GEF, M. / (2011). *MANUAL DE BIOGÁS*. Chile.
- Gomero2, O. G. (2020). *Relación entre la producción de biogás y biol a partir de restos de trucha y estiércol vacuno*. bogota.
- Guzman, A. (2014). *“ELABORACIÓN DE UN BIODIGESTOR PILOTO TUBULAR PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO, EN UNA VIVIENDA DE LA COMUNIDAD DE TEMBO”*.
- Pareja1, M. M. (2005). *Manejo y procesamiento de la gallinaza*.
- Sagarpa. (2010). *Especificaciones Técnicas para el Diseño y Construcción de Biodigestores*. Mexico.
- boyaca, G. d. (2024). Obtenido de https://www.boyaca.gov.co/secretariainfraestructurapublica/wp-content/uploads/sites/68/2021/05/ANEXO-2.-ANALISIS-UNITARIO-DETALLADO-Lista-de-precios-unitarios-fijos-de-obra-publica-y-consultoria_compressed.pdf

desarrollosacd. (2022). Obtenido de <https://www.desarrollosacd.com/tipos-de-biodigestores-cual-es-la-mejor-opcion/>

Duque, G. y. (2017). Obtenido de <http://www.lrrd.org/lrrd18/4/duqu18049.htm>

energy, g. (2022). Obtenido de <https://geniabienergy.com/biogas-y-biodigestores-tipos-ventajas-y-beneficios/>

Minenergia. (2022). Obtenido de <https://www.fao.org/4/as400s/as400s.pdf>

YEISON OLAYA ARBOLEDA, I. A. (2009). *FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE BIODIGESTORES*.

Bosch, A. (2011). Estudio de Viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero. Universitat Politècnica de Catalunya.

Bragachini, M. (2013). Capacitación técnica a Alemania y visita a una planta de Biogas. Producción Agroindustrial del INTA.

Chasnyk, O., Solowski, G., & Shkarupa, O. (2015). Historical, technical and economic aspects of biogas development: Case of Poland and Ukraine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 435-445.

Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2007). Inhibition of Anaerobic Digestión Process. Department of Biological and Agricultural Engineering, North Carolina State University.

Chen, J. L., Ortiz, R., Steele, T. W., & Stuckey, D. C. (2014). Toxicans Inhibiting Anaerobic Digestión: a Review. US Natural Library of Medicine National Institutes Of Hearh.

Choy, M., & Ortecho, R. (2013). Biogas y Bioabonos producidos en biodigestores tubulares. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.

DAMAS, M. R. (2000). Plantas de biogás de pequeñas dimensiones para comunidades rurales. Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba.

