



Análisis sobre Producción y Captura de Biogás en Relleno Sanitario: Una Revisión

Monografía teórica

Diana Marcela Ortiz Hernández
1.096.954.036

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍAS
TECNOLOGÍA EN PRODUCCIÓN INDUSTRIAL
BUCARAMANGA, 2022**



Análisis sobre Producción y Captura de Biogás en Relleno Sanitario: Una Revisión

Monografía teórica

Diana Marcela Ortiz Hernández
1.096.954.036

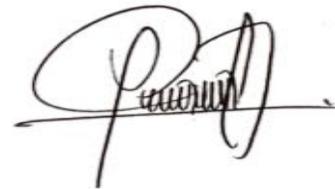
Trabajo de Grado para optar al título de
Tecnólogo en producción industrial

DIRECTOR
Nilson Yulian Castillo León

Grupo de Investigación en Sistemas de Energía, Automatización y Control–
GISEAC

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍAS
TECNOLOGÍA EN PRODUCCIÓN INDUSTRIAL
BUCARAMANGA, 2022

Nota de Aceptación



Firma del Evaluador



Firma del Director

F-DC-125

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO
DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA,
EMPREDIMIENTO Y SEMINARIO**

VERSIÓN: 1.0

DEDICATORIA

A mis padres, porque a ustedes debo la persona en la que me he convertido el día de hoy, gracias a su paciencia, apoyo y motivación a cumplir cada una de mis metas a pesar de las dificultades, enseñándome la capacidad de persistir y auto superarme. Son ustedes quienes forjaron en mí principios, valores y destrezas a través de sus consejos, recursos, palabras de aliento y principalmente su amor desinteresado, que han sido pilar fundamental en mi formación académica.

Muchos de mis logros son y serán de ustedes y para ustedes, porque cada uno de ellos son el fruto del esfuerzo y el amor incondicional que me han ofrecido siempre y por el cual espero siempre compensarlos llenándolos de orgullo.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente agradezco a mis padres, por brindarme siempre la mejor educación basada en el esfuerzo, la constancia y los valores, como también las oportunidades que me han brindado y por las que he aprendido a valorar el esfuerzo. Quedo eternamente agradecida ya que todo lo que me han proporcionado es invaluable para mí.

Agradezco también a las Unidades Tecnológicas de Santander por haberme permitido un espacio de formación y proporcionarme docentes modelos de ejemplo que enriquecieron mi conocimiento y afianzaron mis habilidades enseñándome a creer en lo que sé y lo que soy. En especial, quiero agradecer a mi director Nilson Yulian Castillo León, quien me brindó todos sus conocimientos y apoyo para la realización de este proyecto, sin su orientación y paciencia esto no sería posible.

Y en general, agradezco a todos aquellos que la vida puso en mi camino para inspirarme, ayudarme y motivarme, diariamente y en cada dificultad, porque todo lo que ha sucedido es lo que me ha hecho crecer.

Gracias por todo y más.

TABLA DE CONTENIDO

<u>RESUMEN EJECUTIVO</u>	<u>14</u>
<u>INTRODUCCIÓN</u>	<u>16</u>
<u>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN</u>	<u>18</u>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	20
1.3. OBJETIVOS	21
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	21
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.4. ESTADO DEL ARTE	21
<u>2. MARCO REFERENCIAL.....</u>	<u>25</u>
2.1. MARCO LEGAL Y AMBIENTAL	25
2.1.1. DISPOSICIÓN FINAL DE RSU EN COLOMBIA.....	25
2.1.2. EMISIONES ADMISIBLES DE CONTAMINANTES.....	28
2.1.3. APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO MEDIANTE FUENTES NO CONVENCIONALES.	30
2.2. MARCO CONCEPTUAL.....	32

F-DC-125	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO	VERSIÓN: 1.0
2.2.1.	CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	32
2.2.2.	RELLENO SANITARIO	34
2.2.3.	GASES DE EFECTO INVERNADERO.....	36
2.2.4.	RUTA BIOQUÍMICA DEL BIOGÁS	38
2.2.5.	PROCESO DE PURIFICACIÓN DE BIOGÁS	40
2.2.6.	PRODUCCIÓN ENERGÉTICA A TRAVÉS DE BIOGÁS.....	45
2.2.7.	BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN ACADÉMICA	46
2.2.8.	BASE DE DATOS ACADÉMICA.....	47
3.	<u>DISEÑO DE LA INVESTIGACION.....</u>	49
4.	<u>DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO.....</u>	51
4.1.	FASE 1: REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	51
4.2.	FASE 2: ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	52
4.3.	FASE 3: CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS.....	52
5.	<u>RESULTADOS.....</u>	54
5.1.	RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	54
5.1.1.	CLASIFICACIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN DISPONIBLE Y ASOCIADA	54
5.1.2.	SELECCIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN.....	55
5.2.	ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	57

5.2.1.	REACCIÓN DE RELLENO SANITARIO AL PROCESO AERÓBICO DE LOS RSU DISPUESTOS.	58
5.2.2.	ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DEL BIOGÁS PRODUCIDO EN RELLENO POR MEDIO DEL PROCESO ANAERÓBICO.	60
5.2.3.	EMISIONES DE BIOGÁS FUGITIVAS Y CAPTURADAS PRODUCIDAS EN RELLENO SANITARIO.	68
5.2.4.	APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS Y VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RSU.....	72
5.3.	CONCLUSIONES ANALÍTICAS	78
6.	<u>CONCLUSIONES.....</u>	80
7.	<u>RECOMENDACIONES</u>	82
8.	<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Acciones para la disposición de residuos sólidos	32
Figura 2. Clasificación de los residuos sólidos.	33
Figura 3. Funcionamiento de un Relleno Sanitario.....	35
Figura 4. Efecto invernadero intensificado por acción humana.	37
Figura 5. Fases para la producción de Biogás	38
Figura 6. Técnica de purificación de Biogás con agua a presión.	42
Figura 7. Ciclo de desulfuración biológica	43
Figura 8. Sistema de lavado mediante scrubbers	45
Figura 9. Tratamiento y aprovechamiento del biogás.....	46
Figura 10. Estructura de bases de datos académicas.....	48
Figura 11. Proceso investigativo	50
Figura 12. Fases de la reacción de RSU en Rellenos sanitarios.....	59
Figura 13. Parámetros del Modelo LandGEM	64
Figura 14. Comparativo pozos activos y pasivos como sistema de captación de biogás.....	70
Figura 15. Diseño de sistema de captación de biogás mediante manta	71
Figura 16. Diseño de sistema de captación de biogás mediante trincheras.....	72
Figura 17. Valorización energética del biogás.....	73

Figura 18. Proceso de aprovechamiento energético del biogás.....	74
Figura 19. Proceso de generación de energía eléctrica con motor de combustión interna.	75
Figura 20. Turbina de gas según Ciclo Bayton.....	76
Figura 21. Ciclo Rankine	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Eliminación de sustancias según uso de biogás.....	41
Tabla 2. Criterios de investigación para la revisión bibliográfica.....	51
Tabla 3. Resultados de búsqueda según su fuente literaria.	54
Tabla 4. Resultados de búsqueda según el eje temático.	55
Tabla 5. Resultados de la revisión bibliográfica.....	55
Tabla 6. Procesos de descomposición de RSU.....	60
Tabla 7. Modelos de cálculo de la producción de biogás en rellenos sanitarios.	61
Tabla 8. Descripción de la estructura del modelo LandGEM.....	62
Tabla 9. Tipos de pila de combustible	77

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Formula química de purificación de Biogás.....	41
Ecuación 2. Cálculo de la producción de metano mediante el modelo LandGEM	64
Ecuación 3. Cálculo de la producción de metano mediante el modelo IPCC ..	65
Ecuación 4. Cálculo de la producción de metano mediante el modelo Mexicano	66
Ecuación 5. Cálculo de la producción de metano mediante el modelo EPER Germany.....	68

RESUMEN EJECUTIVO

Hoy por hoy con el aumento poblacional y del consumo que se evidencia a nivel mundial, se ha generado una deuda ambiental histórica debido a los sistemas de disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos RSU, que representan un alto impacto ambiental ya sea por un inadecuado y/o insostenible manejo, convirtiendo en un reto la mitigación del impacto medioambiental mediante medidas controladas en la gestión y el aprovechamiento energético de los RSU. El objetivo de la presente investigación es realizar un análisis teórico y conceptual de las tecnologías aplicadas en el proceso de producción y captura de biogás en relleno sanitario, que podrían contribuir de manera sostenible a la actual problemática ambiental.

Se recopilaron y clasificaron modelos identificados dentro de la revisión del estado del arte, que permitieron entender el proceso de producción y captura del biogás, del cual se generaron conclusiones de análisis que expusieran los beneficios de la implementación de los diferentes esquemas y/o tecnologías, todo a partir de cuatro ejes principales; Reacción de relleno sanitario al proceso aeróbico de los RSU dispuestos, Estimación de la generación del biogás producido en relleno por medio del proceso anaeróbico, Emisiones de biogás fugitivas y capturadas producidas en relleno sanitario y, Aprovechamiento energético del biogás con valorización energética de los RSU.

Concluyendo las diversas reacciones producidas en rellenos sanitarios que representan un alto riesgo para la salud pública. Y los múltiples procesos existentes para su captura y tratamiento adaptados a las condiciones geográficas y sociales del sitio de aplicación, siendo estos procesos de mucha ayuda para realizar

proyecciones de la generación de biogás en un relleno sanitario y el potencial energético que representa. Adicionalmente, los posibles usos y procesamientos para el aprovechamiento energético que actualmente se implementan como acción de interés socio-ambiental y todos los beneficios que involucra.

PALABRAS CLAVE. Biogás. Relleno sanitario, Residuos sólidos, Aprovechamiento energético, Control ambiental.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la humanidad enfrenta problemas relevantes, uno de ellos está relacionado con el medio ambiente, a causa de la desmesurada generación de residuos sólidos, la cual ha aumentado los niveles de contaminación y por consecuente ha disminuido la calidad de vida (Umaña, 2018). El uso de rellenos sanitarios es una de las principales técnicas utilizadas para la disposición final de residuos sólidos, pero conlleva varios efectos negativos sobre el medio ambiente, como la disminución en la calidad del aire debido a los malos olores y la generación de gases como CH₄ y CO₂, que en altas emisiones a la atmósfera desencadenan otra problemática conocida como cambio climático, así mismo llegan a contaminar fuentes hídricas y suelos mediante filtración en la superficie de los lixiviados, afectando el estado salubre de los recursos naturales que posteriormente son transformados para consumo y uso humano, influyendo en las afecciones en la salud (Caballero-Saldívar et al., 2011).

A partir de lo anterior, se considera de alta importancia el reconocimiento de los efectos negativos en el ambiente desencadenado por las actividades humanas, y la necesidad generada de contrarrestar dichos efectos que deterioran el bienestar humano mediante la implementación de métodos o técnicas que puedan disminuir el impacto o sacar provecho de los actores contaminantes, es así, que se hace urgente el constante estudio de la problemática emergente de la gestión de RSU y el uso de Rellenos sanitarios, para adaptar o actualizar las técnicas de acuerdo a los avances tecnológicos y científicos en surgimiento.

Es así, que es de relevancia la presente investigación, la cual aportará el conocimiento para la comprensión del proceso de producción y captura de biogás en relleno sanitario, como también los efectos medioambientales que conlleva y las actuales alternativas empleadas para la mitigación de perjuicios, incentivando a la comunidad académica al estudio y análisis de esta problemática, y sirviendo de base para futuras investigaciones que proporcionen implementaciones u otras opciones de aprovechamiento más amigables con el ambiente.

Esta investigación tiene como objetivo generar un análisis de los beneficios socio-ambientales de las diversas tecnologías y sistemas implementados para la producción y captura de biogás en relleno sanitario, para esto se empleó un método de tipo teórico a partir de una revisión literaria de estudios e investigaciones previas.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del Problema

El aumento desmedido en la generación de residuos sólidos Urbanos (RSU) está fuertemente ligado con el poder económico y crecimiento poblacional de una región o país, convirtiéndose en un reto la gestión y tratamiento adecuado de los RSU para las autoridades locales. Este crecimiento se puede observar en el estudio presentado por Kaza et al. (2018) que predijo el crecimiento de la generación de residuos sólidos urbanos, de 1.300 millones de toneladas/año en 2012 a aproximadamente 2.200 millones de toneladas/año en 2025. Un gran porcentaje de estos residuos son dispuestos en rellenos sanitarios a cielo abierto, ya que constituyen la opción de menos costo para su gestión, sin embargo, los rellenos sanitarios simulan un gran reactor de un proceso digestor anaeróbico, que sin los tratamientos adecuados producen emisiones de biogás representadas en CH₄ con alto impacto en la capa de ozono y el riesgo de contaminación del suelo y aguas subterráneas (I Santos & Tiago, 2018).

Colombia no es ajeno a este fenómeno, al año se producen aproximadamente 12 millones de toneladas de desperdicios, los cuales terminan en cuerpos de agua, rellenos sanitarios o vertederos a cielo abierto, a excepción de solo un 17 % que es reutilizado. El bajo aprovechamiento de desechos, que a comparación con otros países que reutilizan más del 65 %, ha acelerado la finalización de la vida útil de los rellenos incrementando el impacto socio ambiental en comunidades aledañas siendo algunos decretados en estado de emergencia debido al cumplimiento de vida útil de operación, sin embargo continúan operando por falta de alternativas, un

ejemplo por citar es el caso de “El Carrasco” utilizado por el área metropolitana de Bucaramanga y 20 municipios contiguos que ha ocasionado cinco emergencias sanitarias en la ciudad (Castillo, 2019).

El biogás en el relleno sanitario se produce por la putrefacción de sustancias orgánicas en privación de oxígeno (proceso anaeróbico), generando componentes como CH₄ (50 %), CO₂ (40 %), N (5 %) y otros, considerados tóxicos y riesgosos para la salud pública, por ende, es considerada la segunda problemática medioambiental de mayor importancia y de contribución al efecto invernadero (Kundariya et al., 2021). A pesar de las alternativas de solución sostenible como el aprovechamiento del biogás como una fuente alterna de energía, mediante su reutilización, no obstante, esta práctica presenta dificultades debido a la correcta predicción del gas recolectado y a las impurezas que este presenta en su composición (de Souza et al., 2021)

La falta de conocimiento y comprensión de la gestión del proceso de producción y captación de biogás son unos de los factores que intervienen en el eficiente aprovechamiento de las tecnologías y métodos para la generación energética renovable y sostenible para el medio ambiente, dando espacio a una brecha de alternativas biosostenibles que no cumplen las expectativas de las implicaciones socioambientales vigentes, por ende, se hace necesario el estudio y conocimiento de la gestión actualizada del proceso de captación y aprovechamiento del biogás que permita implementar nuevas alternativas a la vanguardia de las problemáticas que día a día van emergiendo, haciendo el proceso más eficiente y sostenible con el medio ambiente.

A partir de lo anterior se genera la siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible que, si la comunidad académica comprendiera el proceso de producción y captación de biogás en rellenos sanitarios, este conocimiento podría contribuir con alternativas sostenibles a la problemática socio ambiental que enfrenta este modelo de gestión de basuras?

1.2. Justificación

El desarrollo y alcance de los objetivos de esta investigación teórica sobre los conceptos de producción de biogás y captura del mismo, permitirá identificar las diferentes reacciones y rutas bioquímicas que se presentan en la generación de biogás en productos orgánicos vertidos en los rellenos sanitarios, así como identificar los diferentes modelos de cálculo para estimar la producción de biogás en procesos anaerobios y las posibles técnicas de captura y aprovechamiento energético de las emisiones de biogás producidas por el relleno sanitario.

También expondrá conocimientos teóricos basados en prácticas de investigaciones anteriores que brindarán información real de la situación actual y su influencia en los factores socio-ambientales, fortaleciendo la línea de investigación de la producción de RSU y el aprovechamiento de los mismos, y así mismo generará una concientización en la comunidad de las causas origen de la problemática, atribuidas al hiperconsumo, el desmedido urbanismo y la baja reutilización de residuos.

Sumado a lo anterior, mediante la presente investigación, los estudiantes de la facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías de la UTS, podrán tener un insumo para desarrollar futuros proyectos de ingeniería en acompañamiento con el grupo de investigación GISEAC en las líneas de estudio concernientes a “Gestión de la eficiencia energética y aplicación de energías alternativas”

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivo General*

Analizar los conceptos teóricos y las tecnologías aplicadas en el proceso de producción y captura de biogás en relleno sanitario, por medio de una revisión académica especializada.

1.3.2. *Objetivos específicos*

- ✓ Realizar una revisión del estado del arte en base de datos especializados con el fin de identificar los conceptos teóricos de la producción y captación del biogás en rellenos sanitarios
- ✓ Clasificar la información identificando modelos que permitan entender el proceso de producción y captura del biogás en relleno sanitario
- ✓ Analizar los diferentes modelos identificados para determinar los beneficios de aplicar un esquema de producción y captura de biogás pertinente en relleno sanitario

1.4. Estado del Arte

A partir del estado del arte se espera realizar una recopilación documental de investigaciones semejantes que den paso al estudio del conocimiento acumulado sobre la identificación de los fundamentos teóricos y desarrollos tecnológicos sobre la producción, captación y aprovechamiento de biogás en relleno sanitario. A continuación, revisaremos investigaciones enfocadas en la gestión de RSU en vertederos para su valorización energética, seguido de estudios relacionados con la producción de biogás en relleno sanitario y por último el aprovechamiento de este biogás como recurso energético.

Es primordial comprender que el tratamiento y la eliminación de residuos sólidos es un desafío global para el desarrollo de una sociedad sostenible. La mala gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) no solo tiene consecuencias ambientales nocivas, sino que también plantea riesgos para la salud pública y plantea otras preocupaciones socioeconómicas. La conversión de residuos en energía proporciona una solución a problemas medioambientales como la emisión de gases de efecto invernadero y la gestión de residuos, los autores Shah y colaboradores realizaron una revisión integral de la generación de residuos sólidos urbanos y sus características, proporcionando una vista panorámica de la idoneidad de diversas tecnologías para la producción de energía dejando como insumo, información actualizada sobre la misma. También cubre desafíos y perspectivas en este campo de investigación (Shah et al., 2021).

En esta línea de estudio los investigadores Kundariya y demás, realizaron una un estudio de revisión sobre estrategias emergentes y herramientas de monitoreo para la gestión de residuos sólidos municipales utilizando tecnologías de alta gama y la recuperación de energía de los RSU (Kundariya et al., 2021).

En el contexto de la producción y captura de biogás se encuentran como ejemplo santos y compañeros quienes realizaron un estudio sobre la Producción de biogás a partir de vertederos de residuos sólidos dejando como insumos diferentes modelos de estimación de generación de biogás en relleno sanitario (Santos et al., 2020). Otros estudios se concentraron en la producción de energía a partir de biogás en un relleno sanitario cerrado, evaluando el potencial energético del relleno sanitario Prados de la Montaña (PM) en la Ciudad de México, otorgando conclusiones como (1) el contenido de metano del biogás producido en el relleno

sanitario de partículas fue de alrededor del 45-69%. (2) La extracción forzada favoreció la entrada de aire a través de grietas superficiales y redujo el contenido de metano de la mezcla de biogás. (3) Suponiendo una eficiencia de recuperación del 75%, el flujo de biogás se estimó en $1081 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (al menos 1.8 MW) donde actualmente se estima una recuperación de biogás de $908 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, equivalente a 1,5 MW (Villanueva-Estrada et al., 2019).

En cuanto a la captura de biogás los investigadores Xu y colaboradores, evaluaron el desempeño de rellenos sanitarios simulados con diferentes prácticas de recolección de biogás, incluida la recolección de biogás hacia arriba solamente (L). Se construyó un relleno sanitario simulado, utilizando un lisímetro de acero inoxidable equipado con una unidad de compresión. El flujo de gas hacia arriba se vio favorecido en los RSU sin comprimir, cuando se permitieron los flujos de gas tanto hacia arriba como hacia abajo (L) se redujeron las proporciones de vacíos, la dirección de flujo preferencial de biogás se cambió a flujo de gas descendente junto con el drenaje gravimétrico de lixiviados mejorando la distribución de humedad y aumentando en 2.5 veces la captura de biogás (Xu et al., 2019).

Según los estudios mostrados, en consecuencia, de disponer los RSU en rellenos sanitarios se genera una fuente energética que se manifiesta en la producción de biogás por medio de reacciones bioquímicas al interior del relleno sanitario, capitalizando de forma natural la valorización energética de los RSU. Los investigadores Souza y colaboradores, evaluaron el potencial de generación de energía eléctrica utilizando biogás derivado de estaciones de residuos sólidos urbanos (RSU) en los estados de São Paulo y Minas Gerais, Brasil donde estimaron la suma de la potencia óptima para cada vertedero de São Paulo y

Minas Gerais, respectivamente, en 139,5 MW (977.778,8 MWh / año) y 14 MW (82.218,4 MWh / año) (de Souza et al., 2021).

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. Marco Legal y Ambiental

2.1.1. *Disposición final de RSU en Colombia.*

2.1.1.1 Decreto 838 de 2005

Contiene preceptos sobre planeación, estructuración y operación de sitios de disposición final de RSU (como actividad complementaria) mediante el sistema de relleno sanitario, estableciendo la relación y aplicabilidad de las normas al Servicio público domiciliario de aseo. Así mismo, establece los lineamientos territoriales para la identificación de áreas vulnerables para localización de rellenos sanitarios. Establece las garantías del plan de trabajo y del personal prestador del servicio público de aseo en la etapa de operación, como los parámetros de control y monitoreo acorde a la licencia ambiental en cuanto a calidad de aguas subterráneas y superficiales, y del aire, según disponga el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Decreto 838, 2005).

2.1.1.2 Decreto 1713 de 2002.

Dispone las cualidades del servicio de aseo, desde recolección, transporte, limpieza de áreas públicas hasta el almacenamiento de los residuos sólidos y su sistema de aprovechamiento. También establece los derechos y deberes de las personas y entidades prestadoras del servicio de aseo. Como también establece la responsabilidad regional con la construcción del Plan para la Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS, que deberá contar con información del diagnóstico actual, alternativas de operación, análisis de factibilidad, programa de gestión y plan

de contingencia, que se deberá encontrar a disposición de los respectivos entes de control ambiental. Expone los parámetros básicos para el diseño de los rellenos sanitarios y el manejo y control de gases, lixiviados y fuentes hídricas. Finalmente, establece reglamento, clausura, recuperación y responsabilidad de impacto ambiental de rellenos sanitarios (Pastrana et al., 2002).

2.1.1.3 Decreto 1784 de 2017

Reglamenta el desarrollo y operación de las actividades de disposición final de RSU como actividad complementaria al servicio público de aseo. Establece los requisitos de estudio, construcción, criterios de operación, monitoreo, cierre y clausura de rellenos sanitarios y su tratamiento, validando mediante las características de estudio, diseño, cálculos, instrumentación, infraestructura y presupuesto para construcción y operación de sitios de disposición final de RSU (Decreto 1784 , 2017).

2.1.1.4 Resolución 1291 de 2006.

Comprende las referencias para la realización del Diagnóstico Ambiental de Alternativas para construcción y operación de rellenos sanitarios, DA-TER-5-01, para tramitología de la respectiva licencia ambiental. Este proporcionará a las autoridades ambientales información de factibilidad de proyectos para la disposición final de RSU evaluando el uso racional de los recursos naturales y la mitigación de efectos ambientales mediante alternativas sostenibles. Los estudios ambientales deberán adaptar los lineamientos de la presente resolución, bajo las facultades del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, para ser presentados frente a la autoridad ambiental (Resolución 1291, 2006).

2.1.1.5 Resolución 1390 del 2005.

Dando cumplimiento a la resolución 1045 del 2003, artículo 13, se establece una serie de instrucciones y directivas a las cuales se da lugar en los municipios que deben realizar acción de cierre o adecuación del actual sitio de disposición final de RSU, de aquellos que no cumplan con las condiciones necesarias para su operación, según lo considere la autoridad ambiental, se haya dado incumplimiento a la normativa legal y ambiental vigente y/o se haya estimado en el tiempo de vida útil. Se establece el procedimiento para la restauración ambiental del sitio, los tiempos de vigencia o plazos para efectuar acciones, como también las posibles acciones legales a contraer en caso de incumplimiento. Finalmente, dispone las adecuaciones técnicas teniendo en cuenta la cantidad poblacional y la distancia de localización que determinan la disposición de dichos municipios en cierto relleno sanitario (Resolución 1390, 2005).

2.1.1.6 Ley 9 de 1979

Busca dar garantía de las condiciones ambientales que puedan afectar la salud y bienestar humano. Estableciendo control sobre las actividades que puedan poner el riesgo la calidad de vida de una comunidad, considerando las determinaciones del Ministerio de Salud. Se tendrán en cuenta normas para actividades que influyan ambientalmente residuos líquidos (aguas subterráneas, de lluvias y/o superficiales), residuos sólidos (considerando principalmente la actividad de disposición final de RSU) y emisiones atmosféricas (calidad del aire). Dentro de la ley se establecen planes, acciones y medidas preventivas a llevarse a cabo de acuerdo a los puntos de vulnerabilidad identificados de acuerdo a la actividad, y finalmente, la repercusión sancionatoria por incumplimiento. De manera concluyente provee los derechos y deberes al público general dentro de su rol medioambiental, haciéndolo partícipe de

la restauración y conservación de la calidad ambiental, por consiguiente, del bienestar humano (Ley 9, 1979).

2.1.1.7 CONPES 3874

Es una Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, que asocia medidas para la disminución de la producción de desechos en general y principalmente de aquellos que son direccionados a rellenos sanitarios, también busca concientizar y fomentar el tratamiento y aprovechamiento de los diferentes tipos de desechos, desde la reutilización por parte del consumidor hasta la generación de energías de fuentes no convencionales, buscando mitigar las repercusiones medioambientales que conlleva la generación desmedida de residuos como el efecto invernadero. La principal alternativa de cambio presente en esta política, nace de la educación y cultura de las personas desde la generación de basuras que son el factor origen de las diversas problemáticas asociadas a la salud pública, calidad del aire, preservación de recursos, entre otros (CONPES, 2016).

2.1.2. Emisiones admisibles de contaminantes.

2.1.2.1 Decreto 2811 de 1974.

Su principal característica es la identificación del medio ambiente como patrimonio de la humanidad, reconociendo su importancia para la subsistencia humana y la necesidad del cuidado y conservación del mismo. Inicialmente, define los conceptos y las conductas que son contempladas como acciones nocivas para el medio ambiente y, por ende, atentan contra el bienestar humano. Establece el compromiso del estado con la creación de incentivos económicos para fomentar la conservación y cuidado de los recursos naturales, y las facultades para la inclusión

de programas de educación ambiental. También designa reglas para el manejo adecuado de los residuos, teniendo en cuenta que deben emplearse los mejores sistemas o métodos existentes de acuerdo a los avances científicos y tecnológicos que puedan garantizar la mitigación del efecto medioambiental. En general, ordena medidas sobre la conducta humana para la preservación y sostenibilidad de los recursos naturales en garantía de la salud humana (Decreto-Ley 2811, 1974).

2.1.2.2 Ley 99 de 1993.

Mediante la cual se instaura el Ministerio del medio ambiente y el Sistema Nacional Ambiental (SINA), que se desarrollarán bajo los principios de la Declaración de Río de Janeiro 1992. Se establecen las funciones, estructura y las entidades de apoyo científico vinculadas al Ministerio, también se consideran las tasas retributivas por actividades contempladas nocivas comerciales o no, que sean desencadenas por el hombre y las tasas compensatorias otorgadas por el uso de recursos naturales renovables. También se rigen y exponen el rol de la licencia ambiental y la competencia de la autoridad ambiental para su otorgamiento, revocación o suspensión de acuerdo al diagnóstico y estudio. Finalmente, relaciona la participación ciudadana mediante acciones que velen por la conservación del medio ambiente frente a actividades que incumplan las regulaciones establecidas para la preservación de los recursos (Ley 99, 1993).

2.1.2.3 Decreto 948 de 1995.

Vela por el cuidado y protección atmosférica y del aire, controlando las emisiones contaminantes, para ello describe las principales actividades controladas, las normas que rigen las diferentes clasificaciones de actividades contaminantes y las

restricciones de recursos y materiales altamente nocivos al ambiente. Y rige la contaminación por emisiones de ruido (Samper et al., 1995).

2.1.2.4 Resolución 909 de 5 junio del 2008.

Define los estándares y normas que rigen las emisiones de fuentes fijas por actividades de algunas industrias altamente contaminantes, por ende, establece dichas actividades, sus procesos de acción contaminante y el compuesto que es generado y deberá ser monitoreado, como también los parámetros permitidos de emisiones contaminantes hacia la atmósfera de acuerdo al tipo de contaminante y la industria (Resolución 909, 2008).

2.1.3. Aprovechamiento energético mediante fuentes no convencionales.

2.1.3.1 Ley 697 de 2001

Declara el uso adecuado y racional de la energía como fundamento para garantizar el abastecimiento de energía eficiente de manera sostenible y amigable con el ambiente, fomentando así nuevas alternativas de generación de energía renovable. La promulgación, promoción y seguimiento al cumplimiento de la presente ley es del Ministerios de Minas y Energía, la cual mediante representación del estado establecerá las sanciones correspondientes derivadas al incumplimiento de las normas vigentes, como también establece los diferentes incentivos al uso racional de energía y de fuentes no convencionales mediante programas educativos y de investigación (Ley 697, 2001).

2.1.3.2 Decreto 3683 de 2003.

Expide la reglamentación que rige la Ley 697 de 2001 del uso racional de la energía priorizando la conservación del medio ambiente. Relaciona las obligaciones

y derechos de entidades prestadoras del servicio de energía y de consumidores del mismo. Establece la integración y finalidad de la creación de la Comisión intersectorial, como ente consultor y de apoyo para la ejecución de políticas, lineamientos, programas, investigaciones y seguimiento al uso energético (Decreto 3683, 2003).

2.1.3.3 Ley 1715 de 2014

Incentiva la integración de energías no convencionales principalmente renovables con factores de sostenibilidad ambiental y socioeconómica. Asigna las facultades del gobierno nacional, y los diferentes entes administrativos, autoridades y corporaciones que intervienen en la gestión de ejecución de la presente ley. Se expide el otorgamiento de incentivos por el desarrollo de iniciativas del uso racional de energía y alternativas no convencionales (Ley 1715, 2014).

2.1.3.4 Resolución CREG-066 2017

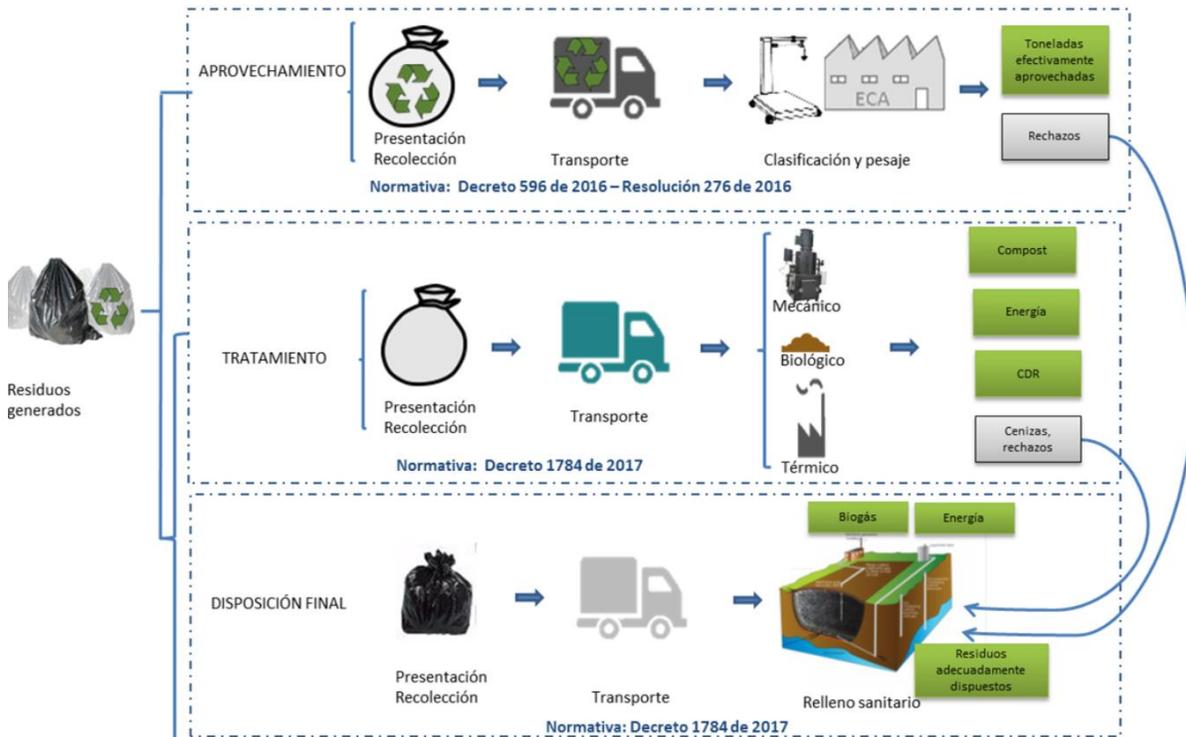
La Comisión de Regulación de Energía y Gas, vela por la justa competencia en el suministro del servicio público de gas, regulando el establecimiento de tarifas que sean económicamente eficientes y justas, garantizando la no existencia de monopolios y la prestación de servicios de calidad. El CREG tiene las facultades de establecer métodos de cálculo para la implantación de tarifas hasta que las compañías prestadoras del servicio sean suficientes como para asegurar que no existe dominio por parte de alguna en el mercado (Resolución CREG 066, 2017).

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Clasificación de residuos sólidos

Todo aquel material, compuesto y/o producto que ha culminado su tiempo de vida útil para el cual fue fabricado o extraído, se le denomina residuo sólido este pierde su valor económico inicial, quedando “obsoleto” y desechado. Para estos desechos puede disponerse de tres (3) acciones:

Figura 1. Acciones para la disposición de residuos sólidos



Fuente: (Ministerio de Vivienda, 2020).

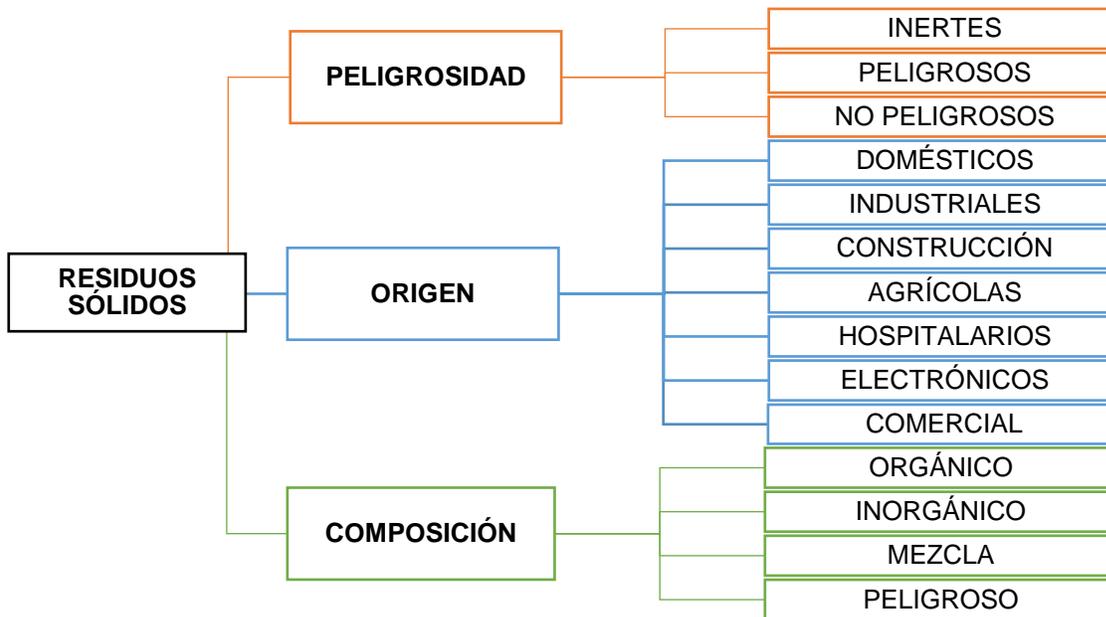
- Disposición final, que elimina ciertos residuos no aprovechables e inservibles, dirigidos a rellenos sanitarios, incineración, vertederos de cielo abierto, entre otros sistemas actualmente empleados.

- Tratamiento, que procesa los residuos para que sean adecuados para su uso energético, para reducir las sustancias peligrosas en su composición y facilitar su disposición final o rescatar sustancias de su composición que pueden ser aprovechables.

Aprovechamiento, que fomenta la reutilización de dichos residuos mediante la clasificación y reutilización, incorporándolos al ciclo productivo del sistema económico, es decir, se transformación genera nuevamente un valor económico y funcional, integrándolo al mercado (Ministerio de Vivienda, 2020).

La disposición final de los residuos sólidos depende del tipo de residuo según la clasificación y de la correcta gestión de este. Estos se pueden clasificar por la peligrosidad, su origen, y su composición, según la Ley 27314 Art.15 (Rivas, 2018).

Figura 2. Clasificación de los residuos sólidos.



Fuente. Autor

2.2.2. Relleno Sanitario

Es un sitio estratégicamente seleccionado, mediante un estudio y diseño de factibilidad para la operación del manejo controlado de la disposición final de residuos sólidos, con el fin de confinar y aislar los mismos en espacios reducidos para mitigar los daños, contaminantes y peligros que estos puedan representar para la salud humana, para esto se realizan actividades de recolección, disposición, compactación de los residuos y control de las emisiones de lixiviados y gases (UAESP, 2020).

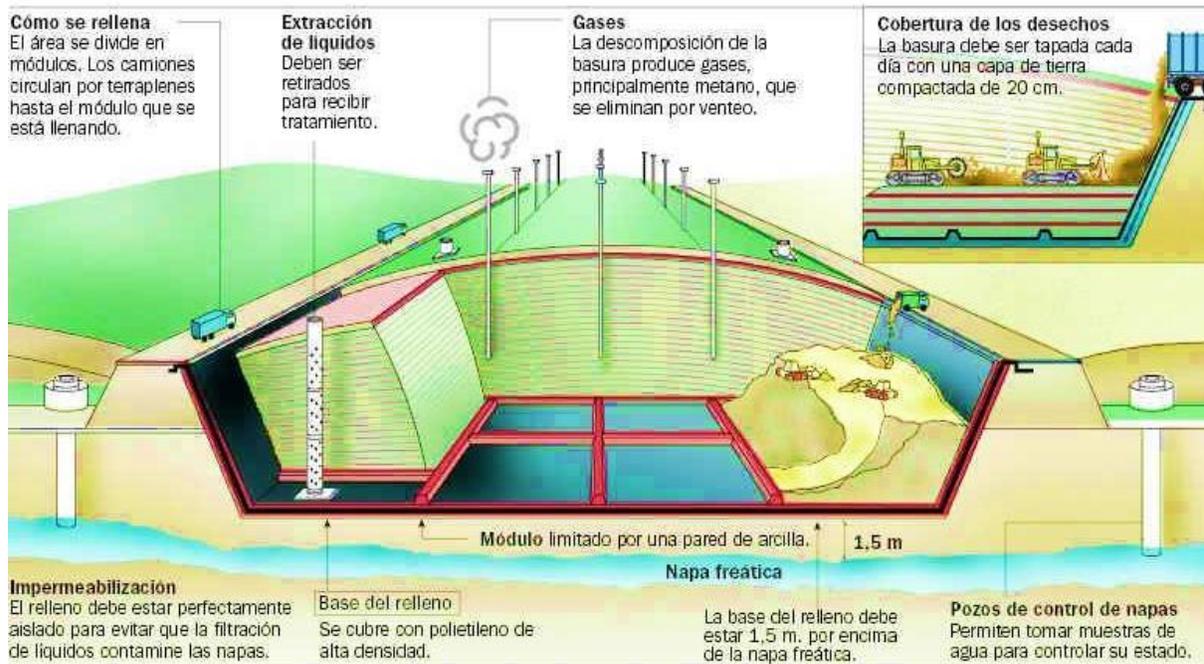
Los rellenos sanitarios, de acuerdo con el Art 87 del decreto 1713 de 2002, deben cumplir unas características básicas para su operación como, estar incluido dentro del POT bajo criterio de las autoridades ambientales, debe contar con las condiciones técnicas para realizar la disposición final de manera segura para el ambiente, de acuerdo a los presupuestos del territorio. El tiempo de vida útil debe encontrarse correlacionado con la cantidad de residuos proyectados a disponer en el sitio (Pastrana et al., 2002).

Algunas de las restricciones para la ubicación de un relleno sanitario son; distancia horizontal mínima de 1.000 m de cualquier zona urbana y de crecimiento urbano, Una distancia mínima de 500 m de cualquier fuente superficial hídrica, no deberá estar en áreas resguardadas ambientalmente, ni con fallas geológicas, asentamientos o propenso a asentamientos y una distancia de 3.000 m y 1.500 m de lugares donde operen aviones a turbina y aviones a pistón, respectivamente.

Para la selección final de la ubicación de un relleno sanitario, se contemplará y cumplirá la Ley 99 de 1993 y otras disposiciones vigentes (Pastrana et al., 2002).

Figura 3. *Funcionamiento de un Relleno Sanitario*

Cómo debe funcionar un relleno sanitario



Fuente. (Mardoja, 2017).

El funcionamiento general en un relleno sanitario consiste en la excavación de celdas para la disposición final de los residuos recolectados, que posteriormente son compactados al menor volumen posible y recubierto con una capa de tierra que también es compactada. Este debe contar con un sistema de extracción y tratamiento de líquidos lixiviados y gases, y una cubierta para evitar la filtración de aguas lluvia. La Figura 3, representa a groso modo el funcionamiento de un relleno sanitario (Molano, 2019).

2.2.3. Gases de efecto invernadero

El concepto general de efecto invernadero se basa en el paso de luz a la tierra y el almacenamiento de calor en tierra. El efecto invernadero es una manifestación natural que en esencia beneficia a la existencia humana y garantiza que el planeta Tierra tenga la temperatura adecuada que hace factible la vida. Su funcionamiento consiste en el aumento de la temperatura de la superficie terrestre a causa de un exceso de radiación solar acumulada en la tierra (Mikhaylov et al., 2020).

Inicialmente, se dirige la radiación solar hacia la tierra calentándola, posteriormente la tierra regresa dicha energía en forma de reflejo la cual es radiación infrarroja enviándola a la atmósfera. Aquí intervienen los gases de efecto invernadero, que retienen un aproximado de 62.5 % de la energía enviada a la atmósfera elevando la temperatura de la Tierra al no salir al espacio. En conclusión, los gases de efecto invernadero permiten que pase la radiación solar hacia la superficie terrestre, pero obstruyen el paso de vuelta de la radiación infrarroja hacia el espacio (Kweku et al., 2018).

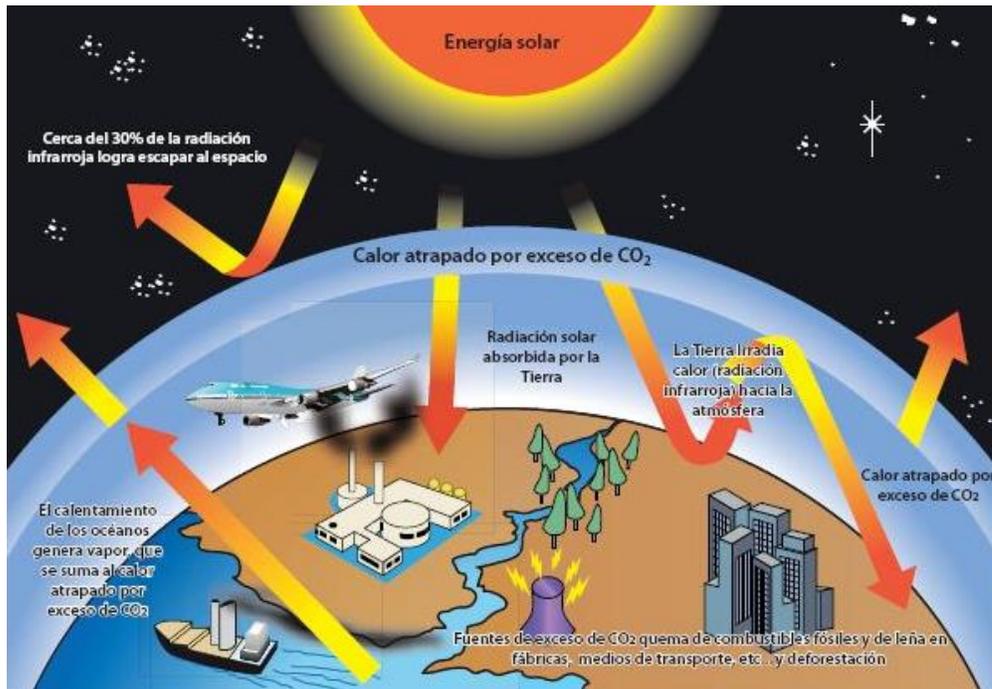
Este fenómeno es natural, ya que genera un balance energético en la temperatura haciendo el ambiente tolerable para los seres vivos. De no ser así, la temperatura sería excesivamente fría imposibilitando la vida.

Las consecuencias de este fenómeno se presentan cuando las actividades humanas generan una cantidad excesiva de emisiones de gases industriales, domésticos, químicos, incineración forestal, tráfico, entre otros, los cuales no salen a la atmósfera y se acumulan en la tierra recalentando la misma, pero debido a su exceso aumentan la temperatura del ambiente produciendo lo conocido como Calentamiento Global y cambio climático, que empieza a afectar el desarrollo tolerable

de la vida. Los principales gases que representan un problema mediante su alta producción son el CO₂ y el Metano (Gunnemyr, 2019).

Las principales consecuencias del desmedido aumento de la temperatura a causa de la producción no controlada de emisiones por actividades del ser humano podrían ser, temperaturas muy altas poco tolerables para los seres vivos, generación de incendios forestales, sequías de fuentes hídricas naturales, extinción de ecosistemas, deshielo de polos y hábitats fríos, lo cual haría imposible la vida de ciertas especies, aumento del nivel de mar, entre otras. Por ende, actualmente, se busca contrarrestar dichos fenómenos mediante la inclusión de fuentes renovables para la producción de energía (Matthews et al., 2017).

Figura 4. Efecto invernadero intensificado por acción humana.



Fuente. (Espinal, 2015)

ELABORADO POR: Oficina de
Investigaciones

REVISADO POR: Soporte al Sistema Integrado de Gestión
UTS

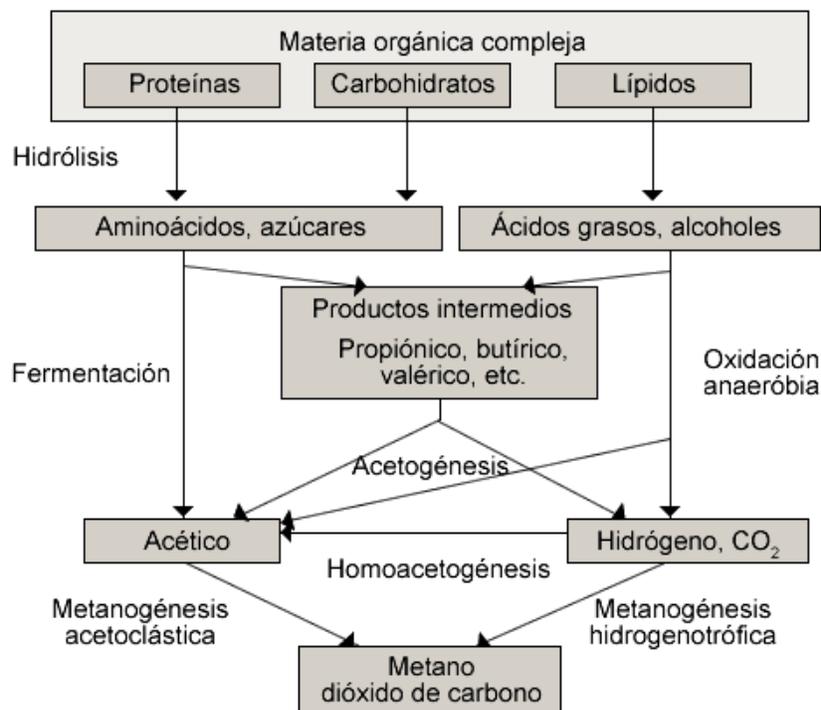
APROBADO POR: Jefe Oficina de Planeación
FECHA APROBACION: Noviembre de 2019

2.2.4. Ruta bioquímica del Biogás

El biogás, como su nombre indica, es un gas generado por la biodegradación de materia orgánica mediante la actividad de bacterias en un espacio carente de oxígeno, este es denominado un ambiente anaeróbico, algunos de sus compuestos son el Metano y el dióxido de carbono. Las principales fuentes son las actividades de generación de RSU, estiércol y heces, actividad agrícola, tratamiento de aguas servida, etc (Wang et al., 2019).

La ruta bioquímica está desarrollada mediante cuatro (4) fases; Hidrólisis, Fermentación, Acetogénesis y Metanogénesis.

Figura 5. Fases para la producción de Biogás



Fuente. (Pavlostathis & Giraldo-Gomez, 1991).

La hidrólisis, es un proceso químico donde las partículas del agua se separan en su composición que es hidrógeno y oxígeno generando un enlace químico (unión que genera un nuevo compuesto químico) con la materia orgánica compleja con la cual reacciona de acuerdo con sus macromoléculas, proteínas, carbohidratos y lípidos. La principal función es convertir los polímeros en los monómeros, es decir, de cadenas más largas a cadenas más cortas. Este proceso depende de la temperatura, del nivel de PH y de los componentes bioquímicos y tamaño del sustrato orgánico proporcionado para la digestión anaeróbica. La generación de azúcares, aminoácidos, alcoholes y ácidos grasos, que son reacciones de la etapa de hidrólisis, son consideradas reacciones estequiométricas (Wei et al., 2019).

En la etapa acidogénica se da la fermentación de las moléculas orgánicas resultantes de la etapa de hidrólisis generando compuestos para ser empleados por los microorganismos metanogénicos como acéticos ($\text{CH}_3\text{-COOH}$) e hidrógeno (H_2). En esta etapa el crecimiento de las bacterias es más acelerado debido al ambiente anaerobio generado por el consumo de oxígeno molecular. Así mismo, se comienza la formación de sustancias como ácido sulfhídrico (H_2S), dióxido de carbono (CO_2) y amoniacó (NH_3) (Varnero, 2011).

En la etapa de Acetogénesis, mediante las bacterias acetogénicas resultantes de la fase acidogénica se convierten algunos organismos como el etanol, compuestos aromáticos y grasos volátiles en compuestos más simples como acetato e hidrógeno, mientras que otros son procesados directamente por los sustratos metanogénicos. En esta etapa se liberan sustancias como dióxido de carbono (CO_2) e hidrógeno (H_2) (Wei et al., 2019).

Y finalmente, en la etapa metanogénica se da la generación de metano donde los microorganismos archaeas anaerobias estrictas usan el CO_2 como aceptor de electrones y se da la formación del CH_4 . Existen dos clases de microorganismos metanógenos para la producción de metano, los realizados mediante degradación de CH_3COOH , que también generan dióxido de carbono denominados acetoclásticos y los hidrogenotrofos que de los resultantes de las etapas anteriores producen metano y agua (Varnero, 2011).

2.2.5. Proceso de purificación de Biogás

Se entiende del proceso de purificación de Biogás, la remoción de sustancias contaminantes que impiden el aprovechamiento de este para la generación de energía, la principal sustancia a eliminar es el sulfuro de hidrógeno (H_2S) el cual es altamente tóxico y corrosivo (principal causa de la lluvia ácida) lo cual afecta su utilidad al no ser viable su paso en estructuras metálicas como tuberías dificultando el proceso de generación de energía. Otro contaminante son los siloxanos los cuales contienen silicio (Dávila & Dávila-del-Carpio, 2020).

En la Tabla 1, se correlaciona algunas sustancias con su respectiva necesidad de ser removidas de acuerdo con la aplicación final del biogás.

Tabla 1.

Eliminación de sustancias según uso de biogás.

	H ₂ S	CO ₂	Agua	Siloxanos	Compuestos halogenados
Caldera de vapor	✓	X	x	✓✓	x
Motores de cogeneración	✓✓	X	✓✓	✓✓	✓✓
Microturbinas	✓	X	✓✓	✓✓	✓✓
Producción de H ₂ /Metanol	✓✓	X	✓✓	✓✓	✓✓
Compatible para vehículos	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓
Inyección en la red de gas natural	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓	✓✓

Nota: x eliminación no necesaria; ✓ Eliminación recomendable; ✓✓ Eliminación necesaria
Nota. Obtenido de (Condorchem, 2020b).

La técnica para la purificación de biogás dependerá de la o las sustancias que requieren ser removidas y en función del aprovechamiento que se le espera dar al biogás. Algunas de las técnicas empleadas para la purificación de biogás son:

- **Contralavado con agua a presión:** También conocido como limpieza húmeda, es un proceso funcional para la eliminación de productos resultantes, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico, que por su diferencia de polaridad con el metano quedan obstruidos. Se entiende que a mayor cantidad de agua es proporcional a la cantidad de CO₂ disuelto. Esta es una de las técnicas más comunes debido a su simplicidad y economía, además de tener una baja pérdida de metano (2%). Una de sus desventajas es el alto crecimiento bacteriano en la torre de lavado que puede generar obstrucción (Leitón, 2015).

Ecuación 1. *Formula química de purificación de Biogás*

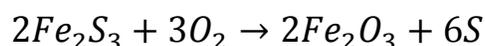
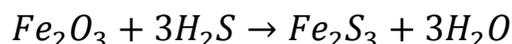
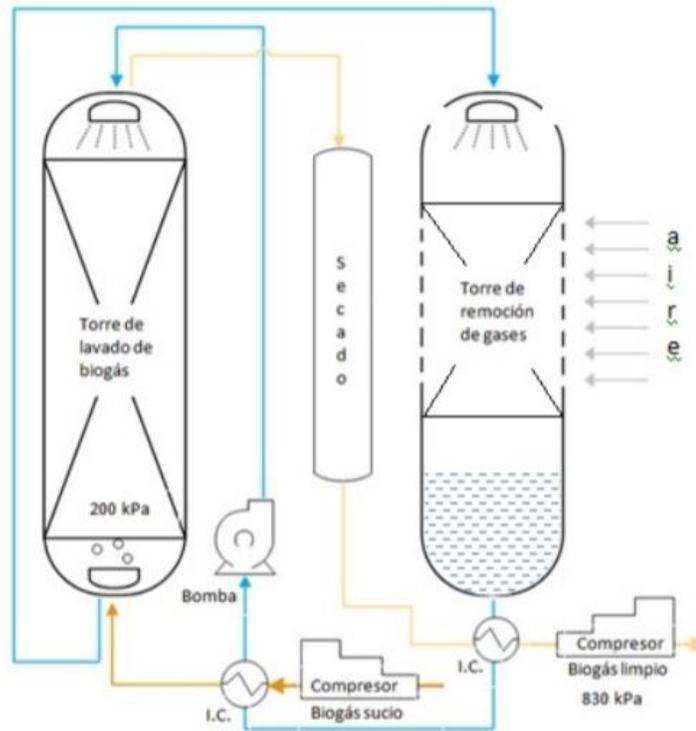


Figura 6. Técnica de purificación de Biogás con agua a presión.



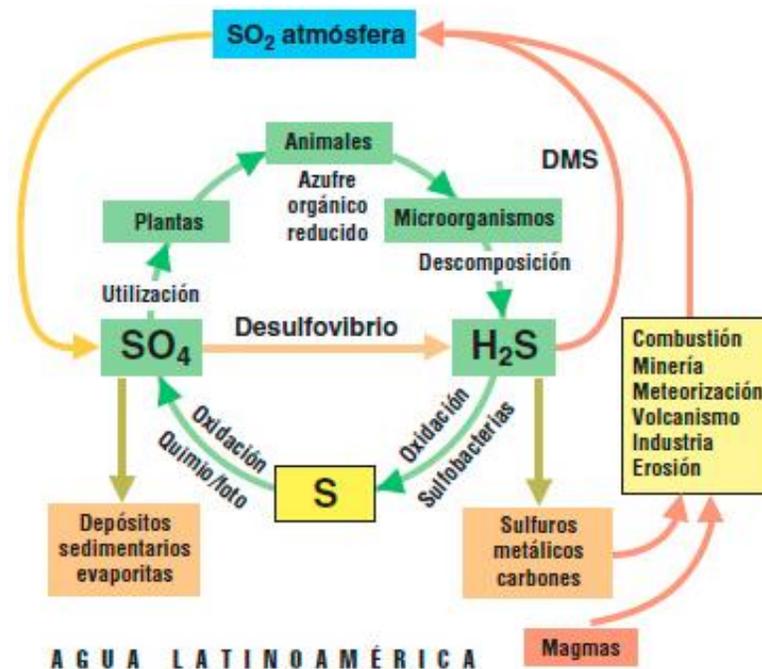
Fuente. Adaptado (Leitón, 2015).

El funcionamiento de esta técnica consiste en poner en contracorriente el agua con el gas a limpiar en una de las torres, para generar el desplazamiento por polaridad de CO_2 Y H_2S .

- **Desulfuración biológica:** También es conocida como biodesulfuración, en esta técnica se integran microorganismos aerobios (*Starkeya*, *Methylobacterium*, *Sulfolobus*) y anaerobios (*Thiocapsa*, *Allochromatium*, *Rhodopseudomonas*, *Chlorobium*, *Rhodovulum*) que remueven compuestos de azufre mediante la oxidación de estos, reduciéndolos a sustancias más sencillas como S o SO_4^{-2} .

De esta manera se saca el mayor provecho del CH₄ purificado al tener la mayor remoción de la sustancia más toxica y corrosiva (H₂S) y el CO₂, que entorpece el proceso de aprovechamiento energético. La desulfuración biológica puede llevarse a cabo por microaireación o por biofiltro percolador (Ortega et al., 2015).

Figura 7. Ciclo de desulfuración biológica

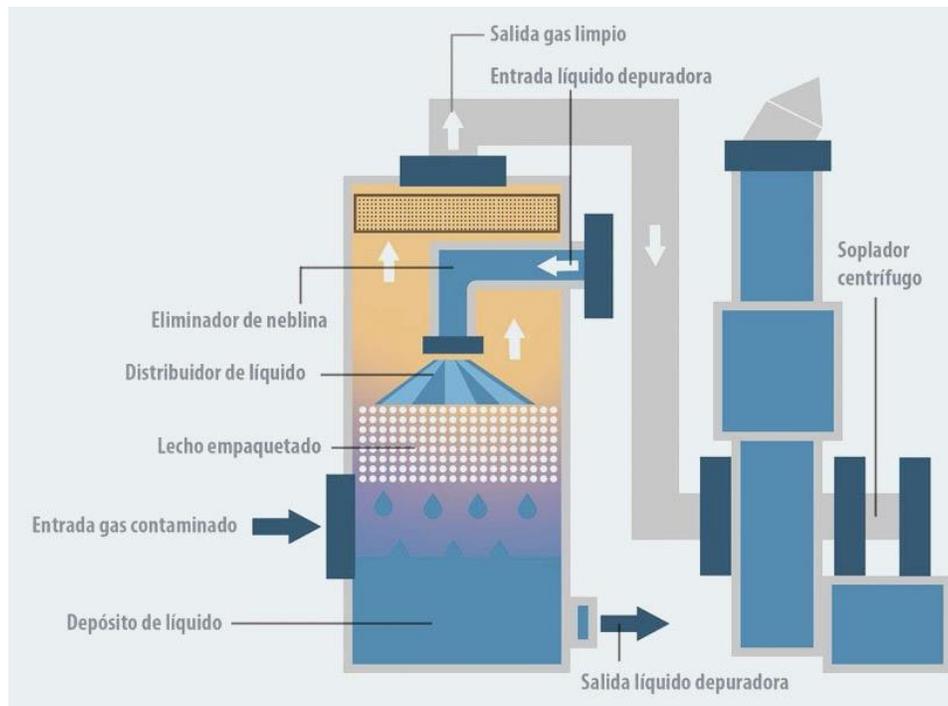


Fuente. Adaptado (Pérez & Villa, 2005).

- Refrigeración o secado: Es necesaria la depuración de vapor de agua y dióxido de carbono debido a que estos disminuyen el poder calorífico del biogás. Mediante un sistema de enfriamiento en una máquina de refrigeración y un intercambiador de calor, se condensa el agua/humedad contenida en la corriente del biogás debido a las bajas temperaturas. Esta tecnología es instalada previo a la etapa del generador o caldera.

- **Adsorción con carbón activado:** Esta técnica es útil para la eliminación de siloxanos presentes en el biogás, pero para ello se hace necesario que previamente se haya realizado el proceso de secado, debido a que el carbón activado es funcional frente a un biogás con un 50 % o menos de humedad. Su proceso funciona como un sistema de filtro y un punto de drenaje, reteniendo sustancias que se requiere que sean retiradas del medio. Su principal ventaja es la alta capacidad de remoción de sustancias, pero requiere una alta inversión en mantenimientos frecuentes por agotamiento del carbón activado, requiriendo la recuperación o reactivación del mismo, adicionalmente no elimina los contaminantes, por ende, requiere de otro proceso que disponga de los residuos del proceso de adsorción (Carriazo et al., 2010).
- **Lavado químico mediante *scrubbers*:** Se basa en la reacción química de los componentes contaminantes incluidos en el biogás en corriente al flujo del aire con componentes líquidos o gaseosos en contracorriente.
El biogás es lavado en contracorriente con un líquido absorbente o líquido lavador el cual dependerá del contaminante que requiere ser removido (Condorchem, 2020a).

Figura 8. Sistema de lavado mediante scrubbers

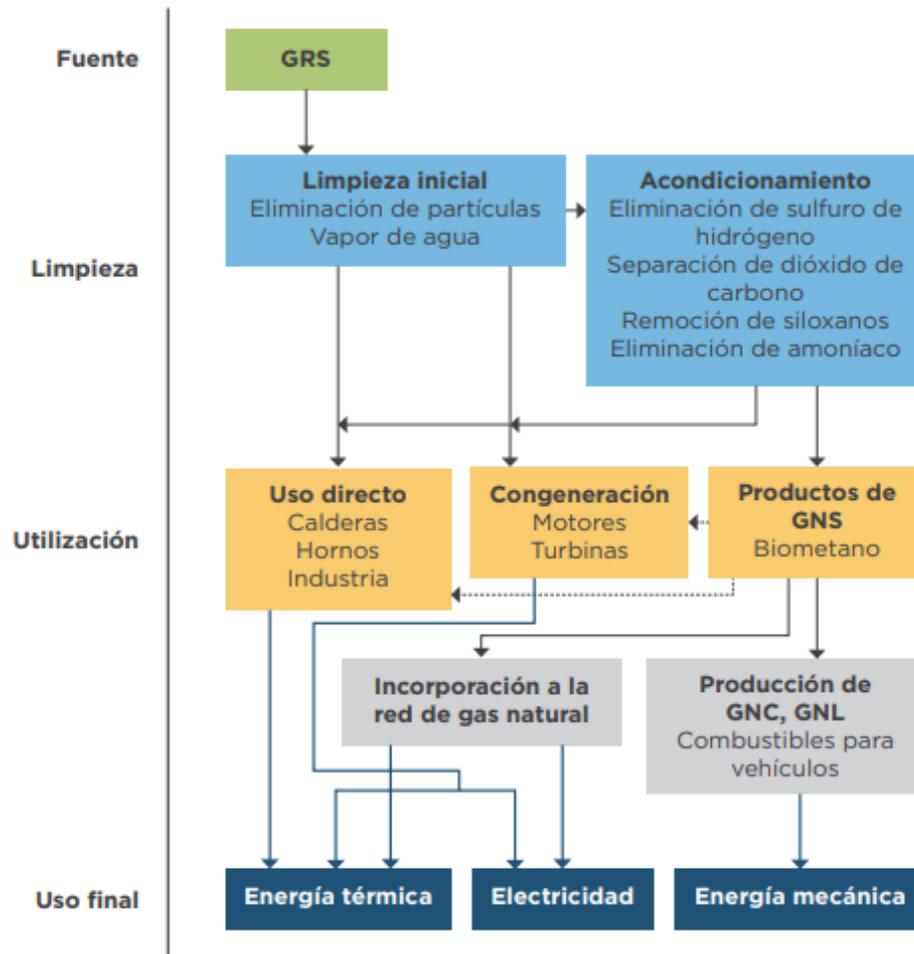


Fuente. Adaptado (Condorchem, 2020a).

2.2.6. Producción energética a través de Biogás

Los principales usos de biogás resultante de la generación de residuos sólidos, son como fuente de energía eléctrica y productor de combustible altamente calorífico. Principalmente, es relevante tener en cuenta que para dicho aprovechamiento energético es necesaria la limpieza o purificación del biogás de acuerdo al producto final del que se pretende disponer, con el fin de remover los sustratos abrasivos con los elementos de estas tecnologías, como los motores y tuberías (Blanco et al., 2017).

Figura 9. Tratamiento y aprovechamiento del biogás



Fuente. Adaptado (Blanco et al., 2017).

2.2.7. Búsqueda de información académica

La calidad de la información recopilada para los procesos de investigación académica depende de la eficiente búsqueda de la información, para lo que es indispensable identificar la literatura pertinente, confiable y relevante de las bases

de datos. Conforme a lo anterior, es necesario obtener habilidades de búsqueda como:

- Replanteamiento del tema de investigación
- Formulación de la pregunta de la investigación
- Estrategia de búsqueda (enunciado y términos de búsqueda)
- Identificación de fuentes pertinentes
- Identificación de factores filtro para refinar la búsqueda
- Evaluación y análisis de los resultados
- Uso de la información relevante

Las bases de datos académicas cuentan con un sinnúmero de información útil, pero depende de la discriminación realizada en la búsqueda de esta, donde se logra conseguir documentación congruente y de relevancia a la ciencia en estudio (Martínez & Cué, 2012).

2.2.8. Base de datos académica

Las bases de datos son un sistema de información que recolecta y almacena de manera organizada datos, su organización suele ser sistémica y actualmente es de manera electrónica. En el ámbito académico, las bases de datos son esenciales para la adquisición de conocimiento a la vanguardia y como fuente para el desarrollo de investigaciones (Groom et al., 2016).

Las bases de datos académicas conservan proyectos, investigaciones y otros tipos de trabajos expresados en artículos, actas, libros, capítulos, proyectos, etc., que se han ido realizando a través del tiempo, estos son de gran utilidad para los investigadores, quienes pueden conocer si la investigación emergente ya fue implementada, los resultados obtenidos o antecedentes significativos que pueden

ser recurso para nuevas investigaciones. Usualmente, estos cuentan con un sistema organizado por área de estudio al que se clasifica cada documento, su estructura suele contener un sistema de búsqueda, página de resultados, clasificación y registros (Freire, 2020).

Las bases de datos cuentan con dos (2) entradas, inicialmente la entrada de documentos, que son los registros de artículos, libros, actas y proyectos que un usuario publica y se desea conservar, es decir, en esta entrada se alimenta la base de datos. La segunda entrada consiste en las búsquedas que un usuario realiza con el fin de encontrar algún tipo de documento que se correlacione con su búsqueda y sea fuente. Teniendo estas dos entradas, las bases de datos tienen la función de almacenar los documentos recopilados y entrelazar las características de búsqueda con los datos almacenados, para finalmente entregar como salida documentos con antecedentes relevantes (Codina, 2020).

Figura 10. Estructura de bases de datos académicas



Fuente. Autor

Algunas de las bases de datos más reconocidas y confiables para investigaciones académicas son: EBSCO, SAGE, REDALYC, SCOPUS, SCIELO, DOAJ, SIDALC, REDIB, Google Academic.

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION

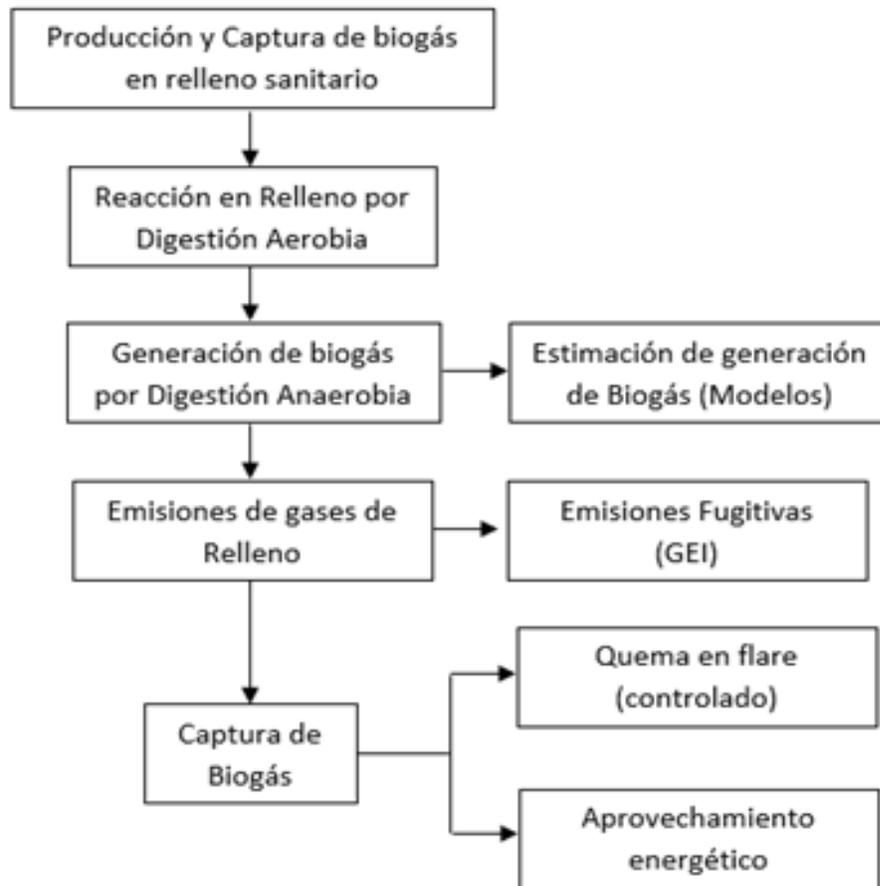
En el desarrollo de la presente investigación, se empleó un tipo de investigación explicativo, que busca proporcionar información del fenómeno en estudio que es la producción y captura de biogás en relleno sanitario, explicando la relación causa-efecto entre variables influyentes, yendo más allá de la descripción del fenómeno a la comprensión del porqué de la manifestación de los diferentes eventos. Así mismo, se realizó bajo un enfoque cualitativo ya que analiza los significados de las realidades de los datos extraídos, es decir, es de carácter interpretativo y se basa en la inmersión de las referencias existentes, investigando las causas que dieron origen a un determinado resultado.

Se determinó el método analítico como el método de investigación, dado que busca interpretar la naturaleza del objeto de estudio para comprender su esencia y establecer nuevas teorías o conclusiones generales que justifican su proceder. Este método se implementó acompañado de técnicas documentales, que se recopilaron información de fuentes previas como libros, proyectos, investigaciones, artículos científicos y otros soportes que contienen una estrecha relación con la temática en estudio del presente proyecto.

En el cumplimiento del alcance de los objetivos propuestos en el presente trabajo, se desarrolló a partir de tres fases; Revisión del estado del arte, Análisis de la información y Conclusiones del análisis, los cuales se enfocaron en cuatro ejes principales para entender el proceso de producción y recolección del biogás generado en relleno sanitario:

- Reacción de relleno sanitario al proceso aeróbico de los RSU dispuestos.
- Estimación de la generación del biogás producido en relleno por medio del proceso anaeróbico.
- Emisiones de biogás fugitivas y capturadas producidas en relleno sanitario.
- Aprovechamiento energético del biogás y valorización energética de los RSU.

Figura 11. *Proceso investigativo*



Fuente. Autor

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

4.1. Fase 1: Revisión del Estado del Arte

Se realizó una Revisión bibliográfica sobre el estado del arte que permitió identificar los fundamentos teóricos y desarrollos tecnológicos en la producción, tratamiento y aprovechamiento de biogás en relleno sanitario. Para lo anterior, se realizó la búsqueda de investigación en bases de datos académicas como: Scielo, Elsevier, Redalyc, Google Academic y repositorios internacionales, teniendo en cuenta los cuartiles Q1 y Q4, y adicionalmente los criterios de investigación de la Tabla 2.

Tabla 2.

Criterios de investigación para la revisión bibliográfica

Criterios de investigación				
Eje temático	Reacción de relleno sanitario al proceso aeróbico de los RSU dispuestos	Estimación de la generación del biogás producido en relleno por medio del proceso anaeróbico.	Emisiones de biogás fugitivas capturadas en relleno sanitario	Aprovechamiento energético de biogás y valorización energética de los RSU.
Antigüedad	2016-2021	2016-2021	2016-2021	2016-2021
Palabras de búsqueda	Proceso aeróbico	Cálculo de generación de biogás	Proceso de captura del biogás	Valoración energética de residuos sólidos
	Reacción de residuos sólidos urbanos	Cantidad de biogás generada en rellenos sanitarios	Emisiones fugitivas de biogás	Aprovechamiento energético del biogás
	Proceso de residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios	Modelos matemáticos de la producción de biogás	Sistemas de captura de biogás en relleno sanitario	Residuos sólidos como fuente de energía

	Descomposición de residuos sólidos en relleno sanitario	Cálculo de emisiones de biogás en relleno sanitario	de tratamiento de biogás	Captación y de Biogás como fuente de energía renovable
Áreas y temática	Ciencia	Ciencia	Ciencia	Ciencia
	Ambiental	Ambiental	Ambiental	Ambiental
	Bioquímica	Bioquímica	Bioquímica	Bioquímica
	Ingeniería	Ingeniería	Ingeniería	Ingeniería
Tipo de documento	Artículos	Artículos	Artículos	Artículos
	Informe de caso	Informe de caso	Informe de caso	Informe de caso
	Tesis	Tesis	Tesis	Tesis
	Proyectos investigativos	Proyectos investigativos	Proyectos investigativos	Proyectos investigativos

Nota. Elaboración propia

4.2. Fase 2: Análisis de la Información

Posterior a la clasificación y selección de la documentación fuente para el desarrollo de la presente monografía, se realizó una examinación de la información con el propósito de extraer conclusiones y premisas fundamentales para la comprensión del comportamiento de los rellenos sanitarios bajo la reacción del proceso aeróbico de los RSU, la justificación del proceso de captura y aprovechamiento del biogás en rellenos sanitarios con sus respectivas técnicas alternativas y, la identificación de los diferentes modelos de cálculo para la estimación de la generación de biogás junto a la valorización energética.

4.3. Fase 3: Conclusiones del Análisis.

A partir del análisis bibliográfico realizado se establecieron respuestas al proceso de investigación, concluyendo premisas bajo una revisión narrativa que estableció cómo funciona el proceso aeróbico de los RSU dispuestos en rellenos sanitarios y

sus reacciones, así mismo se concluyó qué métodos matemáticos son los más utilizados en el mundo para la estimación del biogás producido en relleno sanitario, cuáles son las emisiones fugitivas y capturadas en el proceso, y cuáles son las alternativas de aprovechamiento energético del biogás de mayor reconocimiento.

5. RESULTADOS

El desarrollo del presente trabajo de grado se organizó de acuerdo con los cuatro ejes temáticos planteados y cada uno fue desarrollado mediante tres fases: Revisión del estado del arte, Análisis de la información y Conclusiones del análisis.

5.1. Recopilación Bibliográfica

5.1.1. Clasificación de la documentación disponible y asociada

De la búsqueda realizada se consideraron 69 documentos entre estos Artículos y tesis con referencia al tema central de la monografía “PRODUCCIÓN Y CAPTURA DE BIOGÁS EN RELLENO SANITARIO” los cuales fueron finalmente clasificados, previo a la selección, según los ejes temáticos planteados en la metodología investigativa.

Tabla 3.

Resultados de búsqueda según su fuente literaria.

Tipo de documento	Cantidad
Artículos	62
Tesis / proyectos de grado	7
Congresos - Conferencias	1

Nota. Elaboración propia

Tabla 4.
Resultados de búsqueda según el eje temático.

Temática	Cantidad
Reacción de RSU en rellenos sanitarios	29
Estimación de generación de biogás en R.S.	14
Captura de biogás producido en R.S.	17
Aprovechamiento energético del biogás	9
TOTAL	69

Nota. Elaboración propia

5.1.2. Selección de la documentación

A partir, de la búsqueda realizada se obtuvieron y se seleccionaron los siguientes documentos como base para el desarrollo de la presente investigación teórica basado en la semejanza de los criterios de búsqueda de palabras clave, rango de antigüedad, temática y aprobación de lectura por parte del investigador.

Tabla 5.
Resultados de la revisión bibliográfica

Eje temático	Investigación	Autor	Palabras claves
Reacción de relleno sanitario al proceso aeróbico de los RSU dispuestos.	Emisión de gases de efecto invernadero en dos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México	Laura Verónica Díaz Archundia, Otoniel Buenrostro Delgado, María del Consuelo Mañón Salas, María del Consuelo Hernández Berriel	Sitio de disposición final; relleno sanitario; tiradero a cielo abierto; metano; residuos sólidos urbanos
	Emisiones de biogas producidas en rellenos sanitarios	Camargo, Y. & Vélez, A	Relleno Sanitario; Biogás; Residuos Sólidos; Materia Orgánica; Gestión Integral de Residuos

	Modelización matemática de la producción de biogás en vertederos de residuos sólidos urbanos	Antonio Ferrando	Lecuona	Modelo matemático; vertedero; biogás; residuos
Estimación de la generación del biogás producido en relleno por medio del proceso anaeróbico.	Aplicación de las metodologías EPA, mexicano e IPCC para la estimación de biogás, caso de estudio relleno sanitario Doña Juana	Elizarova Martínez, Rodríguez	Urrego Pablo Miranda	Rellenos sanitarios; biogás; salud pública; metodologías; residuos sólidos urbanos
	Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos	Vera-Romero Estrada-Jaramillo Melitón, Reyes José, Soriano Agustina	Iván, Martínez-Ortiz	Rellenos sanitarios; biogás; energía eléctrica; metodologías; residuos sólidos urbanos
	<i>Applying guidance for methane emission estimation for landfills</i>	Heijo Jacobs	Scharff *, Joeri	Quantification of methane; emisión; Landfills
Emisiones de biogás fugitivas y capturadas en relleno sanitario.	Producción y captación de biogás en vertedero para su empleo en usos no convencionales	Juan José Magariños, la Macorra García, Pedro Rincón	José Graña de Arévalo	Biogás, vertedero; RSU; SOFC; MCFC; gas natural; pila de combustible.
	<i>Current landfill technologies and the prospects of developing landfill-based biogas generators for African countries</i>	Prince, Awuku Ayisi - Tiyamike, Ngonda - Tiyamike, Ngonda		Landfill-based biogas generator; Waste management; Africa; Waste to Energy; Municipal solid waste
	Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios	Daniel Arriaza	Álvaro López	Captación de biogás; Aprovechamiento de biogás; Rellenos sanitarios.

	Análisis de biogás de residuos (vertederos) aplicados a la Generación de Energía	Anderson Rangel, Marques, Novaes, Santos, Márcio Zamoti, Soares, Cesar Borba.	José Filipe Lucas dos Moreira, Bruno	Biogás; Gas Residual; Residuos Sólidos Municipales; Electricidad; Vertedero; Generación de vapor.
Aprovechamiento energético del biogás y valorización energética de los RSU.	Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico	Gabriel Blanco, Estela Santalla, Verónica Córdoba, Alberto Levy		
	Aprovechamiento energético del biogás a partir de los residuales de la Empresa Refinadora de Aceite de Santiago de Cuba "ERASOL	Dinza Tejera, Daniel, Recio Recio, Ángel Amado Pacheco Torres*, Leonardo**, Martínez Salazar, Javier		Aguas residuales industriales; biogás; aprovechamiento energético.

Nota. Elaboración propia

5.2. Análisis de la Información

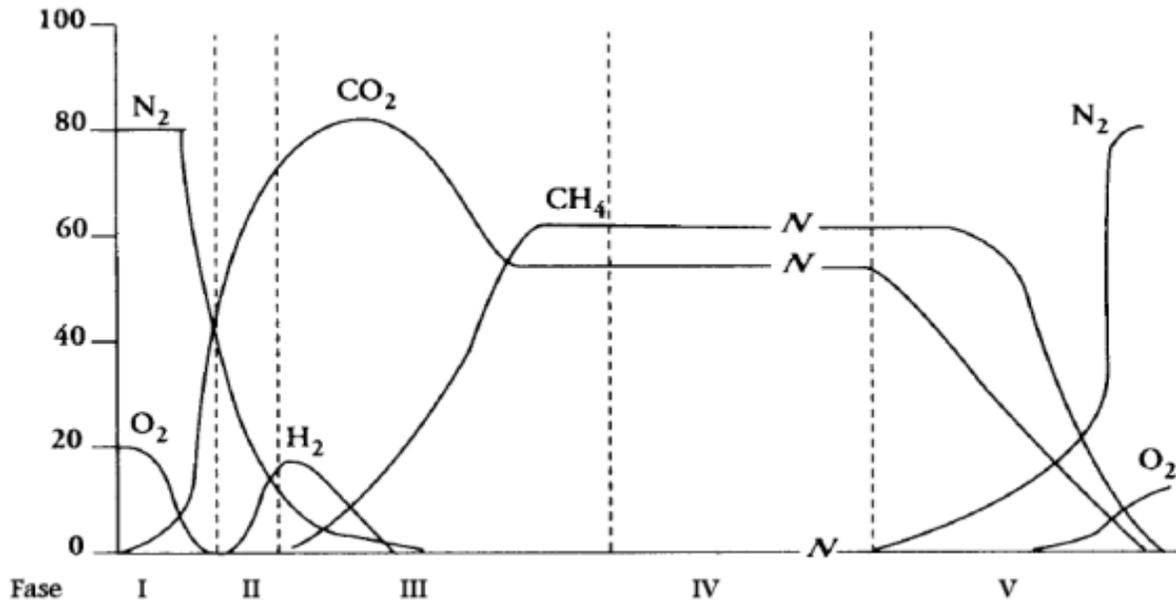
Teniendo en cuenta la revisión bibliográfica se desarrollan los ejes temáticos según el proceso investigativo, en el cual se determinan las causas de la reacción del relleno sanitario por consecuencia de la digestión aerobia de los RSU, la estimación y generación de biogás por los procesos anaerobios junto a sus respectivos modelos de cálculo que permitan un posible aprovechamiento energético de las emisiones de biogás.

5.2.1. Reacción de relleno sanitario al proceso aeróbico de los RSU dispuestos.

Los rellenos sanitarios son una alternativa que surge de la producción de residuos sólidos urbanos que representan un alto riesgo para la salud pública. A pesar de ser una alternativa válida para mitigar el impacto directo a la salud humana al corto plazo, sigue representando una problemática al largo plazo por el impacto medioambiental de los componentes que representan una fuente de emisión de contaminantes atmosféricos entre los que se encuentran los lixiviados y el biogás, que terminan siendo perjudiciales para la calidad del aire y, por ende, la salud pública (Díaz-Archundia et al., 2017).

La reacción de estos residuos sólidos en los rellenos sanitarios es un proceso de descomposición que ocurre mediante diversas fases según las condiciones del medio (temperatura, oxígeno, tipo de residuos y tiempo de vida del relleno sanitario), a partir de esto se pueden determinar cinco fases:

Figura 12. Fases de la reacción de RSU en Rellenos sanitarios.



Fuente. Adaptado (Tchobanoglous, 1996).

La primera fase es la descomposición de los residuos de rápida biodegradación por la presencia de oxígeno generando dióxido de carbono, posteriormente, en la segunda fase atribuida a la fermentación de la materia resultante de la descomposición de los residuos inicialmente dispuestos, resultan ácidos orgánicos, reducción del pH y aumento de la generación de metales en el agua.

En la tercera fase, resulta la acción de organismos generadores de metano, dando como resultado la generación de este gas, en la cuarta etapa Metanogénica, se genera la producción más alta de CH_4 y finalmente en la quinta etapa correspondiente a la estabilización se reduce la producción de metano y la aparición

de otros gases generadores del conocido como aire atmosférico (Camargo & Vélez, 2009).

Las cinco fases anteriores se resumen a tres procesos de descomposición de manera correlacional, donde la fase 1 y 2, comprenden el proceso de descomposición aerobia, la fase 3 y 4 comprenden la descomposición anaerobia y la fase 5 corresponde al proceso de lixiviación. En la tabla 6 se puede observar un resumen de la condiciones y resultados de cada proceso de la descomposición de los RSU en rellenos sanitarios como sitio de disposición final (Camargo & Vélez, 2009).

Tabla 6.

Procesos de descomposición de RSU.

Procesos	Descomposición aerobia	Descomposición anaerobia	Lixiviación
Requisitos	Oxígeno disponible, menos humedad	Falta de oxígeno, más humedad	Gran volumen de agua pluvial, cubierta permeable
Temperatura	50-70° c	35-50° c	
Reacciones	Oxidación, nitrificación	Reducción, desnitrificación	Disolución, hidrólisis
Consecuencias	Mineralización, esponjamiento	Consolidación, solidificación	Aumento de permeabilidad, acumulación de contaminantes
Productos	CO ₂ , H ₂ O, productos de oxidación	Ácidos orgánicos, CH ₄ , CO ₂ , NH ₃ , H ₂ S lixiviado	Lixiviado

Nota. Elaborado a partir de (Köfalusi & Aguilar, 2010).

5.2.2. Estimación de la generación del biogás producido en relleno por medio del proceso anaeróbico.

La estimación de la generación de biogás resulta fundamental para la evaluación del impacto de los rellenos sanitarios y la adopción de medidas de control que

reduzcan los gases emitidos o la inclusión de alternativas que mitiguen las repercusiones que generan en el ambiente. A pesar de su importancia es un proceso de alta complejidad debido a la diversidad de factores influyentes y su variación espacial y temporal. Los rellenos sanitarios cumplen dos etapas, la primera es la de funcionamiento, es decir, cuando los RSU son depositados en este para su descomposición, en esta etapa se produce la mayor cantidad de metano. La segunda etapa es la clausura, que corresponde al cierre del sitio porque alcanza su ocupación total de residuos, a pesar de esto continúa la generación de emisiones de biogás por varios años (Andrade et al., 2018).

Se han establecido una variedad de cálculos teóricos y genéricos para estimar la cantidad de biogás que genera un relleno sanitario, a pesar de esto, para contar con una mayor exactitud es necesario contemplar que la producción de emisiones de biogás varía de acuerdo con las condiciones del ambiente, el tiempo de uso del sitio de disposición final y la composición de la materia dispuesta.

Se recopilieron cuatro investigaciones con modelos de cálculo diferente para conocer los métodos de empleabilidad y las variables consideradas en cada uno e identificar las diferencias existentes entre los modelos.

Tabla 7.

Modelos de cálculo de la producción de biogás en rellenos sanitarios.

Investigación	Autor	País	Año	Disponible	Modelo
Modelización matemática de la producción de biogás en vertederos de residuos sólidos urbanos	Antonio Lecuona Ferrando	España	2019	(Lecuona, 2019)	LandGEM
Aplicación de las metodologías EPA, mexicano e IPCC para	Elizarova Urrego Martínez, Juan	Colombia	2016	(Urrego-Martínez & Rodríguez-	IPCC

Investigación	Autor	País	Año	Disponible	Modelo
la estimación de biogás, caso de estudio relleno sanitario Doña Juana	Pablo Rodríguez Miranda			Miranda, 2016)	
Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos	Vera Romero Ivána, Estrada-Jaramillo Melitón, Martínez Reyes José, Ortiz-Soriano Agustina	México	2014	(Vera-Romero et al., 2015).	MEXICANO
.Applying guidance for methane emission estimation for landfills	Heijo Scharff *, Joeri Jacobs	The Netherlands	2016	(Scharff & Jacobs, 2016)	EPER GERMANY

Nota. Elaboración propia

5.2.2.1 LandGEM

Es un programa automatizado mediante una interfaz de M. Excel para el cálculo de emisiones de metano, dióxido de carbono y otros compuestos. Esta herramienta trae consigo unas condiciones ambientales predeterminadas que pueden ser modificadas de acuerdo con las condiciones reales del relleno sanitario en estudio. La estructura del modelo cuenta con nueve hojas de un Libro Excel (Lecuona, 2019).

Tabla 8.

Descripción de la estructura del modelo LandGEM

Nombre de la hoja de trabajo	Función
Introducción	Contiene una descripción general del modelo y notas importantes sobre el uso de LandGEM
Entradas de usuario	Permite a los usuarios proporcionar las características del vertedero, determinar los parámetros del modelo, seleccionar hasta cuatro gases o contaminantes (gas total del vertedero, metano, dióxido de carbono, NMOCS y 46 contaminantes del aire) e ingresar tasas de aceptación de desechos
Contaminantes	Permite a los usuarios editar las concentraciones de contaminantes y los pesos moleculares de los contaminantes existentes y agregar hasta 10 nuevos contaminantes

Revisión de entrada	Permite a los usuarios revisar e imprimir las entradas del modelo
Metano	Calcula estimaciones de emisiones de metano utilizando la ecuación de tasa de descomposición de primer orden
Resultados	Muestra estimaciones de emisiones tabulares para hasta cuatro gases/contaminantes (seleccionados en la hoja de trabajo de entradas del usuario) en mega gramos por año, metros cúbicos por año y la elección del usuario de una tercera unidad de medida (pies cúbicos promedio por minuto, pies cúbicos por año, o toneladas cortas por año)
Gráficos	Muestra estimaciones gráficas de emisiones para hasta cuatro gases/contaminantes (selección en la hoja de trabajo de entrada del usuario) en mega gramos por año, metros cúbicos por año y la elección del usuario de una tercera unidad de medida (seleccionada en la hoja de trabajo de resultados)
Inventario	Muestra estimaciones de emisiones tabulares para todos los gases/contaminantes para un solo año especificado por los usuarios
Informe	Permite a los usuarios revisar e imprimir las entradas y salidas del modelo en un informe resumido

Nota. Elaborado a partir de (Lecuona, 2019).

Los datos de entrada que principalmente son tenidos en cuenta para el uso de esta herramienta son: el nombre de identificación del relleno sanitario, el año de apertura, el año estimado de clausura (también puede ser calculado por el mismo modelo) y la cantidad estimada de RSU que pueden ser depositados en el sitio. Así mismo, es necesario establecer una serie de parámetros que pueden ser lo estándar del modelo o modificados acorde a investigaciones de campo o datos por fuente verídicas (Lecuona, 2019).

En la Figura 13, se pueden observar los parámetros del Modelo: La ratio de generación de metano (K) depende de la humedad de los residuos, los nutrientes disponibles para los microorganismos, el pH de la masa de los RSU y la temperatura. La capacidad de generación de metano (L0) depende de la clase de composición de los residuos. La concentración de compuestos orgánicos sin metano (NMOC) depende de los tipos de residuo y la reacción de su

descomposición. Y finalmente, el contenido de metano usualmente es establecido sobre el 50 %, esto puede modificarse de acuerdo a estudios de campo que lo sustente en tanto no se encuentren fuera del rango de 40 – 60 % (Lecuona, 2019).

Figura 13. Parámetros del Modelo LandGEM

Fuente. Adaptado (Lecuona, 2019).

La ecuación utilizada para el cálculo de la producción de metano es:

Ecuación 2. Cálculo de la producción de metano mediante el modelo LandGEM

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k \cdot L_0 \cdot \frac{Mi}{10} \cdot e^{-kti,j}$$

Fuente. Adaptado (Lecuona, 2019).

Donde

Q_{CH_4} : generación estimada de metano (m³/año)

i: incremento de 1 año

n: año del cálculo-año inicial de aceptación de residuos

j: incremento de 0,1 año

k: constante de generación de metano (0,04) (año⁻¹)

Lo: capacidad potencial de generación de metano (100) (m³ CH₄/tonelada RSU)

Mi: masa de residuos en la sección i (tonelada RSU)

Ti,j: edad de la masa de residuos depositada en la sección j en e laño i (año⁻¹)

5.2.2.2 IPCC

En este modelo se realiza la estimación en función de la descomposición de primer orden considerando que el carbono se degrada para la formación de CH₄.

El principal dato de entrada de este modelo es la cantidad de materia orgánica degradable (DOC_m) (Urrego-Martínez & Rodríguez-Miranda, 2016).

La ecuación utilizada para el cálculo de la producción de metano mediante el modelo IPCC es:

Ecuación 3. *Cálculo de la producción de metano mediante el modelo IPCC*

$$Emisiones\ de\ CH_4 = \left[\sum_x CH_4\ generado_{x,T} - R_T \right] \cdot (1 - OX_T)$$

Fuente. Adaptado (Urrego-Martínez & Rodríguez-Miranda, 2016).

Donde

CH₄: cantidad de metano durante el año T

T: año de inventario

X: tipo de residuo

R_T: metano recuperado en el año

O_{XT} : factor de oxidación durante el año T

5.2.2.3 Mexicano

Este modelo lleva dos actualizaciones desde 2003, año en que fue desarrollado, por SCS *Engineers*. Los datos principales de entrada de este modelo son: año de apertura del relleno sanitario, año de clausura, cantidades de disposición de residuos anual, la precipitación promedio anual y la eficiencia del medio de recolección.

Los parámetros de Generación de metano y la Generación potencial, varían de acuerdo a la precipitación promedio anual. El índice de la generación de metano (K) depende del período de vida de los residuos, mediante este aumente la generación de CH₄ aumenta. El potencial de generación de metano (L₀) depende de la clase de composición de los residuos (Vera-Romero et al., 2015).

La ecuación empleada es de degradación de primer orden donde se comprende que el período considerado es de un año (desde la disposición de residuos hasta el inicio de la generación de biogás) y que por unidad de RSU después del año la producción decrece exponencialmente.

La ecuación utilizada para el cálculo de la producción de metano mediante el modelo mexicano 2.0 es:

Ecuación 4. *Cálculo de la producción de metano mediante el modelo Mexicano*

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2kL_0 \left[\frac{Mi}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF)(F)$$

Fuente. Adaptado (Vera-Romero et al., 2015).

Donde:

QLFG= flujo de biogás máximo esperado (m^3 /año),

i= incremento en tiempo de 1 año,

n= año del cálculo (año inicial de disposición de residuos),

j= incremento de tiempo en 0.1 años,

k= índice de generación de metano (1/año),

L_0 = generación potencial de metano (m^3 /Mg),

M_i = masa de residuos dispuestos en el año i (Mg),

t_{ij} = edad de la sección j de la masa de residuos M_i dispuestas en el año i (años decimales),

MCF= factor de corrección de metano,

F= factor de ajuste por incendios (Vera-Romero et al., 2015).

5.2.2.4 Eper Germany

Es un modelo matemático de orden cero que tiene en cuenta los residuos tanto domésticos como comerciales que en algunos espacios son separados, de considerarse sólo los de carácter doméstico, se reduce la estimación considerablemente. A través de los estudios de cálculo realizados se ha podido estimar que la liberación de las emisiones de un año fue de carácter instantánea de acuerdo a la cantidad de residuos vertidos en el mismo determinado año y si la cantidad de residuos que se disponen en el sitio es constante el resultado será el mismo que para un modelo de degradación de primer orden (Scharff & Jacobs, 2016).

Ecuación 5. *Cálculo de la producción de metano mediante el modelo EPER Germany*

$$Me = M * BDC * BDC_f * F * D * C$$

Fuente. Adaptado (Scharff & Jacobs, 2016).

Donde:

Me= cantidad de emisión difusa de metano [Mg CH₄ . y⁻¹]

M= cantidad anual de residuos depositados [Mg waste . y⁻¹]

BDC= Proporción de carbono biodegradable 0.15 [MgC . Mg waste⁻¹]

BDC_f= Proporción de carbono biodegradable convertido

F= Factor de cálculo de carbono convertido en CH₄ [Mg CH₄. MgC⁻¹]

D= Eficiencia de recolección (desgasificación activa 0,4 – sin recuperación 0,9 – recuperación activa 0,1)

C= Concentración de metano (50 %)

5.2.3. Emisiones de biogás fugitivas y capturadas producidas en relleno sanitario.

La disposición de RSU en rellenos sanitario genera un proceso de descomposición bioquímico del que resulta una serie de gases contaminantes entre los cuales se encuentra el biogás. Como alternativa para disminuir el impacto de este gas a la atmósfera se busca realizar la captura de las emisiones de dicho gas para posteriormente ser utilizado como complemento de combustibles para la generación de energía, reduciendo las emisiones de metano a la atmósfera y mitigando el cambio climático. Para esto es necesario el diseño de sistemas de captura de gases en los rellenos sanitarios, los cuales tienen como objetivo controlar

las emisiones fugitivas, controlar los olores, proteger las aguas subterráneas y garantizar la recuperación de energía (Ayisi et al., 2022).

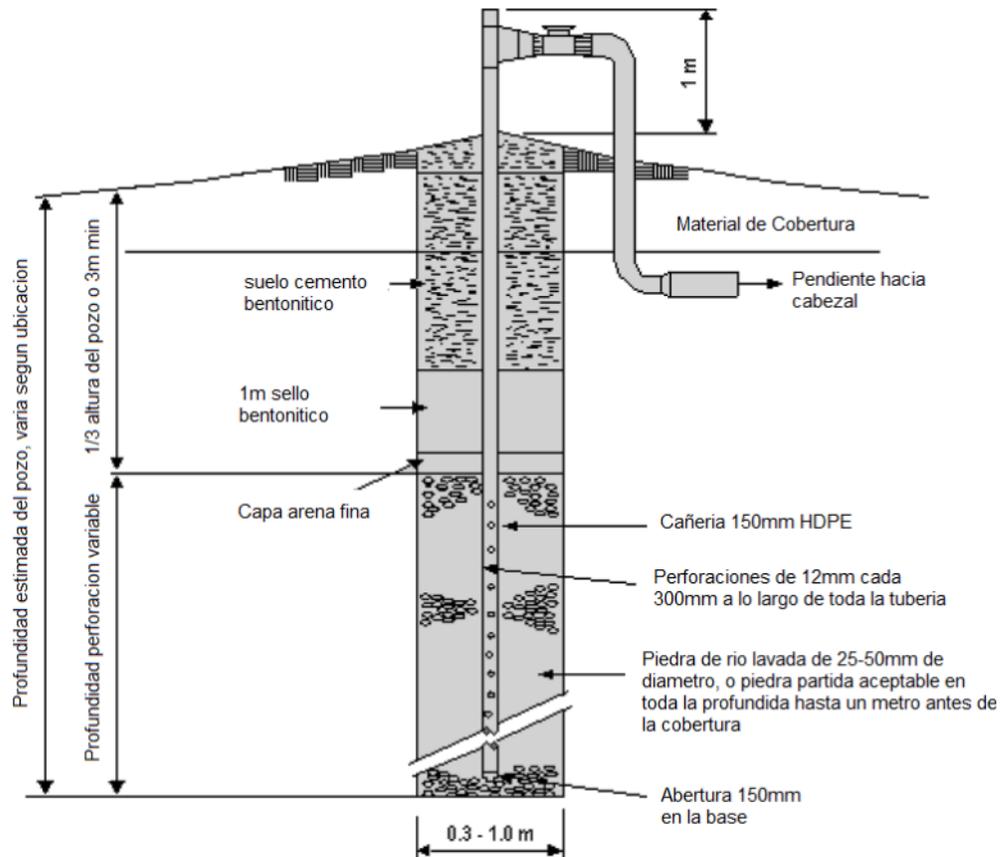
Los sistemas de captura y extracción de biogás son de alta importancia en el proceso para el aprovechamiento energético, porque mediante estos se logra cuantificar la cantidad de biogás real generado y el caudal recuperado por el sistema. Donde su eficiencia y alta tasa de captación depende de los métodos empleados para la extracción y del nivel de impermeabilización de la cobertura (definitiva) y el sellado. Adicionalmente, es relevante considerar la precisión en la medición con la que cuenta el sistema, para eso se suelen utilizar elementos como las válvulas, caudalímetros y otros medidores (Magariños, 2015).

Los principales métodos de colección utilizados son:

5.2.3.1 Pozos de extracción

Son pozos verticales con tubería vertical, horizontal y mixta que se introducen hasta el fondo del vertedero, por ende, es utilizado en rellenos que cuentan como más de 12 metros de profundidad, suele ser el método más común y pueden ser tanto sistemas pasivos como activos. Para el control del flujo de biogás de cada pozo se instalan válvulas y un cabezal para el muestreo del gas capturado (López Arriaza, 2016).

Figura 14. Comparativo pozos activos y pasivos como sistema de captación de biogás



Fuente. Adaptado (González, 2014).

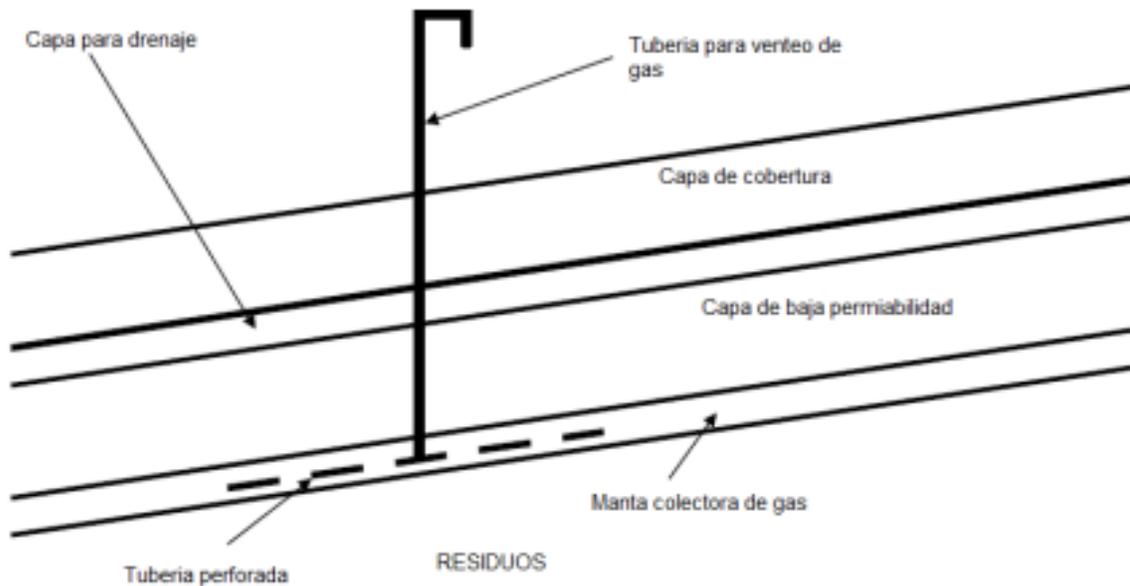
La extracción activa es un proceso que consiste en forzar la salida del biogás mediante un soplador generando un vacío dentro de los pozos, mientras que el pasivo es instalado y sólo controla la salida del biogás al exterior.

5.2.3.2 Manta

Se encuentra construida en arena o en grava situado debajo de la capa de barrera impermeable superior, este sistema es idóneo para evitar la acumulación en

exceso de presión bajo la capa de permeabilidad del sistema de cobertura, aunque son menos eficientes debido a que a diferencia de los pozos no controlan ni previene las emisiones fugitivas del biogás fuera del sistema de captación (González, 2014).

Figura 15. Diseño de sistema de captación de biogás mediante manta

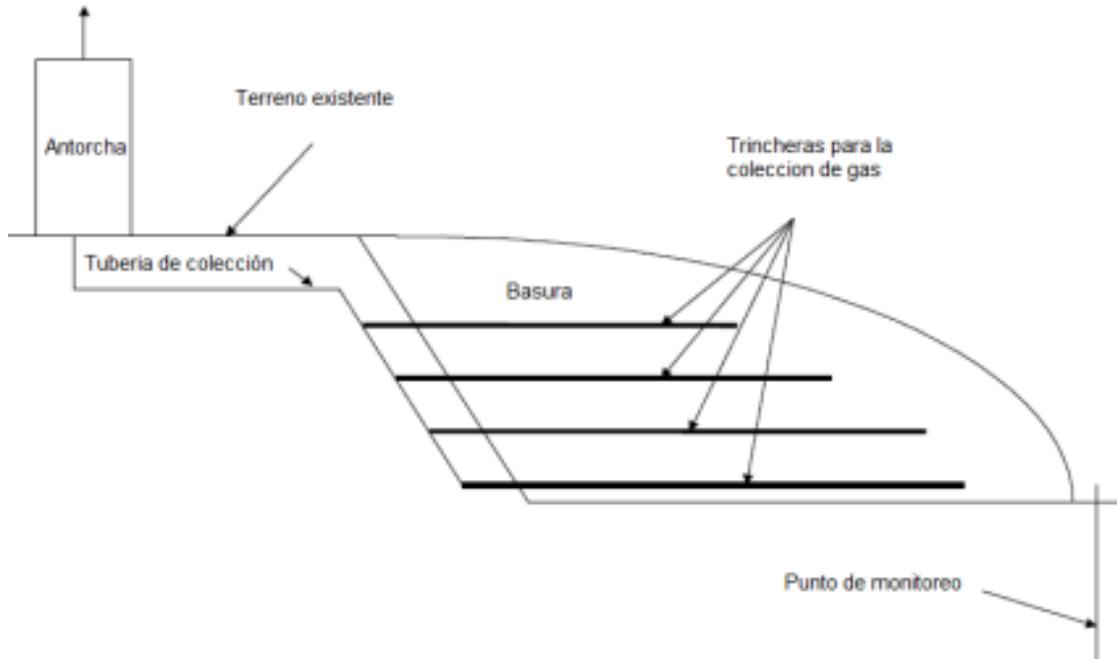


Fuente. Adaptado (González, 2014).

5.2.3.3 Trincheras

Son adecuados para rellenos con menos de 12 metros de profundidad, por ende, son conocidos por su captación por superficie y es un método de colección horizontal. Básicamente, son excavaciones dentro de los residuos de manera horizontal que son recubiertos por un geotextil, un material granular como filtración y un tubo perforado para mejorar el flujo del gas. Las zanjas se encuentran ubicadas de manera paralela entre unas y otras sin interconectarse, en el extremo de cada zanja se encuentra una tubería de colección general (González, 2014).

Figura 16. *Diseño de sistema de captación de biogás mediante trincheras*



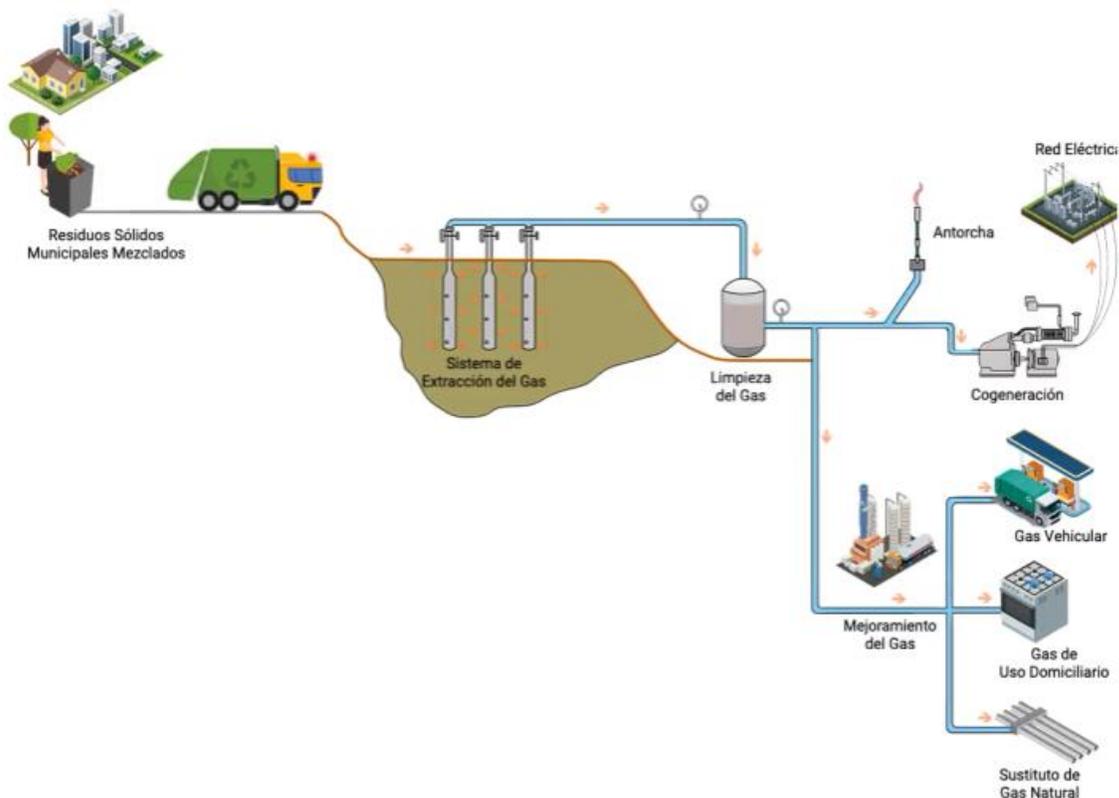
Fuente. Adaptado (González, 2014).

5.2.4. Aprovechamiento energético del biogás y valorización energética de los RSU.

La valorización energética de los RSU es un proceso que busca darle una finalidad útil a los residuos dispuestos en los rellenos que no cuentan con posibilidades de ser reciclados, reutilizados o de compostear, estos son sometidos a tratamientos para ser procesados, clasificándolos, reduciendo su volumen y siendo extraídos de estos la energía contenida proveniente de sus componentes y el resultante de la reacción con el medio, siendo funcional para una acción particular dentro de la economía (Tejera et al., 2015).

El biogás como fuente de energía renovable tiene diferentes usos finales, como, por ejemplo: combustible fósil para el uso vehicular, gas natural para el uso doméstico, como generador para red eléctrica, entre otros. En la figura 18 se puede observar el proceso y algunos resultantes del aprovechamiento del biogás generado en relleno sanitario (González, 2014).

Figura 18. Proceso de aprovechamiento energético del biogás



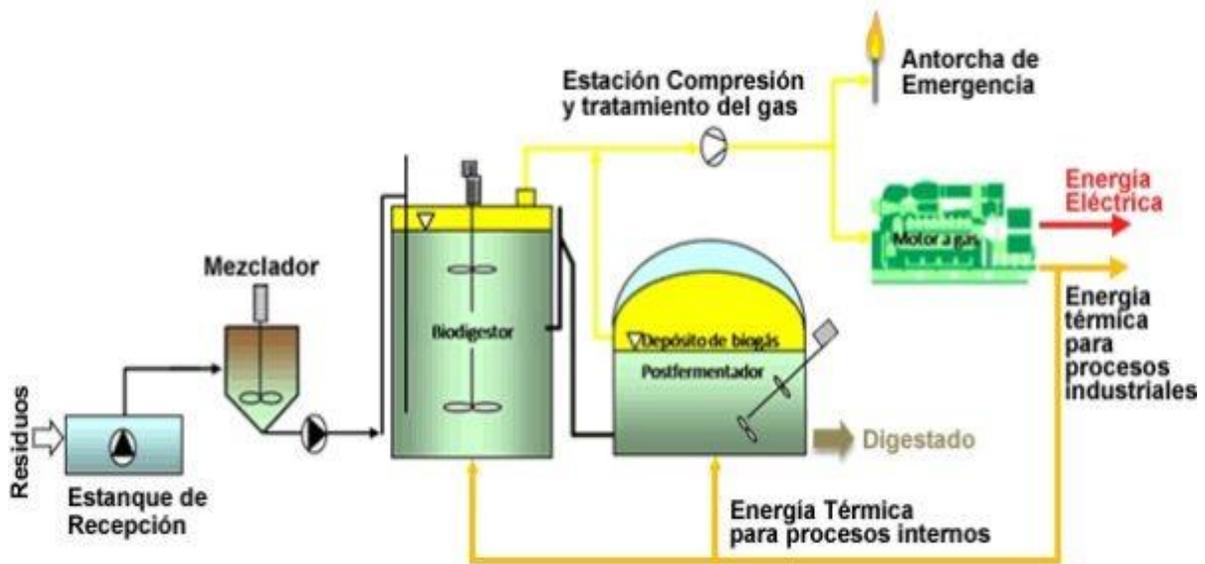
Fuente. Adaptado (Arcadis, 2021).

Algunas alternativas para procesar el biogás para la producción energética son mediante la turbina de gas, turbina de vapor, motor de combustión interna y otras

aún en desarrollo y adopción son mediante motores de ciclo Rankine y celdas de combustible.

- **Motor de combustión interna:** De las anteriores tecnologías, el motor de combustión interna es de los más utilizados por su eficiencia y relación de costos, que hace más factible su integración en rellenos de menor escala. Este sistema requiere de un previo tratamiento del biogás para eliminar sustancias que son corrosivas y que dificultan la combustión (Verhelst et al., 2019)

Figura 19. *Proceso de generación de energía eléctrica con motor de combustión interna.*



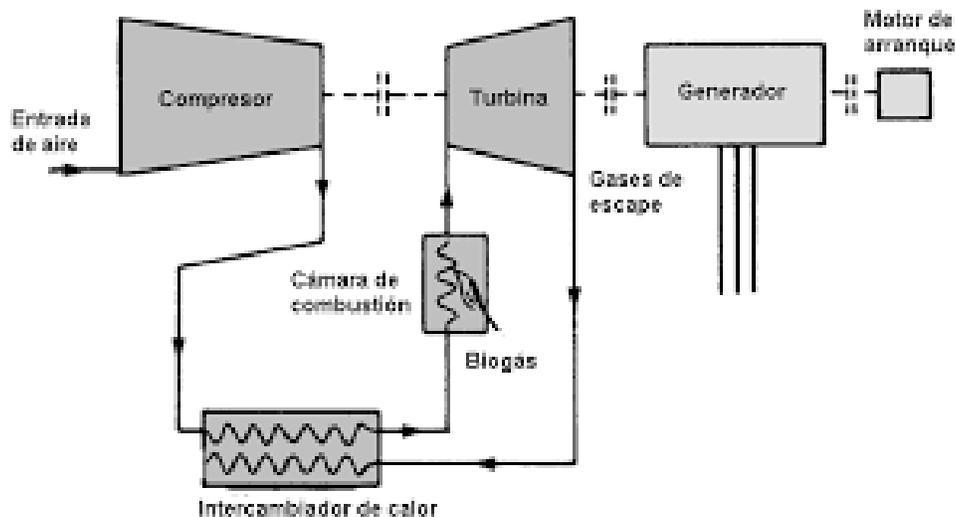
Fuente. Adaptado (Marimar, 2019).

En el caso de los Rellenos sanitarios, naturalmente mediante proceso anaeróbico es producido el biogás, el cual debe ser captado mediante tuberías ubicadas entre las capas del relleno, para posteriormente ser transportado directamente a la

estación de compresión y tratamiento del gas e inyectarlo al motor para la generación de energía

- Turbina de gas: Utilizadas en sitios de disposición final de RSU de amplia escala, trabaja con altos niveles de H_2S y bajos de CH_4 , lo que lo hace flexible a la adaptación de las características del biogás. Cuenta con un bajo coste de mantenimiento ya que por su movimiento rotativo no existe rozamiento entre superficies sólidas. El proceso se desarrolla de acuerdo al Ciclo Bayton, donde inicialmente ingresa el aire al compresor y al ser comprimido se conduce a la Cámara de combustión que opera a alta presión para que el aire sea calentado y dirigido a la turbina, donde se expande el aire y es extraída la energía mecánica que acciona el generador eléctrico, una parte de esta energía es utilizada para gestionar el mismo proceso en la etapa del compresor (Blanco et al., 2017).

Figura 20. Turbina de gas según Ciclo Bayton



Fuente. Adaptado (Bustamante, 2016).

- **Celdas de combustible:** Mediante el uso de esta técnica, la energía química es transformada en energía eléctrica sin necesidad de una previa transformación a energía mecánica, lo que garantiza un proceso con cero emisiones a diferencia de otros procesos convencionales. Esta técnica requiere de la purificación del biogás para someter el resultante a la obtención de H₂ el cual alimenta las celdas de combustible, para esto se realiza un proceso electroquímico dando como producto agua sin un contacto entre hidrógeno y oxígeno (Kipling & Laurel, 2013).

Los tipos de pilas de combustibles varían de acuerdo al electrolito utilizado, entre las cuales están: las poliméricas (PEMFC), alcalinas (ACF), de ácido fosfórico (PAFC), carbonatos fundidos (MCFC), óxidos sólidos (SOFC) y de metanol directo (DMFC), la Tabla 9 muestre algunos atributos de cada uno.

Tabla 9.

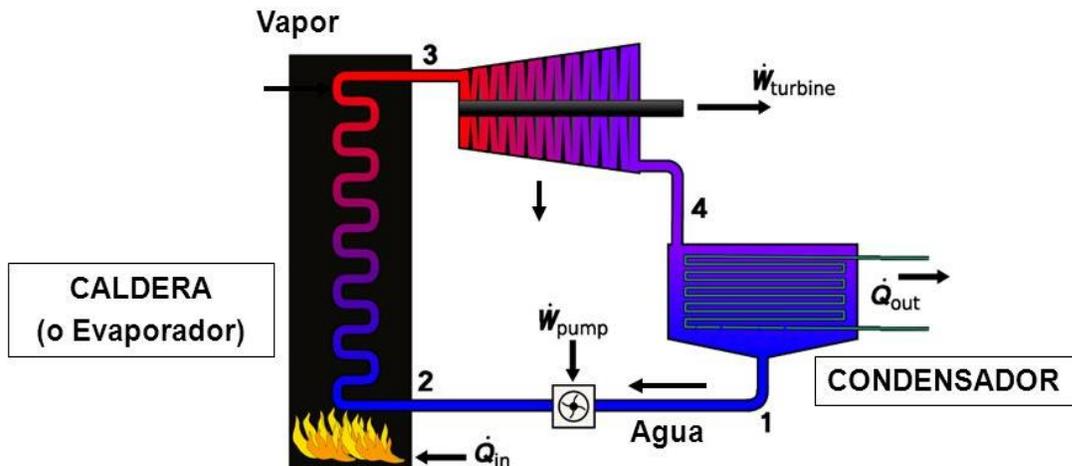
Tipos de pila de combustible

	Electrolito	Temperatura	Combustible	Ventajas	Aplicaciones
PEMFC	Membrana de polímero sólido	60- 806C	Hidrógeno	Baja temperatura. Baja corrosión y mantenimiento	Transporte y equipos portátiles
AFC	Solución alcalina	100- 120 6C	Hidrógeno	Mayor eficiencia	Espaciales
PAFC	Acido fosfórico	200- 250 6C	Hidrógeno Metano	Acepta a 1% de co	Generación eléctrica
MCFC	Carbonatos fundidos	600- 7006C	Metano	Reformado interno	Generación eléctrica
SOFC	Material cerámico	soo- 1200 ec	Metano	Reformado interno	Generación eléctrica
DMFC	Membrana de polímero	50- 120 ec	Metanol	No necesita reformado del combustible	Equipos portátiles

Nota. Elaborado a partir de (Condorchem, 2020b).

- Ciclo Rankine: Este consta de 4 etapas y su funcionamiento se da mediante una turbina de vapor, inicialmente se realiza un bombeo de baja a alta presión, posteriormente el fluido entra en la caldera recalentándose hasta convertirse en vapor para luego ser expandido mediante a la turbina, en esta etapa se disminuye la temperatura y la presión, y finalmente el vapor ingresa al condensador donde toma estado líquido generando nuevamente el bombeo para repetir el ciclo (Bianchini & Santana, 2015).

Figura 21. Ciclo Rankine



Fuente. Adaptado (Oriol, 2019)

5.3. Conclusiones Analíticas

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que son dispuestos en rellenos sanitarios cumplen un proceso de descomposición que genera principalmente lixiviados y biogás, esto gracias a las condiciones del medio que promueven los procesos bioquímicos. Dichos resultantes representan una materia contaminante que pone en riesgo la integridad ambiental y de la salud humana, por ende, es de importancia

el adecuado tratamiento de los productos, no sólo en cuanto a la disminución de emisiones sino el aprovechamiento de estos.

La aplicación de modelos para la estimación de la producción de biogás en rellenos sanitarios facilita la evaluación del impacto de cada sitio de disposición final y la posibilidad de calcular de manera más exacta el potencial de energía que estas emisiones representan para su aprovechamiento y la mitigación de las afecciones ambientales. Actualmente existe una amplia variedad de técnicas alternativas para la captura y el procesamiento de biogás, este aprovechamiento depende de la integración de alternativas y el compromiso social de la sociedad por mitigar el impacto ocasionado a raíz del consumismo.

6. CONCLUSIONES

Dentro del proceso de crecimiento poblacional y desarrollo socio-económico de una región se desencadenan múltiples consecuencias no favorables para algunos ámbitos, como es el caso del aspecto socio-ambiental generado por la industrialización, consumismo y progreso económico, esto representado en el aumento desmedido en la generación de residuos sólidos Urbanos (RSU) que se traduce en un alto riesgo para la salud pública en el corto plazo y una problemática ambiental a largo plazo, debido a los contaminantes desencadenantes, convirtiéndose en un reto de desarrollo socio-ambiental para las autoridades locales desde su control y tratamiento.

De las reacciones del relleno sanitario, se puede concluir que la principal reacción biológica es la descomposición de la materia orgánica depositada, produciendo una serie de gases y líquidos lixiviados mediante un proceso anaerobio (sin oxígeno presente) o aerobio (oxígeno presente), de acuerdo a las condiciones. En cuanto a las reacciones físicas se destaca los asentamientos producto de la compactación y descomposición de la materia orgánica, y el desplazamiento de líquidos en suelo y subsuelo del relleno. De las reacciones químicas, se priorizan las que generan un alto riesgo directo, como es la producción de biogás el cual se expande en el interior del relleno entre espacios vacíos representado un riesgo explosivo si no se controla.

A partir de la revisión bibliográfica, se puede considerar que algunos de los principales métodos de cálculo implementados para la estimación de la producción de biogás en rellenos sanitarios son el método; LandGEM, IPCC, MEXICANO y el EPER GERMANY, resaltando las diferencias en su implementación y valoración de acuerdo con las condiciones geográficas y sociales del sitio de aplicación. Estas

herramientas son de mucha ayuda para realizar proyecciones de la generación de biogás en un relleno sanitario y el potencial energético que representa.

Los sistemas de captura de biogás tienen como objetivo controlar las emisiones fugitivas, controlar los olores, proteger las aguas subterráneas y garantizar la recuperación de energía, mediante el tratamiento de purificación de los productos contaminantes. Todo relleno sanitario debe contar con un proceso de captura de biogás y otros lixiviados, manifestándose como una acción socialmente responsable. Algunos de los principales métodos de captura de biogás son los pozos de extracción, mantas, trincheras, entre otros métodos de captura adaptados a la capacidad de generación de biogás del relleno sanitario.

Los rellenos sanitarios representan una problemática si no se cuenta con unos procesos sistemáticos de aprovechamiento que pueda brindar opciones sostenibles, funcionales y renovables, generando una nueva oportunidad para el cuidado ambiental. Los principales usos de biogás generados por los residuos son fuente de energía eléctrica y productor de combustible altamente calorífico. La integración de técnicas para el procesamiento y aprovechamiento energético de los Residuos Sólidos Urbanos es una gestión con una finalidad principalmente medioambiental y económica.

Finalmente, la presente monografía traza una fuente complementaria de información preliminar para futuras investigaciones teóricas e incluso *in situ*, como adicionalmente una fuente de información para la concientización de la actual problemática y de la existencia de acciones para la contribución del cuidado medioambiental.

7. RECOMENDACIONES

Se debe generar conciencia del aspecto medioambiental de impacto por la reacción de los Residuos Sólidos Urbanos en los rellenos sanitarios, partiendo del origen de la problemática como lo es el consumo, la clasificación de residuos y la integración de alternativas para la mitigación de impactos negativos mediante su aprovechamiento energético.

Es relevante generar un análisis comparativo y una valoración de las diversas consecuencias económicas, ambientales y sociales que el desaprovechamiento energético de los rellenos sanitarios representa versus las ventajas de la implementación de dichas alternativas y sus costos, para evaluar si es rentable, productivo y sostenible la inversión de su integración en una región.

Finalmente, es de gran importancia incentivar en el campo de investigación la temática de la captura y el aprovechamiento de biogás *in situ* para obtener fuentes de información de primer acceso como es la experimentación en campo, comprobando la información obtenida a partir del estado del arte y la comparación de los diferentes métodos de estimación de la producción de biogás, para identificar bajo qué condiciones cada uno representa la mejor alternativa de medición según las características de un relleno sanitario.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, A., Restrepo, A., & Tibaquirá, J. E. (2018). Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 12(23), 40–47.
- Arcadis. (2021). *Captura de Gas en Relleno Sanitario - Reciclo Orgánicos*.
- Ayisi, P. A., Ngonda, T., & Kanyarusoke, K. (2022). Current landfill technologies and the prospects of developing landfill-based biogas generators for African countries. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1865–1871.
- Bianchini, J., & Santana, F. (2015). *Mayor Eficiencia Energética con Menos Combustible Ciclo Rankine x Ciclo Rankine Regenerativo*.
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., & Levy, A. (2017). Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico. *Banco Interam. Desarro*, 52.
- Caballero-Saldívar, D. E., de la Garza-Requena, F. R., del Carmen Andrade-Limas, E., & Briones-Encinia, F. (2011). Los rellenos sanitarios: una alternativa para la disposición final de los residuos sólidos urbanos. *CienciaUAT*, 6(2), 14–17.
- Camargo, Y., & Vélez, A. (2009). Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Colombia*.
- Carriazo, J. G., Saavedra, M. J., & Molina, M. F. (2010). Propiedades adsorptivas de un carbón activado y determinación de la ecuación de Langmuir empleando materiales de bajo costo. *Educación Química*, 21(3), 224–229.
- Castillo, L. N. Y. (2019). *Evaluación termodinámica y económica para la generación*

eléctrica por medio de la incineración de residuos sólidos urbanos.

Codina, L. (2020). Cómo hacer revisiones bibliográficas tradicionales o sistemáticas utilizando bases de datos académicasoma de conducto auditivo externo: estudio de una serie de casos. *Revista ORL*, 11(2), 139–153.

Condorchem. (2020a). *Scrubbers y lavadores de gases.*

Condorchem, E. (2020b). *Tratamiento del biogás.*

CONPES. (2016). Política Nacional Para la Gestión de Residuos Sólidos. In C. y T. M. de E. N. M. de M. y E. C. de R. de A. P. y S. B. D. A. N. de E. S. de S. P. D. U. Departamento Nacional de Planeación Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Ministerio de Vivienda (Ed.), *Documento CONPES 3874* (p. 73). <http://www.andi.com.co/Ambiental/SiteAssets/Paginas/default/CONPES3874.pdf>

Dávila, G. P., & Dávila-del-Carpio, G. (2020). Purificación del Biogás para la producción de Biometano, a través de sistemas de filtración de CO₂ y vapor de agua. *Veritas*, 21(2), 45–50.

de Souza, R. N., Barros, R. M., dos Santos, I. F. S., Tiago, F. G. L., & da Silva, S. P. G. (2021). Electric energy generation from biogas derived from municipal solid waste using two systems: Landfills and anaerobic digesters in the states of Sao Paulo and Minas Gerais, Brazil. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 48, 101552.

Decreto-Ley 2811. (1974). “*Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.*” Diario oficial 34243.

Decreto 3683. (2003). *Por el cual se reglamenta la Ley 697 de 2001 y se crea una*

Comisión Intersectorial.

Decreto 838. (2005). *por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones.*

Díaz-Archundia, L. V., Buenrostro-Delgado, O., Mañón-Salas, M. del C., & Hernández-Berriel, M. del C. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero en dos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18(2), 149–159.

Espinal, G. (2015). *Reforma energética y los gases de efecto invernadero (GEI). Ambiente Reforma Energética.*

Fernández, G. J. (2014). *Valorización energética de Residuos Sólidos Urbanos.* https://www.researchgate.net/publication/268220362_Valorizacion_energetica_de_Residuos_Solidos_Urbanos

Freire, E. E. E. (2020). La búsqueda de información científica en las bases de datos académicas. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 3(1), 31–35.

González, J. (2014). *Alternativas de captación y tratamiento del biogás en el vertedero de Piedras Blancas, Córdoba, Argentina.* Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y

Groom, C. R., Bruno, I. J., Lightfoot, M. P., & Ward, S. C. (2016). The Cambridge structural database. *Acta Crystallographica Section B: Structural Science. Crystal Engineering and Materials*, 72, 171.

Gunnemyr, M. (2019). Causing global warming. *Ethical Theory and Moral Practice*, 22(2), 399–424.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a waste 2.0: a*

- global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications.
- Kippling, D. R., & Laurel, H. O. (2013). Combustible biogás en celdas de hidrógeno. *Conciencia Tecnológica*, 45, 37–40.
- Köfalusi, G. K., & Aguilar, G. E. (2010). Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, 79, 39–51.
- Kundariya, N., Mohanty, S. S., Varjani, S., Ngo, H. H., Wong, J. W. C., Taherzadeh, M. J., Chang, J.-S., Ng, H. Y., Kim, S.-H., & Bui, X.-T. (2021). A review on integrated approaches for municipal solid waste for environmental and economical relevance: Monitoring tools, technologies, and strategic innovations. *Bioresource Technology*, 342, 125982.
- Kweku, D. W., Bismark, O., Maxwell, A., Desmond, K. A., Danso, K. B., Oti-Mensah, E. A., Quachie, A. T., & Adormaa, B. B. (2018). Greenhouse effect: greenhouse gases and their impact on global warming. *Journal of Scientific Research and Reports*, 17(6), 1–9.
- Lecuona, F. A. (2019). *Modelización matemática de la producción de biogás en vertederos de residuos sólidos urbanos*.
- Leitón, J. (2015). Purificación de biogás utilizando agua a presión óxido de calcio y carbón. *Revista Científica*, 25(1), 66–73.
- Ley 1715. (2014). *Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional*.
- Ley 697. (2001). *Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se dictan otras*

disposiciones.

Ley 9. (1979). *Por la cual se dictan Medidas Sanitarias.* Diario Oficial CXV N. 35193.
<http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/1564714>

Ley 99. (1993). *“por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA.*

López Arriaza, D. Á. (2016). *Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios.*

Magariños, J. J. G. (2015). Producción y Captación de Biogás para su empleo en Usos No Convencionales. *Tecnología y Desarrollo*, 13, 26.

Mardoja. (2017). *Trujillo requiere de un relleno sanitario y planta de tratamiento.*

Marimar. (2019). *Biogás - El Gas Combustible Alternativo - ElBlogVerde.com.*

Martínez, L. J., & Cué, P. N. (2012). *Cómo buscar información Biblioteca de la Universidad.* In *Biblioteca de la Universidad de Cantabria académica y científica.* https://www.uv.mx/personal/jomartinez/files/2011/08/como-buscar-en-internet_2.pdf

Matthews, T. K. R., Wilby, R. L., & Murphy, C. (2017). Communicating the deadly consequences of global warming for human heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(15), 3861–3866.

Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., & Burkhardt, T. (2020). Global climate change and greenhouse effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(4), 2897.

- Ministerio de Vivienda. (2020). *Tratamiento y Disposición Final*.
<https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico>
Decreto 1784 , (2017).
- Molano, C. F. (2019). Relleno sanitario Doña Juana en Bogotá: a producción política de una paisage tóxico, 1988-2019. *Historia Crítica*, 74, 127–149.
- Oriol. (2019). *Ciclo Rankine: funcionamiento del ciclo que convierte calor en trabajo*.
Energía Solar. .
- Ortega, V. L., Rodríguez, M. S., Fernández, S. E., & Bárcenas, P. L. (2015).
Principales métodos para la desulfuración del biogás. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(1), 45–56.
- Pastrana, A., Pizano, E., & Maldonado, J. (2002). *Decreto 1713*. Diario Oficial 44893
. <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=5542>
- Pavlostathis, S. G., & Giraldo-Gomez, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 21(5–6), 411–490.
- Pérez, H., & Villa, P. (2005). Desulfuración biológica: una alternativa para el tratamiento de emisiones de gases a la atmosfera. *Agua Latinoamericana*, 5(3), 17–20.
- Resolución 1291. (2006). *Por la cual se acogen los términos de referencia para la elaboración del Diagnóstico Ambiental de Alternativas para construcción y operación de rellenos sanitarios y se adoptan otras determinaciones*.
- Resolución 1390. (2005). *por la cual se establecen directrices y pautas para el cierre, clausura y restauración o transformación técnica a rellenos sanitarios* .

Resolución 909. (2008). *Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones.*

Resolución CREG 066. (2017). *Octubre 2017 Comentarios resolución CREG 066 de 2017 Metodología Distribución.*

Rivas, C. (2018). *Piensa un minuto antes de actuar: gestión integral de residuos solidos.*

Samper, P., Serpa, U., Botero, F., Hernandez, A., Marin, R., Eduardo, J., Mazuera, D., Lopez, C., & Gomez, A. (1995). *Decreto 948.*
<http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527621/Decreto+948+de+1995.pdf/670a0603-4d1f-454f-941e-08e6ba70666d>

Santos, I, & Tiago, G. (2018). Biogas Production From Solid Waste Land Fi Ll. *ResearchGate.* <https://doi.org/10.22201/FI.25940732E.2017.18N3.027>

Santos, Ivan, Barros, R. M., & Tiago, F. G. L. (2020). *Biogas production from solid waste landfill.*

Scharff, H., & Jacobs, J. (2016). Applying guidance for methane emission estimation for landfills. *Waste Management*, 26(4), 417–429.
<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2005.11.015>

Shah, A. V, Srivastava, V. K., Mohanty, S. S., & Varjani, S. (2021). Municipal solid waste as a sustainable resource for energy production: State-of-the-art review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105717.

Tchobanoglous, G. (1996). *Gestión integral de residuos solidos* (H. Theisen & S. Vigil (eds.); McGraw-Hill, 1994).

<https://www.urbe.edu/UDWLibrary/InfoBook.do?id=4451>

Tejera, D., Recio, D. R., Torres, Á. A. P., & Javier, M. S. (2015). Aprovechamiento energético del biogás a partir de los residuales de la Empresa Refinadora de Aceite de Santiago de Cuba “ERASOL”. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 46, 324–331.

UAESP. (2020). *Relleno sanitario | Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos*. <https://www.uaesp.gov.co/transparencia/informacion-interes/glosario/relleno-sanitario>

Umaña, P. (2018). *Rellenos sanitarios: ¿una bomba de tiempo para el ambiente?*

Urrego-Martínez, E., & Rodríguez-Miranda, J. P. (2016). Aplicación de las metodologías EPA, mexicano e IPCC para la estimación de biogás, caso de estudio relleno sanitario Doña Juana, Bogotá-Colombia. *Universidad y Salud*, 18(2), 338–344.

Varnero, M. (2011). *Manual de Biogás. Global Environment Facility*. .

Vera-Romero, I., Estrada-Jaramillo, M., Martínez-Reyes, J., & Ortiz-Soriano, A. (2015). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(3), 471–478.

Verhelst, S., Turner, J. W. G., Sileghem, L., & Vancoillie, J. (2019). Methanol as a fuel for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70, 43–88.

Villanueva-Estrada, R. E., Rocha-Miller, R., Arvizu-Fernández, J. L., & González, A. C. (2019). Energy production from biogas in a closed landfill: A case study of Prados de la Montaña, Mexico City. *Sustainable Energy Technologies and*

Assessments, 31, 236–244.

Wang, S., Ma, F., Ma, W., Wang, P., Zhao, G., & Lu, X. (2019). Influence of temperature on biogas production efficiency and microbial community in a two-phase anaerobic digestion system. *Water*, 11(1), 133.

Wei, Y., Liu, J., Zhou, X., Wu, J., & Qian, X. (2019). Effect of solid–liquid separation enhanced by low-temperature hydrolysis in methanogenic phase on two-phase anaerobic sludge digestion system. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(12), 8573–8584.

Xu, Q., Qin, J., & Ko, J. H. (2019). Municipal solid waste landfill performance with different biogas collection practices: Biogas and leachate generations. *Journal of Cleaner Production*, 222, 446–454.