



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**  
**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
A TRAVÉS DE BIOGÁS OBTENIDO DEL RELLENO SANITARIO DEL  
CANTÓN LATACUNGA**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de  
Ingeniero Eléctrico

**AUTORES:**

Michael Joel Flores Jiménez

Andrés Sebastián Ruiz Albiño

**TUTOR ACADÉMICO:**

Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado Mg.

**LATACUNGA–ECUADOR**

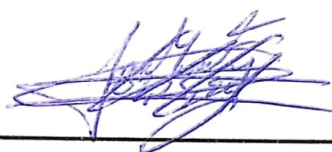
**Marzo 2025**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Flores Jiménez Michael Joel, con cedula de ciudadanía No. 1751735349, y Ruiz Albiño Andrés Sebastián, con cedula de ciudadanía No. 0250311248 declaramos ser autores del presente **PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: “ESTUDIO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE BIOGÁS OBTENIDO DEL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN LATACUNGA”** siendo el Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado Mg, Tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente proyecto de investigación, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, febrero del 2025



---

**Michael Joel Flores Jiménez**  
C.C. 1751735349



---

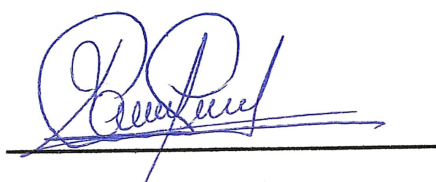
**Andrés Sebastián Ruiz Albiño**  
C.C. 0250311248

**AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.**

En calidad del Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

**“ESTUDIO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE BIOGÁS OBTENIDO DEL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN LATACUNGA”** de Flores Jiménez Michael Joel y Ruiz Albiño Andres Sebastián, de la carrera de Electricidad, considero que dicho Informe Investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, febrero 2025.



Ing. Xavier Alfonso Proaño Maldonado Mg.

C.C. 0502656424

**TUTOR**

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: **FLORES JIMÉNEZ MICHAEL JOEL** y **RUIZ ALBIÑO ANDRÉS SEBASTIÁN** con el título de Proyecto de Investigación: "**ESTUDIO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE BIOGÁS OBTENIDO DEL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN LATACUNGA**", han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

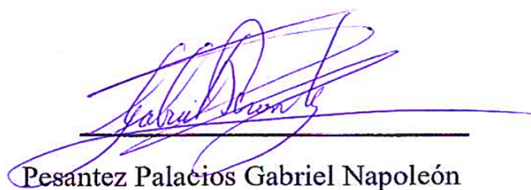
Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, febrero de 2025

Para constancia firmar:



Mullo Pallo Mauricio Eduardo  
CC:0503755183  
**LECTOR 1 (PRESIDENTE)**



Pesantez Palacios Gabriel Napoleón  
CC:0301893889  
**LECTOR 2**



Vásquez Teneda Franklin Hernán  
CC:1710434497  
**LECTOR 3**

## ***AGRADECIMIENTO***

*A Dios quién ha sabido guiarme por el camino del bien durante todos estos años. Agradezco a mi tutor Ing. Xavier Proaño Mg, por su paciencia y orientación durante nuestro proyecto de investigación, y por sus conocimientos que fueron fundamentales para el desarrollo del mismo.*

*Agradezco a mis ingenieros porque su dedicación, perseverancia y tolerancia han fortalecido mis conocimientos y virtudes.*

*Finalmente, gracias a todas las personas que han sido parte de mi proceso universitario, mis amigos y mi familia.*

***Michael Flores***

## **AGRADECIMIENTO**

*En primer lugar, agradezco a Dios y también al Ing. Xavier Proaño Mg, por su invaluable orientación, paciencia y conocimientos compartidos a lo largo de este proceso. Su apoyo ha sido fundamental para el desarrollo de esta investigación.*

*A mis ingenieros y compañeros quienes, con sus enseñanzas y debates, enriquecieron mi formación y me motivaron a seguir aprendiendo.*

*A mi familia, por su amor incondicional, su apoyo constante y su fe en mí, incluso en los momentos más difíciles. Gracias por ser mi fuente de inspiración y fortaleza.*

*Finalmente, a mi compañero de tesis Michael Flores y a mis amigos, por su compañía, palabras de aliento y por recordarme siempre la importancia del equilibrio entre el estudio y la vida personal.*

**Andrés Ruiz**

**DEDICATORIA**

*Me gustaría dedicar este proyecto de investigación a las personas más importantes de mi vida, mis padres Héctor Flores y Doris Jiménez, que siempre han estado apoyándome incondicionalmente y gracias a ellos tengo todo en la vida.*

*A mis hermanos quienes han sido parte de mi evolución profesional y quien me ha dado consejos para seguir adelante y nunca rendirme.*

*Para todos mis amigos que estuvieron conmigo durante estos años de estudios. Para la mujer que me apoyó incondicionalmente en este tiempo Conie, que este trabajo sea lo que siempre anhelamos. Gracias por absolutamente todo. Lo logramos.*

**Michael Flores**

**DEDICATORIA**

*A Dios, por darme la fortaleza y sabiduría para superar cada desafío en este camino. A mis padres, por su amor incondicional, por ser mi guía y mi mayor ejemplo de esfuerzo y perseverancia. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.*

*A mis amigos, por su compañía, palabras de aliento y por hacer más llevaderos los momentos de estrés y cansancio. A todas las personas que, de una u otra manera, han dejado una huella en mi vida académica y personal.*

*Con gratitud y cariño, dedico este trabajo a cada uno de ustedes.*

***Andrés Ruiz.***

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	xv
ABSTRACT .....	xvi
1. INFORMACIÓN GENERAL .....	17
2. INTRODUCCIÓN .....	18
2.1. EL PROBLEMA .....	18
2.1.1. Situación Problémica .....	18
2.1.2. Formulación del problema.....	20
2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN .....	20
2.3. BENEFICIARIOS .....	20
2.3.1. Directos .....	20
2.3.2. Indirectos .....	20
2.4. JUSTIFICACIÓN.....	20
2.5. HIPÓTESIS.....	21
2.6. OBJETIVOS .....	21
2.6.1. Objetivo General .....	21
2.6.2. Objetivos Específicos .....	21
2.7. SISTEMA DE TAREAS.....	22
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	23
3.1. ANTECEDENTES .....	23

3.2.	ENERGÍA RENOVABLE.....	25
3.3.	PRODUCCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE BIOGÁS EN ECUADOR.....	26
3.3.1.	La Central Térmica a Biogás Pichacay .....	26
3.3.2.	GasGreen S.A. ....	26
3.4.	¿QUÉ ES UN RELLENO SANITARIO? .....	26
3.4.1.	Estructura del relleno sanitario .....	27
3.5.	¿QUÉ ES EL BIOGÁS? .....	30
3.5.1.	Composición del biogás .....	30
3.5.2.	Factores que se necesita para producir el biogás .....	31
3.5.3.	Fases de descomposición .....	31
3.6.	EXTRACCIÓN Y TRATAMIENTO DEL BIOGÁS .....	31
3.6.1.	Pretratamiento.....	32
3.6.2.	Drenaje Pasivo con Chimenea .....	32
3.6.3.	Pozos de tubo perforado .....	33
3.7.	CAPTURA Y TRATAMIENTO DEL BIOGÁS GENERADO .....	34
3.8.	MODELO LandGEM .....	34
3.9.	MODELO ECUATORIANO.....	35
3.10.	GENERADOR A BIOGÁS .....	38
3.10.1.	Motogenerador.....	38
3.11.	COSTOS DE INVERSIÓN .....	39

3.12.	COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (O&M).....	39
3.13.	PRODUCCIÓN DE ENERGÍA (kWh).....	40
3.14.	CERTIFICADOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES (CER's).....	40
3.15.	COSTO DE COMERCIALIZACIÓN DE ENERGÍA .....	41
3.16.	VALOR PRESENTE NETO (VAN).....	41
3.17.	TASA INTERNA DE RETORNO (TIR).....	42
3.18.	PERIODO DE RECUPERACIÓN (PBP) .....	42
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS .....	44
4.1.	PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SOLIDOS URBANOS .....	45
4.2.	ESTIMACIÓN DE CAUDAL DE BIOGÁS GENERADO Y PROYECTADO CON MODELOS MATEMATICOS.....	46
4.3.	PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	48
4.4.	ELECCIÓN DEL EQUIPO DE GENERACIÓN .....	49
4.5.	DETERMINACIÓN DE LA INVERSIÓN .....	50
4.6.	CÁLCULOS DE LOS COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (O&M)	51
4.7.	DETERMINACIÓN DE INGRESO POR COMERCIALIZACIÓN Y CER's ..	51
4.7.1.	Determinación del Costo de Comercialización de Energía .....	51
4.7.2.	Ingresos por venta de energía.....	52
4.7.3.	Ingresos por CER's .....	52
4.8.	VALOR ACTUAL NETO (VAN).....	52

4.9.	TASA INTERNA DE RETORNO (TIR) .....	52
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS. ....	53
5.1.	RESULTADOS DEL VOLUMEN DE RSU.....	53
5.2.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL BIOGÁS APROVECHABLE .....	54
5.2.1.	Resultados del modelo LandGEM. ....	54
5.2.2.	Resultados del Modelo Ecuatoriano. ....	55
5.2.3.	RESULTADOS DE LA RECUPERACIÓN DEL BIOGÁS .....	56
5.3.	RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DISPONIBLE 58	
5.4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO .....	59
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	62
7.	REFERENCIAS.....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [1]. .....	17
<b>Tabla 2.</b> Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [5].....	20
<b>Tabla 3.</b> Ventajas y desventajas energía Biomasa [17].....	26
<b>Tabla 4.</b> Composición del relleno Sanitario de Latacunga- [21].....	27
<b>Tabla 5.</b> Composición de Biogás [20].....	30
<b>Tabla 6.</b> Parámetros de la tasa y potencial de generación de metano [35].....	37
<b>Tabla 7.</b> Eficiencia de recolección en rellenos Sanitarios [35]. .....	38
<b>Tabla 8</b> Información general de tecnología que aprovecha el BGRS [36].....	38
<b>Tabla 9.</b> Costos de una central de generación eléctrica [27].....	39
<b>Tabla 10.</b> Criterios de Evaluar el VAN [36]. .....	42
<b>Tabla 11.</b> Criterios de evaluación (TIR) [36]. .....	42
<b>Tabla 12.</b> Criterios rentables para la decisión de proyectos [36]. .....	43
<b>Tabla 13 .</b> Características técnicas del motogenerador [43].....	49
<b>Tabla 14.</b> Las tres plantas que usamos como referencia tienen los siguientes datos [36]...51	51
<b>Tabla 15.</b> Costo de Comercialización de Energía. ....	51
<b>Tabla 16.</b> Inversión estimada de la Planta de generación de Biogás [45].....	59
<b>Tabla 17.</b> Análisis Económico.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Método de trinchera utilizado para construir un relleno sanitario [19].	28
<b>Figura 2.</b> Detalle de Cobertura Final [20].	29
<b>Figura 3.</b> Pozo de venteo del Relleno Sanitario de Latacunga [20].	30
<b>Figura 4.</b> Opciones para valorizar los residuos municipales [27].	32
<b>Figura 5.</b> Venteo de biogás Latacunga [28].	33
<b>Figura 6.</b> Pozo de tubo perforado [19].	33
<b>Figura 7.</b> Parámetros del Modelo LandGEM [31].	34
<b>Figura 8.</b> Interfaz del Modelo Ecuatoriano [33].	36
<b>Figura 9.</b> Motor de Combustión Interna [35].	38
<b>Figura 10.</b> Diagrama de flujo.	45
<b>Figura 11.</b> Planta generadora de electricidad mediante biogás de relleno sanitario [36].	50
<b>Figura 12.</b> Estimación de residuos del relleno sanitario Latacunga 2020 – 2045.	54
<b>Figura 13.</b> Estimación del biogás en el RS de Latacunga considerando el modelo LandGEM.	55
<b>Figura 14.</b> Comportamiento del biogás en el RS de Latacunga considerando el modelo ecuatoriano.	56
<b>Figura 15.</b> Comparación de la Generación de Biogás por cada modelo matemático.	56
<b>Figura 16.</b> Recuperación de biogás aprovechable y el promedio de biogás generado en el RS de Latacunga.	57

# UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI

## FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

### TÍTULO: “ESTUDIO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE BIOGÁS OBTENIDO DEL RELLENO SANITARIO DEL CANTÓN LATACUNGA”

**Autores:**

Flores Jiménez Michael Joel

Ruiz Albiño Andrés Sebastián

## RESUMEN

El presente estudio se basó en un enfoque cuantitativo, empleando dos modelos para la estimación de biogás: LandGEM y el Modelo Ecuatoriano. A través de estas herramientas, se estimó una producción anual promedio de 1366 m<sup>3</sup>/h de biogás aprovechable entre los años 2028 y 2045, periodo en el cual el Relleno Sanitario de Latacunga deberá cerrarse. Con estos datos, se analizó la generación eléctrica, obteniendo un promedio anual estimado de 24.53 GWh durante el periodo de estudio. Asimismo, se evaluó la viabilidad económica del proyecto, considerando costos de operación y mantenimiento, con una tasa de descuento del 8.5%. Además, con un precio de venta de 0.11 \$/kWh, similar al de las empresas Inga I, II y Pichacay, la TIR alcanzó el 31%. Finalmente, se concluyó que el proyecto resultó económicamente rentable y permitió aprovechar los gases emitidos.

**Palabras claves:** Biogás, residuos sólidos, generación de energía, capacidad de relleno, producción de biogás, modelos de estimación de biogás, análisis financiero, cálculo del costo de kWh.

# TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES.

**THEME: “STUDY OF AN ELECTRIC POWER GENERATION SYSTEM USING BIOGAS OBTAINED FROM THE LATACUNGA CANTON LANDFILL”.**

**Authors:**

Flores Jiménez Michael Joel

Ruiz Albiño Andrés Sebastián

## ABSTRACT

The present study was based on a quantitative approach, using two models for biogas estimation: LandGEM and the Ecuadorian Model. By using these tools, an average annual production of 1366 m<sup>3</sup>/h of usable biogas was estimated between 2028 and 2045, the period in which Latacunga landfill will be closed. Through this data, electricity generation was analyzed, obtaining an estimated annual average of 24.53 GWh during the study period. Moreover, the economic feasibility of the project was evaluated, considering operation and maintenance costs, with a discount rate of 8.5%. In addition, with a sales price of \$0.11/kWh, similar to that of the Inga I, II, and Pichacay companies, the IRR reached 31%. To conclude, the project was economically profitable and made it possible to take advantage of the gases emitted.

**Keywords:** Biogas, solid waste, energy generation, landfill capacity, biogas production, biogas estimation models, financial analysis, kWh cost calculation.

## 1. INFORMACIÓN GENERAL

**Tema:** Estudio de un sistema de generación de energía eléctrica de biogás obtenido del relleno sanitario del cantón Latacunga.

**Tipo de Proyecto:** Proyecto de Investigación.

**Carrera:** Ingeniería en Electricidad.

**Proyecto de investigación vinculado:** Estrategias de planeación de sistemas eléctricos en el contexto de la transición energética.

**Equipo de Trabajo:**

**Grupo de Investigación:** Sistemas Eléctricos de Potencia

**Tutor de Titulación:** Ing. Xavier Proaño Maldonado Mg.

**Estudiantes:** Flores Jiménez Michael Joel.

Ruiz Albiño Andrés Sebastián.

**Área de Conocimiento:**

**Tabla 1.** Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [1].

07 Ingeniería, Industria y Construcción	071.Ingeniería y Profesiones Afines	0711 Ingeniería y procesos químicos.
		0712.Tecnología de protección del medio ambiente.
		0713 Electricidad y energía.

**Línea de investigación:** Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

**Sublíneas de investigación de la Carrera:**

**Sublínea 2:** Conversión y uso racional de la energía eléctrica.

## **2. INTRODUCCIÓN**

El crecimiento acelerado de la población y el incremento en la generación de residuos sólidos han generado serios problemas ambientales en diversas ciudades del país, incluido el cantón Latacunga. Uno de los desafíos más críticos radica en la acumulación de residuos en los rellenos sanitarios, lo que conlleva la emisión de grandes cantidades de biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono. En la actualidad, el relleno sanitario Latacunga maneja estos gases mediante un proceso de venteo, liberándolos directamente a la atmósfera y contribuyendo así al efecto invernadero y al cambio climático.

Sin embargo, el biogás representa una fuente de energía renovable con un alto potencial para la generación de electricidad. Su aprovechamiento no solo permitiría reducir el impacto ambiental asociado a su liberación, sino también contribuir a la diversificación de la matriz energética del país con una alternativa limpia y sostenible.

Este estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica y económica del aprovechamiento del biogás generado en el relleno sanitario Latacunga para la producción de energía eléctrica. Para ello, la investigación se estructura en tres etapas principales: en primera instancia, se realiza una revisión de estudios previos de los sistemas de generación eléctrica a partir de biogás y la metodología adecuada para el análisis de producción energética; en segundo lugar, se determina la cantidad de biogás aprovechable para la generación eléctrica en el relleno sanitario; y finalmente, se estima la producción energética y su viabilidad económica, con el fin de evaluar la rentabilidad del proyecto y su contribución a la transición hacia fuentes de energía renovable.

### **2.1. EL PROBLEMA**

#### **2.1.1. Situación Problemática**

A nivel mundial, todas las naciones son grandes consumidores en lo que respecta a combustibles fósiles, para el uso de generación eléctrica, ya que, es un gran problema en emitir Gases de Efecto Invernadero, considerando esto un verdadero desafío para investigadores con el fin de buscar energía eléctrica limpia, generando así un bajo un ámbito económico y tecnológico sostenible.

La industrialización del Ecuador ha demandado el uso de materias primas dando como resultado un aumento de residuos orgánicos, los cuales en su mayoría son desechados

inadecuadamente, permitiendo a la contaminación del ambiente, sin embargo, una persona desecha 0.86 kg de basura al día. Según el CENACE los residuos de biomasa estarían por encima de los 18.4 millones toneladas/año. Desperdicios que son enterrados en el territorio del Ecuador. Pero además de la inmensa cantidad de desechos que produce la población, la menor parte de ellos es reutilizada ya que casi todo se entierra, lo cual tiene graves impactos para el medioambiente [1].

Al incentivar el establecimiento de ciclos biológicos cortos de nutrientes, por ejemplo, a través del compostaje o la generación de biogás local. En 2017, se contabilizaron un total de 2.2 millones de toneladas de desechos en Ecuador, se proyecta que podrían producirse 704,960 toneladas de acondicionadores orgánicos a partir de residuos. Además, se calcula que anualmente se podrían generar alrededor de 772.30 kWh por persona a partir de estos residuos. Al comparar esto con el consumo energético individual en Ecuador, que es de 1,143 kWh por habitante (Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2016), se estima que este método anaeróbico podría cubrir hasta el 68% del consumo de energía por persona [2].

Según las cifras del INEC, un sorprendente 96% de la basura termina enterrada, mientras que solo el 4% se recicla. De la basura que se entierra, el 66.5% es orgánica, y el 33.5% restante son desechos inorgánicos que, si se clasifican adecuadamente, podrían reciclarse en su mayoría. Sin embargo, al final del día, prácticamente todo se desecha sin consideración. Esta basura tiene tres posibles destinos: el relleno sanitario, que recibe el 45,7%; las celdas emergentes, con un 28.8%; y los botaderos a cielo abierto, que acogen el 25.6%. El país se ha propuesto metas que hasta el 2030 se reduzcan estas cifras de contaminación y que la mayoría pueda ser usada en la implementación de energías renovables, en lo cual el país ha postergado esta meta y salido a la contaminación ambiental provocando cada año el aumento de biomasa [3].

Para el respectivo estudio de la producción de energía eléctrica a partir del biogás se pueden presentar varias causas que se mencionan a continuación en la matriz causa-efecto y que ponen en contraparte para este proyecto investigativo, en base a eso se considerara una causa con su respectivo efecto para el estudio de este.

### 2.1.2. Formulación del problema

El bajo aprovechamiento del biogás generado en el relleno sanitario de Latacunga reduce su potencial como fuente de energía para la generación de electricidad, desaprovechando un recurso disponible y limitando su contribución al sistema eléctrico local, a pesar del aumento considerable de residuos urbanos en el sitio.

## 2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

**Objeto de Investigación:** Generación de energía eléctrica de Biogás obtenido del relleno sanitario del cantón Latacunga.

**Campo de Acción:** 3306.07 Máquinas Rotatorias.

**Tabla 2.** Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO [5].

3306 Ingeniería y Tecnologías Eléctricas	
3306.02	Aplicaciones Eléctricas
3306.07	Máquinas Rotatorias
3306.08	Interruptores

## 2.3. BENEFICIARIOS

### 2.3.1. Directos

Población perteneciente al Cantón Latacunga.

### 2.3.2. Indirectos

ELEPCO S.A (Empresa Eléctrica Provincial-Cotopaxi).

## 2.4. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto de investigación explora las energías renovables, con un enfoque particular en la producción de energía a partir del biogás., así como también su eficiencia energética e impacto ambiental y social. El propósito primordial de este proyecto de investigación se centra en el aprovechamiento de la biomasa como combustible para la generación de electricidad, ofreciendo una alternativa sostenible y eficiente. Las centrales de biomasa a gran escala requieren una gran cantidad de residuos urbanos, lo que contribuye significativamente a la reducción de la contaminación ambiental. Al convertir estos desechos en energía, no solo se evita su acumulación en los rellenos sanitarios, sino que también se genera electricidad para abastecer la red nacional. A corto plazo, esto representa un beneficio ambiental y social,

mientras que, a largo plazo, el crecimiento poblacional implicará una mayor producción de residuos, reforzando la necesidad de implementar este tipo de tecnologías.

Evidentemente, los rellenos sanitarios son una de las principales fuentes de contaminación, ya que la descomposición de los residuos genera gases de efecto invernadero. Desarrollar una central de generación eléctrica, de tal forma que, estas sean desde fuentes limpias, lo cual, permitirá, que el cantón Latacunga avance en sostenibilidad y se alinee con Ecuador. Asimismo, este tipo de proyectos pueden acceder a mecanismos nacionales para la reducción de emisiones, impulsando un futuro más limpio y responsable para la comunidad y el país.

## **2.5. HIPÓTESIS**

La producción actual y proyectada de biogás en el relleno sanitario de Latacunga es suficiente para generar energía eléctrica de manera eficiente y rentable.

## **2.6. OBJETIVOS**

### **2.6.1. Objetivo General**

Analizar la viabilidad de producción rentable de energía eléctrica a partir de biogás, utilizando los datos de producción considerados, para la estimación de la capacidad de producción de energía.

### **2.6.2. Objetivos Específicos**

- Investigar fuentes bibliográficas, referentes a la producción de energía eléctrica a partir de biogás obtenido de los rellenos sanitarios.
- Estimar la producción de biogás en el relleno sanitario del cantón Latacunga, utilizando los datos de generación de residuos anuales, para la valoración de su potencial energético.
- Examinar la producción de energía eléctrica a partir del biogás para la estimación de sus costos operativos para la determinación de la viabilidad económica del proyecto.

## 2.7. SISTEMA DE TAREAS

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medios e Instrumentos
Investigar fuentes bibliográficas, referentes a la producción de energía eléctrica a partir de biogás obtenido de los rellenos sanitarios.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recopilación de información relacionada con los sistemas de Generación Eléctrica a partir de biogás del relleno sanitarios.</li> <li>- Análisis de la aplicación de estos sistemas en rellenos sanitarios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Información de los principales métodos para la generación eléctrica a partir de biogás, considerando datos clave sobre su potencial energético y obteniendo referencias para el estudio del proyecto en Latacunga.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tesis de grado.</li> <li>- Artículos científicos.</li> <li>- Bases de datos académicos.</li> <li>- Informes.</li> <li>- Revistas Técnicas.</li> </ul>
Estimar la producción de biogás en el relleno sanitario del cantón Latacunga, utilizando los datos de generación de residuos anuales, para la valoración de su potencial energético.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Valoración de la cantidad de residuos que se puede lograr depositar en el relleno sanitario de Latacunga.</li> <li>- Determinación de la cantidad de biogás que se puede generar a través de la cantidad de desechos del relleno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cálculo del biogás aprovechable para la obtención de generación eléctrica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Microsoft Excel.</li> <li>- Informes de las toneladas de desechos del relleno.</li> <li>- Modelos matemáticos.</li> </ul>
Examinar la producción de energía eléctrica a partir del biogás para la estimación de sus costos operativos para la determinación de la viabilidad económica del proyecto.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluación de la viabilidad económica de la generación de la energía eléctrica, considerando la vida útil del relleno sanitario.</li> <li>- Comparación con otras plantas de la misma tecnología y determinación de su rentabilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis de TIR y VAN. Considerando el costo de kWh con una tasa de descuento del 8.5% y el costo del kWh referencial en el mercado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Datos acerca de costos de operación.</li> <li>- Modelos de depreciación y análisis de flujo y caja.</li> </ul>

### **3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

#### **3.1. ANTECEDENTES**

Ecuador es un país con un sector eléctrico conformado en su mayoría por generación hidráulica, seguida por combustibles fósiles y por último los no convencionales el cual representa solo el 1.44% de la generación total, entre estos se encuentra la generación por biogás y actualmente cuenta con 2 centrales con una potencia efectiva total de 6.50 MW que aportan al sistema nacional interconectado [4].

En el año 2012, A. Núñez et al. [5], realizaron un estudio en Bogotá-Colombia acerca de la producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica mediante una revisión a los modelos del proceso de gasificación. La creciente demanda de energía térmica y eléctrica, el impacto del calentamiento global debido al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, el alza en los precios de los combustibles fósiles y la búsqueda de independencia energética han impulsado el desarrollo de una nueva industria basada en fuentes renovables. En este contexto, se llevó a cabo un análisis sobre la producción de pellets y sus posibles aplicaciones, con un enfoque particular en la revisión de estudios de modelado relacionados con el proceso de gasificación.

En el 2014, P. Patiño [6], desarrolló un estudio de factibilidad en Bucaramanga-Colombia para implementar un sistema de generación de energía a partir de residuos vegetales con el fin de poder cubrir la demanda energética de un campus. Para seleccionar la tecnología más adecuada para convertir biomasa residual en energía, se compararon diferentes procesos de transformación, tomando en cuenta criterios ambientales, energéticos, económicos y sociales. Como resultado, se determinó que la digestión anaerobia es la opción más viable para su aprovechamiento. Esto llevó a la construcción de un digestor anaerobio, el cual, aunque requiere condiciones de diseño específicas, se destaca por utilizar materiales de bajo costo y permitir un montaje rápido.

Dada la importancia de las energías renovables, F. Oñate en el año 2014 [7], en su tema de investigación habla sobre los diferentes mecanismos generales de carácter técnico, económico, financiero, legal e institucional, para impulsar la utilización de estas en la producción de energía eléctrica en el Ecuador. Por consiguiente, desarrolló un estudio internacional para establecer la situación actual del país referente a uso de este tipo de energía.

Por otra parte, en el 2015 M. Loaiza et al [8], modeló un sistema de generación de energía a partir de biomasa forestal en Chile en el que se evaluó el potencial de la biomasa para la generación eléctrica, analizando diferentes métodos de conversión de residuos orgánicos (combustión directa, gasificación y biocombustibles) en energía comparando costos de inversión, mantención y operación; datos provenientes de la Agencia Internacional de la Energía Renovable. Llegando a la conclusión de que para combustión directa es factible a nivel económico debido a su bajo costo de inversión inicial para una generación local convencional, mientras que para una generación de mayor escala es necesario mayor cantidad de residuos y por tanto mayor costo en transporte de este, aunque utilizando biocombustibles el rendimiento aumenta exponencialmente necesitando menor materia prima no obstante tiene mayor inversión.

Según C. Suárez en el 2018 [9], planteó un plan de negocios para la aplicación de sistemas de energías alternativas y renovables en el municipio de Santander-Colombia, como contraposición al sistema eléctrico tradicional. Asimismo, se ha elaborado el plan de negocios mediante una comparación entre un sistema tradicional de suministro de energía y una alternativa innovadora, evaluando sus diferencias y beneficios.

Además, K. Zhang [10], propuso un mecanismo mejorado de utilización de biomasa a gas B2S (Biomass to Steam) para proporcionar varios tipos de flujos de vapor en sistemas industriales multienergéticos (MES). En este mecanismo, las generaciones disponibles de fuentes de energía renovable pueden ser cosechadas para ayudar en la gasificación de la biomasa en un gasificador B2S para mejorar el rendimiento del gas y su valor calorífico. Se formula un modelo de interacción termodinámica para el B2S con el fin de capturar la dinámica de la temperatura de gasificación bajo inyecciones de vapor a alta temperatura y controlar de forma óptima los comportamientos termoquímicos del secado, el pirólisis y la gasificación de la biomasa.

Finalmente, la investigación de Biomasa en el “Atlas Bioenergético” del Ecuador [11], han identificado un potencial bruto cercano a 1,000 MW mediante el aprovechamiento de los residuos que totalizan más de 18 millones de toneladas, mediante tecnologías modernas de aprovechamiento de la biomasa basadas en procesos termoquímicos (combustión, gasificación). Para el S.N.I. [12], se contó con el aporte de producción de las siguientes centrales por tipo de tecnología de biogás una producción de energía eléctrica de 42 GWh (0.14%).

### 3.2. ENERGÍA RENOVABLE

De acuerdo con la ONU (Organización de las Naciones Unidas) [13], las fuentes de energía renovables provienen de recursos naturales que se reponen más rápidamente de lo que se utilizan. Generar energía renovable tiende a producir menos contaminantes que el uso de combustibles fósiles, como el carbón, el gas natural y el petróleo. Estos recursos energéticos son más asequibles y son esenciales para mitigar los problemas generados por el cambio climático. Las energías renovables se describen como métodos de producción energética que dependen del aprovechamiento de recursos naturales que no se agotan, como el sol, la biomasa, el agua o el viento. Su capacidad de renovación es mayor que su consumo, aunque al ser utilizadas, pueden llegar a ser más eficientes.

L. Rojas y E. Sandoval [14], establecieron que la biomasa es una fuente de energía renovable que emplea materiales orgánicos provenientes de la agricultura, la ganadería y los residuos forestales. A pesar de que en la actualidad su participación en la matriz energética es limitada, se estima que este recurso podría contribuir significativamente a diferenciar las fuentes energéticas en el país y disminuir la dependencia de hidrocarburos. Entre los recursos de biomasa destacan el bagazo de caña de azúcar, las cascarillas de arroz y los desechos animales, los cuales tienen un alto potencial para la generación eléctrica mediante procesos como la combustión y la digestión anaerobia. Este potencial ofrece oportunidades para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, al aprovechar desechos que, de otra manera, generarían metano al descomponerse de forma natural.

En Ecuador la biomasa enfrenta retos y beneficios considerables, como se puede observar en la Tabla 3. Asimismo, L. Rojas y E. Sandoval [14], mencionaron que la experiencia de países como Argentina y Colombia, que han implementado con éxito proyectos de generación de energía mediante biomasa, sugiere que, con un apoyo institucional adecuado, Ecuador podría mejorar su capacidad para aprovechar estos recursos. Esto requeriría un enfoque integral que incluya incentivos para el sector privado, así como programas de capacitación y educación para ampliar el conocimiento en el uso de tecnologías de biomasa. De lograrlo, la biomasa no solo ayudaría a cubrir la demanda energética, sino también a generar empleo en áreas rurales y a promover un modelo de energía más sostenible y autónomo.

**Tabla 3.** Ventajas y desventajas energía Biomasa [17].

<b>Biomasa</b>	
Ventajas	Desventajas
Renovable	Emisiones de carbono
Reducción y clasificación de residuos	Uso de tierras
Neutralidad de carbono	Eficiencia
Desarrollo económico	Costos .de transporte y. almacenamiento

### **3.3. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE BIOGÁS EN ECUADOR**

#### **3.3.1. La Central Térmica a Biogás Pichacay**

De acuerdo a CAF (Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe) [15], señaló que Pichacay es una planta Cuenca la cual aprovecha el biogás del relleno sanitario para generar energía limpia. Con una capacidad de producción de hasta 2 MW, esta planta puede abastecer a aproximadamente 7,300 hogares al año. Además de proveer energía, esta planta ha logrado mitigar el impacto ambiental al reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### **3.3.2. GasGreen S.A.**

Aprovecha el gas de vertedero para producir energía limpia y renovable, con una capacidad inicial de 5 MW. Ubicada en el vertedero de El Inga I, II, la planta comenzó a operar en 2016 con dos generadores Jenbacher J320, que producían 2 MW, y en 2017 se agregaron tres generadores Jenbacher J420, llevando la capacidad total a 5 MW. Hoy, esta planta abastece a más de 25,000 hogares y ayuda a reducir la emisión de 250,000 toneladas de CO<sub>2</sub> cada año. Con una inversión aproximada de 6 millones de dólares, el proyecto demuestra cómo el biogás puede ser una fuente de energía rentable y ambientalmente beneficiosa, incluso en ciudades como Quito, que están a gran altitud [16].

### **3.4. ¿QUÉ ES UN RELLENO SANITARIO?**

El relleno sanitario, también conocido como vertedero, se define como un área destinada a la disposición final de residuos sólidos. Estas instalaciones están diseñadas específicamente para evitar riesgos para la salud pública y la seguridad, así como para minimizar el impacto ambiental tanto durante su operación como tras su cierre [17]. Además, cabe recalcar que en la

Tabla 4 se encuentra su composición porcentual de desechos que se encuentran en el Relleno del cantón Latacunga.

**Tabla 4.** Composición del relleno Sanitario de Latacunga- [21].

<b>Nro.</b>	<b>Composición de Residuos Sólidos en Latacunga</b>	
1	Materia Orgánica	67.12%
2	Plásticos	13.25%
3	Papel y Cartón	4.41%
4	Metales	0.71%
5	Vidrio	1.93%
6	Textiles	2.07%
7	Otros	10.50%
<b>Total</b>		100%

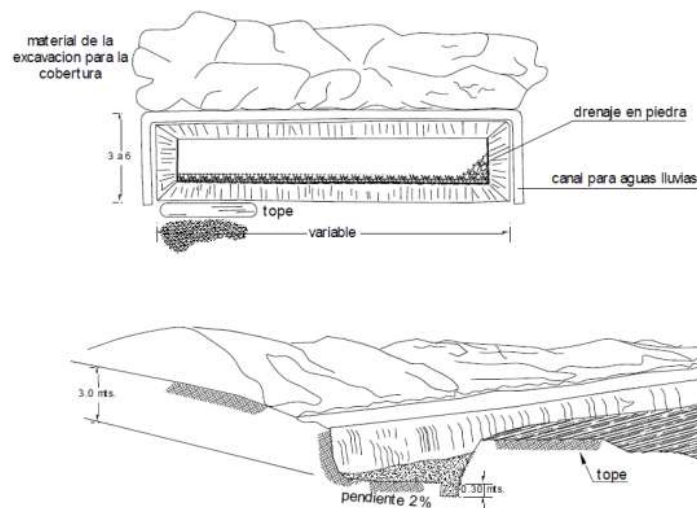
Para la generación de biogás en un vertedero, es necesario que los residuos acumulados posean materia orgánica y cuenten con las condiciones óptimas para la descomposición anaeróbica.

De acuerdo al informe de Fase I [18], el presente relleno sanitario donde actualmente se realiza la disposición final de los residuos sólidos recolectados en el cantón Latacunga se localiza a 7,5 Km, en la vía Latacunga - Pujilí, ingreso a la vía Chugchilán, sector Inchapo.

### **3.4.1. Estructura del relleno sanitario**

- **Método de trinchera**

En terrenos planos, se realizan excavaciones periódicas con maquinaria especializada, creando zanjas que pueden alcanzar varios metros de profundidad. Es como hacer hoyos gigantescos en la tierra. Los materiales excavados se utilizan para tapar estas trincheras una vez que se han depositado los desechos. La basura se compacta en el fondo de la zanja y se cubre con tierra, tal y como muestra la Figura 1 [19].



**Figura 1.** Método de trinchera utilizado para construir un relleno sanitario [19].

Tomando en cuenta lo señalado, en el caso del relleno sanitario de la Latacunga, para la construcción de cada trinchera será necesario remover toda la tierra que se encuentra sobre el área en donde irá ubicada la misma. De igual manera según el informe establecido por Kaymanta Consultores CIA. LTDA [20], se realizarán excavaciones a manera de gradas continuas con diferencia de nivel de 10 metros entre una y otra, con bermas de 5 metros de ancho y tendrá un espesor de capa de cobertura diaria permanente de 0.20 m. Por otro lado, el informe decretado por Kaymanta Consultores CIA. LTDA [18], considera las características morfológicas del terreno con el fin de optimizar el uso del terreno existente, se determinó que el mismo tiene capacidad para disponer 1,600,000 m<sup>3</sup> de desechos, valor que supera los 1,592,834,58 m<sup>3</sup> requeridos, por lo tanto, está garantizada la disponibilidad del terreno.

- **Geomembrana o capa base de impermeabilización**

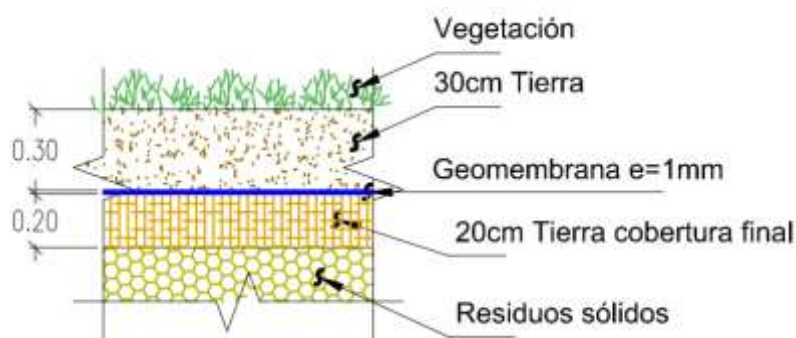
La geomembrana se caracteriza como un material flexible e impermeable, con un grosor que varía entre milímetros y centímetros. Este tipo de membrana polimérica está diseñada para evitar la filtración de cualquier compuesto, siendo especialmente útil para prevenir la lixiviación de residuos sólidos en su disposición final, lo cual podría perjudicar el suelo [21].

El sistema de impermeabilización de las geomembranas puede tener una duración de hasta 100 años en los rellenos sanitarios. Para asegurar una adecuada impermeabilización, es importante considerar el uso de geomembranas con un espesor mínimo de 1.0 mm [21].

De acuerdo con Kaymanta Consultores CIA. LTDA [20], puntúa que cuando la trinchera del Relleno Sanitario de Latacunga alcance su capacidad máxima, se procederá a cubrirla con

plataformas que servirán como base para las celdas diarias, unidad esencial del relleno y también menciona que al llegar al nivel máximo de relleno, se realizará el cierre definitivo mediante una cobertura como la siguiente y demostrada en la Figura 2:

- Una geomembrana de 1.0 mm sobre la última capa de residuos.
- Una capa de 30 cm de suelo humoso, facilitará el cultivo de especies vegetales nativas como arbustos y árboles.



**Figura 2.** Detalle de Cobertura Final [20].

- **Pozos de venteo**

El pozo de venteo tiene como función liberar los gases generados en las diversas subcapas de residuos dentro de un relleno sanitario. El relleno sanitario de Latacunga contará con un sistema de pozos para liberar y manejar los gases generados. Este incluirá tuberías perforadas de PVC de 110 mm rodeadas de material pétreo en 0.15 m instaladas en un esquema de cuadrícula con separación de 50 metros. Cuando el nivel del relleno alcance su capacidad, se colocará una loseta sobre la cual se instalará una tubería conectada al drenaje interno y a un quemador, permitiendo eventualmente la combustión de los gases generados. Además, este sistema facilitará la reinyección vertical del lixiviado, en la Figura 3 se observa el pozo de venteo [20].

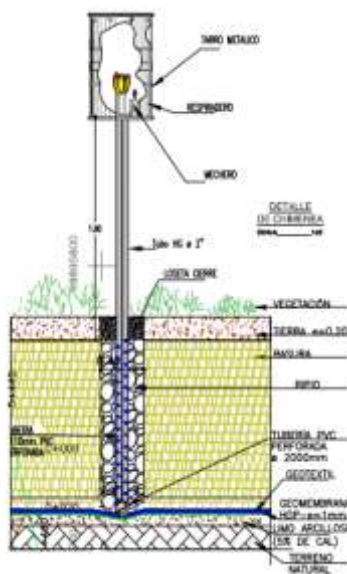


Figura 3. Pozo de venteo del Relleno Sanitario de Latacunga [20].

### 3.5. ¿QUÉ ES EL BIOGÁS?

Alba, E mencionó [22], que es un gas producido por la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos que se acumulan en los vertederos. A través de este proceso, los microorganismos degradan la materia orgánica sin la presencia de oxígeno, produciendo sobre todo metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Este biogás es empleado como fuente de energía sostenible, lo que permite disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente metano, y favorece la producción de electricidad o calor en la zona. Además, en países como Ecuador, los rellenos sanitarios tienen un gran potencial para aprovechar este recurso y mitigar los problemas energéticos.

#### 3.5.1. Composición del biogás

El biogás es una combinación de gases, principalmente metano y dióxido de carbono, pero también se encuentra conformado por otros gases que también se interactúan dentro de este biogás, es por ello, que se muestran en la Tabla 5, la composición que tiene el biogás.

Tabla 5. Composición de Biogás [20].

Concepto	Valor Promedio %	Rango Típico %
Metano ( $\text{CH}_4$ )	55	50 – 70
Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )	39	30 – 45
Nitrógeno ( $\text{N}_2$ )	4	0.5 - 3
Oxígeno ( $\text{O}_2$ )	1	0 - 1
Hidrogeno ( $\text{H}_2$ )	1	1
<b>Total</b>		100

### **3.5.2. Factores que se necesita para producir el biogás**

J. Rodrigo-Illari y M. Rodrigo-Clavero [23], puntuaron que la producción de biogás en vertederos se ve afectada por factores cruciales como la composición de los residuos, la humedad, la temperatura, y el pH. Residuos que tienen un alto contenido en materia orgánica y una humedad adecuada fomentan la actividad de microorganismos que prosperan sin oxígeno. La temperatura más efectiva, que suele estar entre 30 y 40 grados Celsius, junto con un pH que varía de 6.5 a 8 maximizan la producción de biogás, que está compuesta mayormente por metano y dióxido de carbono.

### **3.5.3. Fases de descomposición**

La Agencia de Protección del Ambiente de los Estados Unidos de América [24], explica que la descomposición de la materia orgánica en los desechos ocurre en varias etapas, destacando la fase IV como la más relevante para este estudio. En esta fase, la composición y la tasa de generación de biogás se estabilizan, con una composición típica de 50-55 % de metano, 45-50 % de dióxido de carbono y 2-5 % de otros gases, como los sulfuros. Este biogás se produce a un ritmo constante durante aproximadamente 20 años. La producción de biogás varía considerablemente de una planta a otra. H, Terraza [25], puntúa algunos de los factores como:

- Temperatura del vertedero
- Contenido de humedad de los residuos
- Composición de los residuos
- Edad de los residuos
- Estructura de los residuos

## **3.6. EXTRACCIÓN Y TRATAMIENTO DEL BIOGÁS**

J. García [26], determinó que las directrices actuales se enfocan en mejorar los pretratamientos y tratamientos aplicados a los residuos en los vertederos para reducir el porcentaje de desechos que se envían a estos lugares. A continuación, se detallan brevemente las técnicas más relevantes que se emplean en las diversas fases de la gestión de residuos sólidos urbanos. La Figura 4 acompaña de forma visual los distintos procedimientos desde la llegada de los residuos hasta su eliminación definitiva en el basurero.



Figura 4. Opciones para valorizar los residuos municipales [27].

### 3.6.1. Pretratamiento

La materia que ingresa a la planta de tratamiento fue procesada para adecuarla a su destino final. Para ello, se abrieron las bolsas de residuos, permitiendo su separación y clasificación. Los desechos no aprovechables son divididos al relleno sanitario. Por otro lado, la materia orgánica recuperada fue sometida a compostaje, generando subproductos útiles. Tras este pretratamiento, quedó lista para continuar con otros procesos según su aprovechamiento [26].

En Latacunga el 15% de los residuos de mercado será destinado al compostaje entre 2020 y 2030, aumentando al 30% entre 2031 y 2044. Del total de residuos orgánicos, el 30% no será apto para compostaje y deberá ser enviado al relleno sanitario [20].

### 3.6.2. Drenaje Pasivo con Chimenea

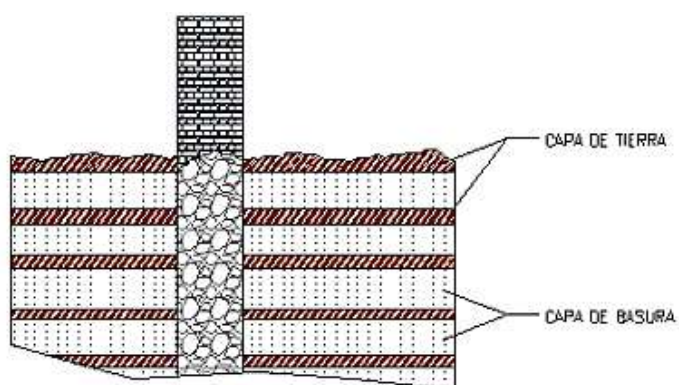
El vertedero sanitario de Latacunga para la captación del biogás producido por los desechos sólidos hace uso de un drenaje pasivo con chimeneas. Este incluye tuberías perforadas de PVC de 110 mm, rodeadas de material pétreo, que conducen el biogás hacia chimeneas ubicadas en una cuadrícula imaginaria con una separación de 50 metros entre ellas. Además, las chimeneas están conectadas a un quemador para la combustión del biogás mediante el sistema de extracción instalado en el sitio, tal como se puede observar en la Figura 3 y Figura 5 [20].



**Figura 5.** Venteo de biogás Latacunga [28].

### 3.6.3. Pozos de tubo perforado

L. Crisanto [19], se refirió a que la construcción de pozos para la recolección de biogás en rellenos sanitarios implica perforar tuberías con orificios que cubran al menos el 10% de su superficie total. Estos pozos, generalmente hechos de tubería plástica como PVC o polipropileno, tienen un diámetro sugerido entre 0.6 y 1.2 metros y aberturas superiores a 2 cm. En algunos lugares, como Latacunga, se utilizan tuberías perforadas de PVC para capturar eficazmente el biogás producido. Sin embargo, debido a la alta concentración del gas recogido, este es incinerado para evitar riesgos como incendios incontrolados y efectos nocivos sobre la salud humana, tales como dolores de cabeza y daños al sistema nervioso.



**Figura 6.** Pozo de tubo perforado [19].

### 3.7. CAPTURA Y TRATAMIENTO DEL BIOGÁS GENERADO

Esto se desarrolla para eliminar las impurezas de los desechos urbanos en el relleno sanitario. Este tratamiento incluye una fase de filtración, la reducción de gases no combustibles como el dióxido de carbono, y la presión si se va a almacenar. L. Arriaza, et al. [29], estableció que el objetivo principal del tratamiento es aumentar el poder calorífico del biogás y cumplir con los requisitos de diversas aplicaciones, como motores y combustibles.

### 3.8. MODELO LandGEM

De acuerdo con R. Ambuludi-Paredes [30], el modelo LandGEM, que se traduce como Modelo de Emisiones de Gases de Vertedero, es una herramienta automatizada creada en Microsoft Excel. Esta aplicación permite calcular las emisiones totales de gases, incluyendo metano, dióxido de carbono, compuestos orgánicos que no son metánicos y otros contaminantes aéreos que se originan en los vertederos de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Este análisis se realiza para un marco temporal específico que se establezca. Además, se puntuó que esta herramienta de Microsoft Excel LandGEM tiene la facilidad de:

- Ingresar datos específicos del vertedero.
- Seleccionar medidas específicas del sitio o aquellos que ya están establecidos por defecto del modelo.
- Visualización e impresión de resultados ya tabulados con su respectiva grafica.

De igual manera, los autores previos R. Ambuludi-Paredes, et al.[30], señalaron que LandGEM maneja una ecuación de tasa de descomposición de primer orden con tipo de regresión exponencial decreciente, la cual, nos da a conocer una estimación de emisiones anuales en el periodo que se establezca en el modelo. Los parámetros  $k$  y  $L_0$  son colocados como valores específicos obtenidos en pruebas de campo, a continuación, se detallará en la Figura 7.

Figura 7. Parámetros del Modelo LandGEM [31].

Los datos necesarios para realizar los cálculos con el modelo LandGEM incluye la Ecuación 1 en donde muestra el área y la capacidad del relleno sanitario, la cantidad anual de residuos recibidos, la constante de generación de metano (k), el potencial de generación de metano ( $L_0$ ) y los años totales de operación del relleno sanitario [32].

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k * L_0 \left( \frac{M_i}{10} \right) * e^{-kT_{ij}} \quad (1)$$

**Donde:**

$Q_{CH_4}$  : Es la generación anual de  $CH_4$  en el año del calculo ( $m^3/año$ ).

$i$ : Es el incremento de tiempo de 1 año.

$j$ : Es el incremento de tiempo de 0.1 años.

$n$ : Es el (año del cálculo) (año inicial de aceptación de residuos).

$k$ : Es la constante generación de  $CH_4$  (año 1).

$L_0$ : Es la capacidad potencial de generación de  $CH_4$  ( $m^3/t$ ).

$M_i$ : Es la cantidad de residuos recibidos en el año  $i$  (t).

$T_{ij}$ : Es la edad de la sección  $j$  de cantidad de residuos  $M_i$  aceptado en el año  $i$ .

### 3.9. MODELO ECUATORIANO

El manual de usuario del modelo Landfill Gas Model de Ecuador (LFG Model, por sus siglas en inglés) [33], ofrece una plataforma automática para calcular la producción y recolección de gas proveniente de vertederos de residuos sólidos urbanos en el país. Este gas es resultado de la descomposición de los desechos sólidos en el vertedero y puede ser extraído utilizando sistemas de purificación que eliminan las impurezas presentes en él. Para calcular la producción y la recolección del gas, es necesario ingresar los siguientes parámetros en la interfaz del modelo ecuatoriano.

- La capacidad de diseño del vertedero.
- La cantidad de residuos depositados en el vertedero y el índice anual de aceptación de residuos del vertedero.
- La constante de la tasa de generación de metano (k).

- La capacidad potencial de generación de metano ( $L_0$ ).
- La eficacia de recogida del sistema de recogida de gases.
- Los años que el vertedero ha estado y estará en funcionamiento.

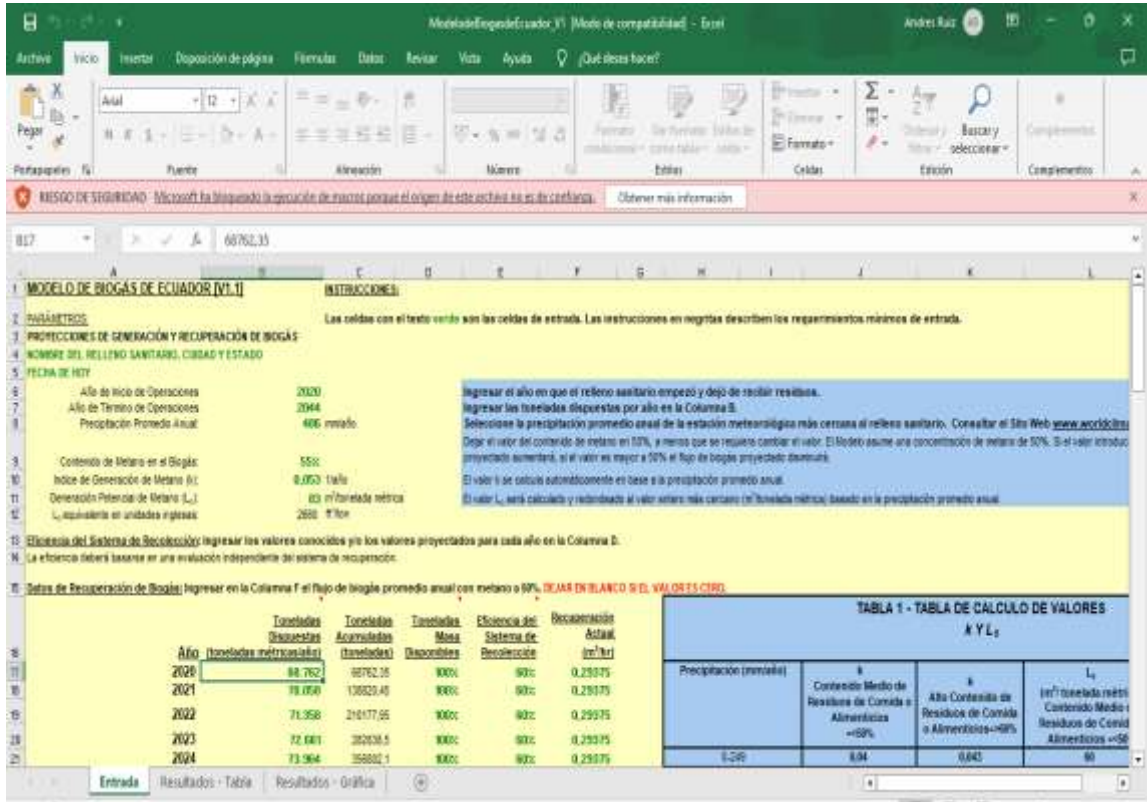


Figura 8. Interfaz del Modelo Ecuatoriano [33].

Para estimar la cantidad de biogás generado se usa la Ecuación 2 del modelo ecuatoriano:

$$Q = \sum_0^n \frac{1}{\%Vol} K * M * L_0 * e^{-k(t-t_{lag})} \quad (2)$$

Donde:

$Q$ : Cantidad total de biogás generado ( $m^3/año$ ).

$n$ : Número total de años modelado.

$\%Vol$ : Porcentaje volumétrico estimado de metano en el biogás del relleno.

$K$ : Índice de generación de Metano ( $\frac{1}{año}$ ).

$M$ : Masa de residuos dispuestos en el año ( $Mg$ ).

$L_0$ : Potencial de generación de metano ( $\frac{m^3}{Mg}$ ).

$t$ : Tiempo en años, desde el inicio de la disposición de desechos.

$t_{lag}$ : Tiempo estimado entre el depósito del desecho y la generación de metano.

Como V. Córdoba [32], sostuvo, el modelo ecuatoriano considera que el gas de vertedero está compuesto aproximadamente por un 50% de metano ( $CH_4$ ) y el resto por dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y otros compuestos en menor proporción. Al igual que el modelo LandGEM, emplea una ecuación de descomposición de primer orden para calcular la generación de biogás en metros cúbicos por minuto ( $m^3/min$ ) y por hora ( $m^3/h$ ), además de estimar su contenido energético en GigaJulios anuales (GJ/año). Este modelo cuenta con una herramienta de cálculo automatizada basada en Microsoft Excel, denominada “Modelo de Biogás V1.1 Ecuador”, de acceso libre en la web.

En el anterior modelo LandGEM se detalló claramente que para obtener los valores de  $k$  y  $L_0$  era necesario calcularlos tomando en cuenta algunos factores del relleno sanitario, mientras que, en el modelo ecuatoriano gracias a un estudio realizado en el año 2007 por V. Córdoba [32], en los rellenos sanitarios de Pichacay y Las Iguanas, ya que han obtenido resultados de gas, la cual han proporcionado un margen de constantes para los parámetros de  $L_0$  y  $k$ . Es por ello que en la Tabla 6 se muestran estos valores tomando en cuenta el tipo de composición de residuos y el rango de precipitación promedio anual según sea el lugar de estudio.

**Tabla 6.** Parámetros de la tasa y potencial de generación de metano [35].

Precipitación (mm/año)	K	K	Lo	Lo
	Alimentación media Residuos ( $\leq 50\%$ )	Alta Alimentación Residuos ( $\geq 65\%$ )	( $m^3$ /Tonelada métrica) Alimentación media Residuos ( $\leq 50\%$ )	( $m^3$ /Tonelada métrica) Alta Alimentación Residuos ( $\geq 65\%$ )
0-249	0.040	0.043	60	62
250-499	0.050	0.053	80	83
500-999	0.065	0.69	84	87

Los vertederos que se inspeccionaron en Ecuador presentaban capas de arcilla, ya sea en estado seco o húmedo, siendo esta última saturada. La utilización de estas capas señala cuán efectivas son para la recolección. También se mencionan áreas que emplean geomembranas como revestimientos. La Tabla 7 proporciona información recomendada sobre la eficiencia de recolección en Ecuador [32].

**Tabla 7.** Eficiencia de recolección en rellenos Sanitarios [35].

Capa de recubrimiento Técnica de recogida	Arcilla saturada / Geomembrana	Arcilla no saturada
Pozos de gas perforados Colectores horizontales	80%	70%
Convertido (existente) Ventilación pasiva	60%	40%

### 3.10. GENERADOR A BIOGÁS

El biogás obtenido se transporta a mediante de una serie de tuberías secundarias hacia una tubería principal. En esta instalación, se lleva a cabo la conversión de la energía química contenida en el biogás en energía mecánica, resultado de la combustión dada dentro de los motores. Según manifestado por A. Barragán [34], mediante generadores eléctricos acoplados a los ejes de los motores, la energía mecánica se transforma en electricidad, la cual es posteriormente transferida a una subestación elevadora para su distribución a los usuarios.

#### 3.10.1. Motogenerador

Según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) [35], señaló que los motogeneradores son los más empleados debido a su alta eficiencia en comparación con turbinas de gas y microturbinas. Tienen un costo por kW inferior al de las turbinas de gas y microturbinas, y están disponibles en diversas dimensiones que se adaptan a los flujos de gas de relleno sanitario (GRS). La eficiencia de estos motores oscila entre el 25% y el 50%.

**Figura 9.** Motor de Combustión Interna [35].**Tabla 8** Información general de tecnología que aprovecha el BGRS [36].

Tecnología	Rangos de flujo Necesarios	Potencia de elemento generador	Eficiencia eléctrica neta	Costes USD / kW
MCI	8–30 m <sup>3</sup> /min	800 kW–3MW	32-45%	1150-1700
Turbinas	>40 m <sup>3</sup> /min	>3MW	25-40%	1400
Microturbinas	<8 m <sup>3</sup> /min	30 kW-200kW	26-32%	5500

### 3.11. COSTOS DE INVERSIÓN

Los costos de inversión abarcan todos los gastos incurridos durante la creación de una planta, desde los estudios de ingeniería y los permisos iniciales, hasta la construcción, la topografía, la adquisición de equipos, la puesta en marcha y los posibles imprevistos [36].

$$\frac{C_1}{C_2} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^P \quad (3)$$

La Ecuación 3, permite calcular la inversión total necesaria la cuál accede a extrapolar los costos de una planta de referencia ya existente y adaptarlos a las características de la planta en cuestión. "C" representa los costos, mientras que "S" simboliza la potencia nominal de las plantas. De acuerdo a O. Ruiz y J. Miguel [36], el subíndice 1 se utiliza para referirse a la planta nueva, mientras que el subíndice 2 hace alusión a la planta ya construida. En el ámbito de la generación eléctrica, es común asignar un valor de 0.75 al factor "p".

### 3.12. COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (O&M)

Estos costos son considerados aquellos recursos necesarios para la operación del sistema como: el personal técnico, insumos, materia prima y servicios básicos, por otra parte, los costos por mantenimiento son necesarios para que la planta no presente fallas durante el funcionamiento de la máquina [27].

En la Tabla 9 se presenta los costos que tiene una central de generación de energía eléctrica, en la cual describe dos tipos de costos como: los costos fijos, por lo tanto estos no varían y son independientes de la producción de energía, mientras que los costos variables se basa en el cambio dependiendo de la magnitud de su producción [27].

**Tabla 9.** Costos de una central de generación eléctrica [27].

<b>Costos Fijos</b>	Intereses
	Retorno de Inversiones
	Impuestos
	Seguros
	Costes Fijos de O&M
<b>Costos Variables</b>	Costos de Combustibles
	Costos variables de O&M

Estos costos son anuales y pueden evaluarse cuantitativamente en base a los costos de inversión empleados, según [36], indica que para las plantas de generación de biogás se considera el 7.4% de la inversión, es decir, que cada año se gastara un 7.4% de esa cantidad en mantener y operar la planta. A continuación, con la Ecuación 4 se procede a calcular los costos de O&M en base a la inversión porcentual.

$$\text{Costos O\&M} = \text{Costo Total (MUS)} \times 7.4\% \quad (4)$$

### 3.13. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA (kWh)

La producción de energía es la cantidad total de electricidad generada por una planta en un periodo determinado, generalmente medido en kilovatios-hora (kWh) o megavatios-hora (MWh). La producción de energía depende de varios factores, como la capacidad instalada de la planta, las condiciones operativas y el factor de planta. El factor de planta refleja la eficiencia de la planta al producir energía en relación con su capacidad máxima, por ello que se indicara en la Ecuación 5 [37].

$$P_E = \text{Potencia Util (kW)} \times \text{Horas Operativas Anuales} \times \text{Factor de Planta} \quad (5)$$

### 3.14. CERTIFICADOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES (CER's)

Los Certificados de Reducción de Emisiones, conocidos como CER's, son medidas de disminución de emisiones de gases de efecto invernadero que cuentan con la certificación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, bajo el esquema del Mecanismo de Desarrollo Limpio. Cada CER representa una tonelada de CO<sub>2</sub> que se ha logrado evitar gracias a iniciativas que capturan o reducen estas emisiones, como la generación de electricidad a partir de biogás o la recolección y combustión de metano en vertederos. Los CER's son comerciables en mercados de carbono, lo que ofrece a empresas y naciones la oportunidad de compensar sus emisiones de CO<sub>2</sub>. En los proyectos que producen electricidad a partir de biogás, los CER's se determinan utilizando la Ecuación 6 que tiene en cuenta la cantidad de biogás generado, la efectividad de la planta y otros factores pertinentes [38].

$$CER's = E_{gen} \times EF_{red} \quad (6)$$

**Donde:**

$E_{gen}$ : Energía generada con biogás (en MWh).

$EF_{red}$ : Factor de emisión de la red eléctrica (en tCO<sub>2</sub>/MWh).

$EF_{red}$ : En Ecuador es de 0.3 tCO/MWh [39].

### 3.15. COSTO DE COMERCIALIZACIÓN DE ENERGÍA

La rentabilidad de una planta de energía depende directamente de la venta de la electricidad que produce. Para evaluar si el proyecto es económicamente viable, es esencial calcular los ingresos que generará. En este estudio, el análisis financiero se basa en el precio de mercado actual de la energía generada por biogás en Ecuador, fijado en 0.11 USD/kWh por las empresas GasGreen y Pichacay. La regulación ARCONEL 031/16 eliminó las tarifas previamente establecidas, lo que obliga a los proyectos a ajustarse a los valores de mercado. Dado que estas compañías han mantenido este precio en la comercialización de electricidad, se toma como referencia para proyectar los ingresos del relleno sanitario de Latacunga. Considerar este precio permite una evaluación más realista de la viabilidad del proyecto, asegurando que los cálculos reflejen las condiciones actuales del mercado energético ecuatoriano [40].

### 3.16. VALOR PRESENTE NETO (VAN)

El método del Valor Actual Neto (VAN) se basa en la comparación del valor presente de todos los costos con el valor presente de todos los ingresos de un proyecto a lo largo de su vida útil. Se analizan las entradas y salidas de efectivo, y tras descontar la inversión inicial, se determina si el proyecto genera ganancias. La Ecuación 7 es la fórmula utilizada para calcular el VAN [36].

$$VAN = \sum_{n=0}^N \frac{F_n}{(1 + d_r)^n} \quad (7)$$

**Donde:**

$F_n$ : Es la tasa de flujo de efectivo Neto.

$d_r$ : Es la tasa de interés efectiva.

$n$ : Es el número total de años en estudio.

Todos estos criterios de evaluación de VAN ya sea para rechazar o aceptar un proyecto se muestran en la siguiente Tabla 10.

**Tabla 10.** Criterios de Evaluar el VAN [36].

<i>Si VAN &gt; 0</i>	La tasa de descuento elegida genera beneficios, se acepta el proyecto.
<i>Si VAN = 0</i>	El proyecto no genera beneficios ni pérdidas, por tal motivo se es indiferente al proyecto
<i>Si VAN &lt; 0</i>	Es proyecto está destinado a tener pérdidas por ende se rechaza el proyecto

### 3.17. TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es un indicador numérico que representa la máxima tasa de interés que un inversionista puede permitirse pagar sin arriesgar su inversión. Es un factor crítico cuando un proyecto depende del financiamiento de un banco, ya que, en tales casos, el proyecto debe generar suficientes ganancias para cubrir la deuda. La TIR también se define como la rentabilidad de un proyecto, expresada en porcentaje. Existe una estrecha relación entre la TIR y el Valor Actual Neto (VAN), ya que la TIR es la tasa que iguala el VAN a cero. La Ecuación 8 es la fórmula estándar para el cálculo de la TIR [36].

$$\sum_{n=0}^N \frac{F_n}{(1-r)^n} = 0 \quad (8)$$

**Donde:**

$F_n$ : Es la tasa de Flujo de efectivo neto.

$r$ : Es la tasa interna de retorno.

$n$ : Es el número total de años en estudio.

Los criterios de evaluación del TIR se muestran en la Tabla 11 donde después de obtener el VAN estos criterios deberán ser tomados muy en cuenta.

**Tabla 11.** Criterios de evaluación (TIR) [36].

<i>Si <math>r &gt; dr</math></i>	La tasa de rentabilidad del proyecto, supera la tasa de corte (VAN = 0) por este motivo se acepta el proyecto.
<i>Si <math>r = dr</math></i>	La tasa de rentabilidad está libre de riesgo, en general los intereses para cuentas de ahorro utilizan este interés.
<i>Si <math>r &lt; dr</math></i>	Es el caso contrario, existiendo así, un alto riesgo de pérdida por ese motivo se rechaza el proyecto.

### 3.18. PERIODO DE RECUPERACIÓN (PBP)

El Plazo de Recuperación (PBP), es un elemento fundamental que se debe tenerse en cuenta antes de realizar una elección de un propósito nuevo. Este indicador representa la cantidad de años necesarios para que los costos totales del proyecto se igualen, es decir, el instante en que

la financiación inicial se recupera mediante de los ingresos generados por el proyecto. La Ecuación 9 más sencilla para calcular el PBP se presenta en la siguiente ecuación [36].

$$PBP = \frac{C_{inv(i)}(USD) - Descuento(USD)}{AnnualEnergySaving(i) \left(\frac{USD}{year}\right)} \quad (9)$$

**Donde:**

$C_{inv(i)}$ : Es el costo de inversión por la implantación de la planta.

$AnnualEnergySaving(i)$ : Son las ganancias brutas, por la venta de energía. Se puede determinar usando la Ecuación 10:

$$AnnualEnergySaving(i) = Rev(i) - C_{O\&M(i)} \quad (10)$$

**Donde:**

$Re v(i)$ : Son los ingresos por la venta de energía eléctrica

$C_{O\&M(i)}$ : Son los costos de operación y mano de obra.

A continuación, en la Tabla 12 se presenta los criterios que deberán ser tomados en cuenta para tomar una decisión en el proyecto.

**Tabla 12.** Criterios rentables para la decisión de proyectos [36].

Tiempo (Años)	Criterio
$Si PBP \leq 1$	Rentabilidad muy alta.
$Si 1 < PBP < 5$	Rentabilidad aceptable o promedio
$Si PBP \geq 6$	Rentabilidad pequeña

#### 4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

Para el desarrollo del presente estudio, se diseñó una metodología estructurada que permitió evaluar la factibilidad y eficiencia de la producción energética. Para empezar, se realizó la identificación y análisis de los residuos sólidos urbanos depositados en el relleno sanitario de Latacunga, los cuales constituyen la materia prima para la generación de biogás. Posteriormente, se procedió a la estimación de la cantidad de biogás producido en el relleno sanitario mediante la aplicación de dos modelos matemáticos como el Modelo LandGEM ampliamente utilizado para la estimación de generación de biogás en rellenos sanitarios, y el Modelo Ecuatoriano, el cuál toma en cuenta condiciones como la cantidad de residuos, las características del relleno sanitario, la constante de la tasa de generación del metano ( $k$ ) y la capacidad potencial de generación de metano ( $L_0$ ).

La aplicación de ambos modelos permitió obtener una visión precisa sobre la producción de biogás. Una vez estimada la cantidad de biogás disponible, se procedió a evaluar su recuperación mediante el promedio obtenido de los modelos antes mencionados. Además, un análisis para la viabilidad fue empleado utilizando el VAN y TIR. Finalmente, la metodología adoptada no solo permite cuantificar el potencial energético del biogás, sino también evaluar la viabilidad económica de su implementación como fuente alternativa de Latacunga. A continuación, se presenta un Diagrama de Flujo representado en la Figura 10 para obtener una ilustración sintetizada de lo previamente mencionado.

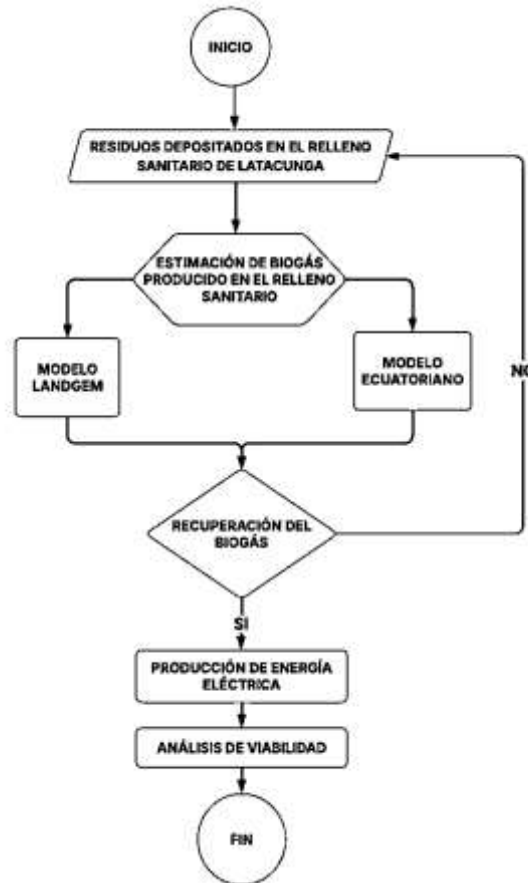


Figura 10. Diagrama de flujo.

#### 4.1. PROYECCIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Con los datos proporcionados del total de residuos (ton/día) que han ingresado al relleno sanitario de Latacunga, se consideró la Ecuación 11, donde se indica que  $y$  es la cantidad de residuos sólidos proyectados a largo tiempo y  $x$  representa los valores del año, para este proyecto de investigación se lo considera entre los años 2024 – 2045, año en que finaliza el ingreso de estos desechos.

$$y = 1.8251x^2 + 1290,3x + 67470 \quad (11)$$

Es por ello, que usando la Ecuación 16 se obtendrá la proyección estimada de residuos sólidos que se presentará en el ANEXO A.

## 4.2. ESTIMACIÓN DE CAUDAL DE BIOGÁS GENERADO Y PROYECTADO CON MODELOS MATEMATICOS.

Para determinar la proyección del biogás fue necesario utilizar la herramienta de Microsoft Excel LandGEM mencionada anteriormente, el cuál fue ajustado para insertar los parámetros calculados según las condiciones climáticas del cantón Latacunga, considerando variables como el índice de generación de metano ( $k$ ) y el índice de generación potencial de metano ( $L_0$ ), el nivel de precipitaciones y la cantidad de residuos orgánicos presentes en el área de estudio.

LandGEM se basa en estos parámetros para la estimación de gases en los vertederos:

- **Tasa de generación de Metano ( $k$ )**

La tasa de generación de Metano ( $k$ ), determina la masa de residuos existente en el vertedero, teniendo como unidad de medida  $\left[\frac{1}{\text{año}}\right]$ , además, se describe el índice en el cual se degradan y producen metano ( $CH_4$ ), se dice que, si  $k$  es mayor, más rápido aumentara la tasa de generación de metano, pero la producción de metano disminuirá con el tiempo siempre y cuando el vertedero deje de recibir residuos sólidos.

Para calcular el valor de  $k$  se obtiene mediante el ANEXO B considerando parámetros como la precipitación promedio anual que conserva un valor fijo de 787 mm/año [41], y el tipo de degradación que tienen los residuos sólidos, para el relleno sanitario de Latacunga se basa en la degradación rápida, moderadamente rápida y muy lenta

- **Degradación rápida:** residuos alimenticios, metería orgánica y un 20% de pañales.
- **Moderadamente rápida:** residuos vegetales, poda de arbustos en casas o parques municipales y papel higiénico.
- **Muy lenta:** madera, caucho, piel, hueso y paja.

Finalmente se utilizará la Ecuación 12 para obtener el valor de  $k$ .

$$k = \frac{\sum \text{Valores del tipo de degradacion}}{N} \quad (12)$$

**Donde:**

$k$ : Índice de generación de metano.

$N$ : Numero de valores que se toman.

- **Potencial de generación de metano ( $L_0$ )**

El potencial de generación de metano detalla la cantidad total de gas que produce una tonelada de RSU, su unidad de medida es  $\left[\frac{m^3}{Mg}\right]$ ,  $L_0$  depende del tipo y composición de los residuos que entran al RS, si el contenido de celulosa de los residuos es mayor, el valor  $L_0$  también será mayor.

En el caso del relleno sanitario Latacunga es necesario calcular los valores  $L_0$  considerando las características del RS, de igual manera el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) describe la Ecuación 13.

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times \frac{16}{12} \quad (13)$$

**Donde:**

$L_0$ : Potencial de generación de metano [ $m^3/T$ ].

$MCF$ : Factor de corrección de metano.

$DOC$ : Carbono orgánico degradable.

$DOC_F$ : Fracción de carbono orgánico biodegradable.

$F$ : Fracción de metano contenido en biogás, se asume típicamente 0,5.

$\frac{16}{12}$ : Este factor corresponde a una constante estequiométrica (cociente de pesos moleculares entre el  $CH_4/C$ ).

- **Factor de Corrección de Metano (MCF):** Este parámetro depende del tipo de relleno y del tipo de manejo que se le dé al mismo, por lo tanto, el relleno sanitario de Latacunga corresponde a un tipo de vertedero de Gestionado Anaeróbico el cual tiene un valor de 1.
- **Carbono Orgánico Degradable (DOC):** Este parámetro depende de la composición de los residuos orgánicos que se encuentra en la Tabla 4 y está establecida por la Ecuación 14.

$$DOC = 0,4 * A + 0,17 * B + 0,15 * C + 0,3 * D \quad (14)$$

**Donde:**

A: Porcentaje de residuos que corresponden a papel, cartón y textiles.

B: Porcentaje de residuos que corresponden a desechos de jardín u orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos).

C: Porcentaje de residuos que corresponden a desechos de alimentos.

D: Porcentaje de residuos que corresponden a madera y paja.

- **Fracción de carbono orgánico biodegradable ( $DOC_f$ ):** es el factor de proporción de carbono disponible convertida en biogás, en la Ecuación 15 se encuentra la temperatura, la cual este pertenecería al cantón de Latacunga con un valor de 20°C [42].

$$DOC_f = 0,014 * T + 0,28 \quad (15)$$

**Donde:**

T: Temperatura °C.

- **Contenido de metano ( $CH_4$ )**

Indica la cantidad de metano que está disponible en el biogás. El metano que se encuentra distribuido en el relleno sanitario contiene una cantidad de metano de entre el 50% a un 70%, pero en el relleno sanitario de Latacunga el contenido de metano es del 55%.

Es por ello que estos parámetros climatológicos del cantón Latacunga se obtuvieron de documentos confiables que tienen estos valores y que se encontraba en el modelo ecuatoriano, y datos que nos facilitó la empresa pública EPAGAL, ya que, serían necesarios para el cálculo respectivo de los valores de  $k$  y  $L_0$ .

#### 4.3. PROYECCIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En primer lugar, se darán a conocer las ecuaciones tal que se usan para calcular el potencial de generación de energía eléctrica en centrales que funciona a biogás.

Para estimar la energía que se puede producir en el relleno sanitario de Latacunga, es necesario considerar algunos parámetros específicos del lugar, como:

- La concentración de metano en el relleno sanitario es del 55% de CH<sub>4</sub>.
- El valor calorífico del metano, que es de 10 kWh/m<sup>3</sup>.
- El rendimiento promedio del motor de combustión interna, que tiene un valor de 46.6%.

Con esta información, se determina la capacidad energética de 1 m<sup>3</sup> de biogás del vertedero utilizando la Ecuación 16 correspondiente.

$$Pot. \text{energetico de biogás} = \% CH_4 \times \text{valor calorifico} \quad (16)$$

$$Pot. \text{energetico de biogás} = 5.5 \text{ kWh/m}^3$$

Con el dato obtenido en la ecuación anterior calculamos la potencia eléctrica neta por año usando el ANEXO E de la recuperación de biogás estimada con lo que se obtiene un valor anual de potencia eléctrica empleando la Ecuación 17, el cuál es mostrado en el ANEXO F:

$$P. \text{elec. neta} = Vol. \text{biogás} \times P. \text{energético} \times \text{eficiencia gen.} \quad (17)$$

Por último, el factor de disponibilidad de planta es un parámetro que indica el porcentaje de tiempo en que una planta de generación está operativa y disponible para producir energía en un período determinado, considerando mantenimientos programados y no programados. Existe un factor de disponibilidad de planta entre el 80% y 90% este factor es crucial para evaluar la eficiencia y rentabilidad de una planta de generación eléctrica.

#### 4.4. ELECCIÓN DEL EQUIPO DE GENERACIÓN

Después de establecer la cantidad de CH<sub>4</sub>, se realizó una solicitud a los productores de generadores a base de biogás para obtener las especificaciones técnicas de las unidades que producen electricidad y en base a fuentes bibliográficas un motogenerador de la marca Jenbacher J312 (4,459 kW) fue elegido como el más óptimo y sus características técnicas se describen en la siguiente Tabla 13.

**Tabla 13 .** Características técnicas del motogenerador [43].

Parámetro	Valor
Modelo	Jenbacher J624
Potencia eléctrica	4,459 kW

Frecuencia (Hz)	60
Eficiencia eléctrica	46.6%
Voltaje de salida	480 V – 13.8kV
Tipo de gas	Biogás
% de CH <sub>4</sub> en biogás	>50
Emisión de NO <sub>x</sub>	< 500 mg/m <sup>3</sup> N
Sistema de refrigeración	Agua
Velocidad del motor	1,500 rpm
Cilindros	24 en V
Peso del motor	52 100 kg

El generador que mejor se adapta a los requerimientos técnicos del Relleno Sanitario de Latacunga es de la marca Jenbacher, ya que permite un aprovechamiento más eficiente del biogás producido en el relleno sanitario.

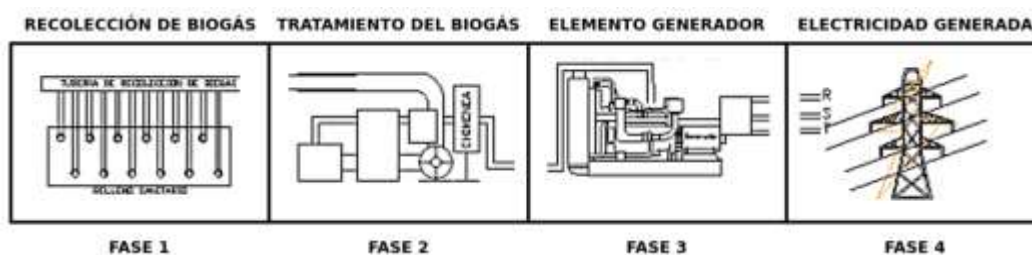


Figura 11. Planta generadora de electricidad mediante biogás de relleno sanitario [36].

#### 4.5. DETERMINACIÓN DE LA INVERSIÓN

En el caso de estudio se evidencio que se puede implementar una planta con capacidad final de 4,459 MW. A continuación, se procederá con los cálculos de inversión calculados tomando como referencia a la planta del relleno sanitario Inga I e II [19], y dos centrales que se mencionan en [36]. El costo final de la planta se lo obtiene mediante el promedio de los resultados obtenidos y presentados en la Tabla 14.

- **Cálculo del costo Total de la Planta de 4,459 MW**

**Donde:**

$C_1$  = Costo estimado para la planta de 4.459 MW.

$C_2$  = Costo de la planta de referencia (en Millones de USD, MUS)

$S_1$  = Potencia de la planta en estudio (4.459 MW)

$S_2$  = Potencia de la planta de referencia

$P = 0.75$  (Factor de escala para generación eléctrica)

- **Datos de las plantas de referencia**

**Tabla 14.** Las tres plantas que usamos como referencia tienen los siguientes datos [36].

Planta de referencia	Capacidad $S_2$ (MW)	Costo $C_2$ (MUS)
Planta 1	5.00	8.96
Planta 2	4.50	6.30
Planta Inga I y II	5.00	6.03

#### 4.6. CÁLCULOS DE LOS COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (O&M)

Estos costos son considerados aquellos recursos requeridos para el funcionamiento del sistema tales como, el equipo técnico, suministros, materia prima y servicios básicos, por otra parte, los costos por mantenimiento son necesarios para que la planta no presente fallas durante el funcionamiento de la máquina, es por ello, que para una planta de 4.459 MW se necesitarían 110.711 USD/kWh para estos costos.

#### 4.7. DETERMINACIÓN DE INGRESO POR COMERCIALIZACIÓN Y CER's

En esta sección analizamos cuánto dinero puede generar la planta a partir de la comercialización de energía eléctrica y los Certificados de Reducción de Emisiones (CER's), tomando en cuenta los precios del mercado.

##### 4.7.1. Determinación del Costo de Comercialización de Energía

Para las plantas de biogás que utilizan esta tecnología como el Inga I, II y Pichacay lo cual se ha estimado una tasa de descuento 8.5% para plantas de biogás de tal cual se evidencia en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Costo de Comercialización de Energía.

Empresa	Factor de planta	Tasa de descuento	Costo USD/kWh
EPAGAL	80.00%	8.5%	0.11
GASGREEN	89.83%	8.5%	0.11
PICHACAY	67.69%	8.5%	0.11

#### 4.7.2. Ingresos por venta de energía

Los ingresos por venta de energía son el flujo de dinero generado por la venta de la electricidad que una planta de energía produce. Se calculan utilizando la Ecuación 18, en donde, se multiplicando la cantidad de energía producida (kWh o MWh) por la tarifa de venta de energía acordada. La tarifa de venta puede estar sujeta a regulación o depender del mercado eléctrico [37].

$$I_E = \text{Produccion Energia} \times \text{Tarifa de Venta} \quad (18)$$

#### 4.7.3. Ingresos por CER's

Los ingresos por CER's son los ingresos obtenidos de la venta de los bonos de carbono, que representan la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> que se han evitado gracias a proyectos de energía limpia., es por ello que se obtiene de la Ecuación 19.

En base al Informe Técnico Convenio EMGIRS EP – GSGREEN S.A. se estimó algunos valores a considera para la rentabilidad de nuestros cálculos como es el precio de venta del CER's que es de 2.75 USD por cada bono de carbono [44].

$$\text{Ingresos por CERs (USD)} = \text{Produccion CERs (MWh)} \times \text{Precio CER's} \quad (19)$$

### 4.8. VALOR ACTUAL NETO (VAN)

Para obtener el VAN de este proyecto de generación de energía eléctrica a base de biogás, como primer punto se estiman los flujos de caja netos anuales, tomando en cuenta el costo de comercialización de energía y los CER's, lo cual resta los costos de O&M y de inversión. Luego, estos flujos se descuentan a una tasa de descuento de referencia para proyectos energéticos de este tipo de tecnologías, es por ello, que, si es positivo, el proyecto es viable financieramente.

### 4.9. TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

Para determinar la TIR y saber si el proyecto es rentable se calcula mediante los flujos de caja anuales y la inversión inicial que se encuentra en la fórmula del VAN, considerado que la TIR debe ser mayor que la tasa de descuento.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

El Relleno Sanitario de Latacunga, está a 3000 msnm y es una instalación clave para la gestión de residuos sólidos urbanos en el cantón. el cual contiene una cantidad promedio anual de 71,360,42 Ton/año desde el año 2020 hasta el año 2024 Esta planta, cuenta con un funcionamiento desde el año 2020, el cual no solo implica la disposición final de desechos no aprovechables, sino que también ha representado una oportunidad para la generación de biogás y, consecuentemente, la producción de energía eléctrica. Tiene una proyección de generación de energía a través de biogás hasta el año 2045.

El presente capítulo proporcionó resultados acerca de la factibilidad económica de la generación de energía eléctrica a partir del biogás, tomando como base datos provenientes del capítulo anterior. Para ello, se evaluó el volumen de residuos sólidos urbanos y su potencial de biogás, considerando modelos matemáticos previamente mencionados. Asimismo, se obtuvo el resultado de la recuperación del biogás y su conversión en electricidad mediante tecnología de motores de combustión interna (MCI). Finalmente, se realizó un análisis económico para determinar la rentabilidad del proyecto, integrando costos operativos e ingresos por la venta de energía y los CER's.

### 5.1. RESULTADOS DEL VOLUMEN DE RSU

Considerando que al relleno sanitario de Latacunga únicamente llegarán los desechos que no pueden aprovecharse, las cantidades a disponer y el volumen requerido de relleno serán los mostrados en el ANEXO A.

La Figura 12 indica una gráfica en donde se encuentran los datos resultantes que se obtuvieron a partir de la Ecuación 11, en donde muestra su crecimiento de residuos sólidos en el relleno sanitario de Latacunga comenzando su análisis desde el año 2025 hasta el año 2045 mismo que será cerrado.

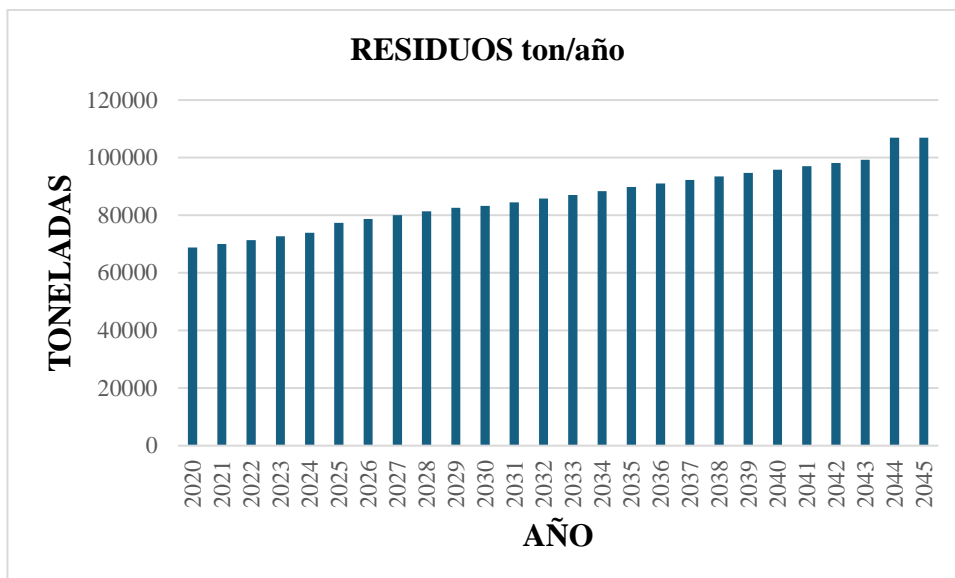


Figura 12. Estimación de residuos del relleno sanitario Latacunga 2020 – 2045.

## 5.2. RESULTADOS Y ANÁLISIS DEL BIOGÁS APROVECHABLE

### 5.2.1. Resultados del modelo LandGEM.

Como se mencionó anteriormente los valores de  $k$  y  $L_0$  deben ser calculados con parámetros adicionales. A continuación, se mostrará más a detalle el cálculo de estos parámetros.

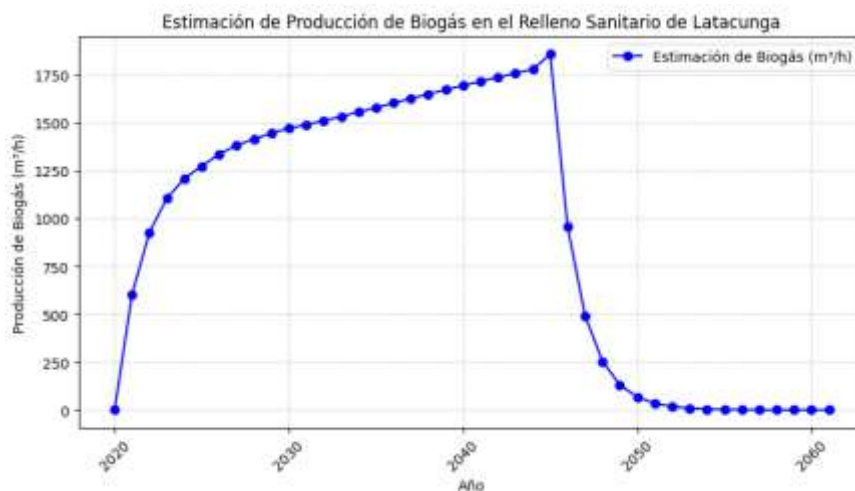
- **Cálculo de la tasa de generación de Metano ( $k$ )**

Para obtener el valor de  $k$  se debe tener presente el parámetro de precipitación promedio anual del Cantón Latacunga, resultando de 787 mm/año. Con este dato se considera que en el cantón Latacunga tiene un clima moderadamente Seco, una vez mencionado se revisa el tipo de degradación en el ANEXO B. De modo que usando la Ecuación 12, se obtiene una tasa de generación de metano de  $0.663 \text{ año}^{-1}$ .

- **Cálculo del Potencial de generación de metano ( $L_0$ )**

En el cálculo del potencial de generación de metano ( $L_0$ ) se usará la Ecuación 13, en donde, resulta gracias al cálculo de otros variables que dependen del relleno sanitario y de la temperatura teniendo así un potencial de generación de metano ( $L_0$ ) de  $0.8458 \left[ \frac{m^3}{T} \right]$

Los datos de  $k$ ,  $L_0$  y la cantidad de residuos anuales ubicados en el ANEXO A son ingresados en la herramienta de Excel modelo LandGEM lo que demuestra una estimación del biogás del relleno sanitario proyectados hasta el año 2057 año en que bajaría la producción de biogás este detalle se presenta en el ANEXO C, mientras que en la Figura 13 se aprecia como la producción de biogás va en aumento hasta el año 2045 con una producción de  $1,857.6 \text{ m}^3/\text{h}$ .

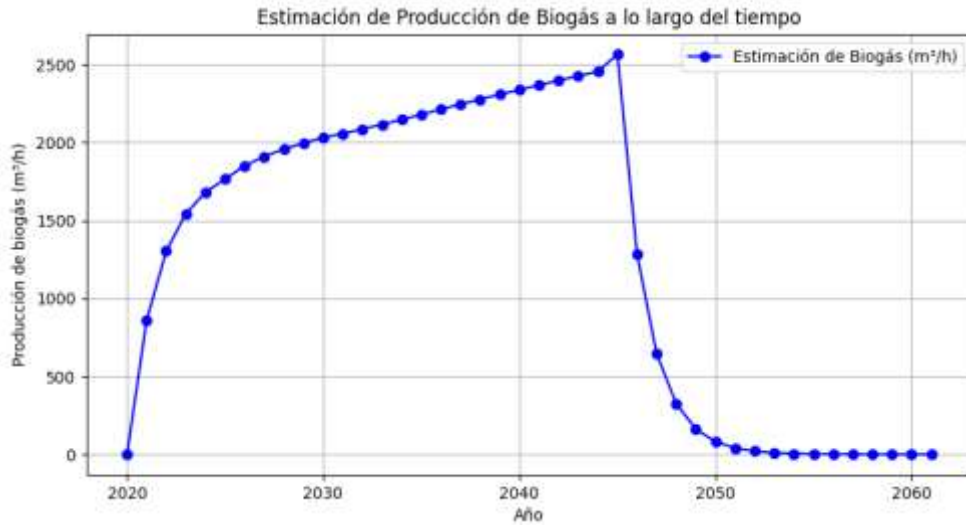


**Figura 13.** Estimación del biogás en el RS de Latacunga considerando el modelo LandGEM.

### 5.2.2. Resultados del Modelo Ecuatoriano.

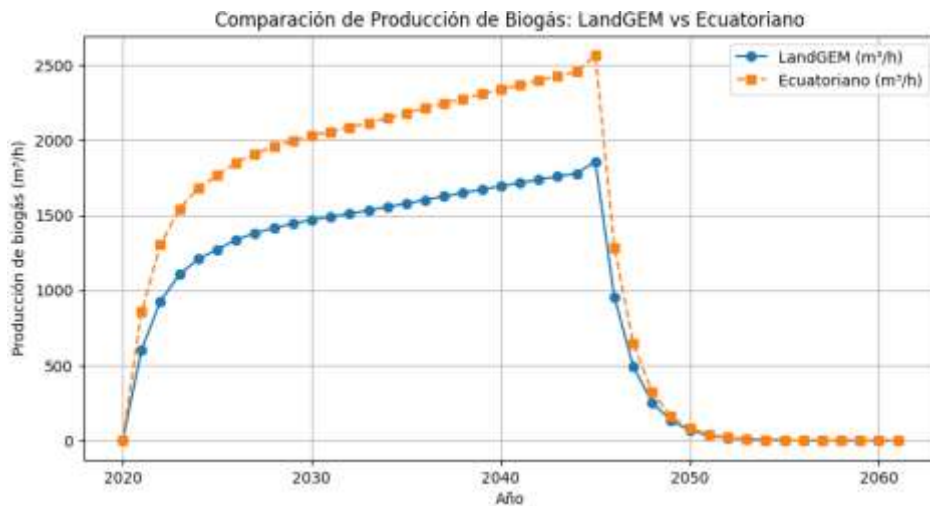
Como se mencionó anteriormente, en el modelo ecuatoriano los cálculos son despreciables, ya que la obtención de los parámetros  $k$  y  $L_0$  requiere considerar la información de la Tabla 6, donde se toma en cuenta la precipitación, y en la Tabla 7 proporciona la eficiencia de recolección para los rellenos sanitarios.

Una vez ingresados estos parámetros en el modelo Ecuatoriano de Microsoft Excel se genera una producción de biogás, tal que, estos datos son presentados en el ANEXO D cuya proyección es hasta el año 2058, año en que la producción llega a  $0 \text{ m}^3/\text{h}$  demostrada en la Figura 14.



**Figura 14.** Comportamiento del biogás en el RS de Latacunga considerando el modelo ecuatoriano.

Como se pueden apreciar en las Figuras 13 y 14, en donde los resultados generados por cada modelo muestran un aporte de generación de biogás diferente. La Figura 15 da a conocer el comportamiento del biogás a una proyección futura con respecto a los dos modelos matemáticos, la variación que se tiene entre las dos curvas es porque estos dos modelos trabajan con una información diferente.



**Figura 15.** Comparación de la Generación de Biogás por cada modelo matemático.

### 5.2.3. RESULTADOS DE LA RECUPERACIÓN DEL BIOGÁS

Habiendo presentado los resultados de los dos modelos se aprecia que este es un gas no aprovechable, es por ello que se toma en cuenta la eficiencia de recuperación para aprovechar una cantidad considerable de biogás.

Para el Relleno Sanitario de Latacunga se asume un sistema de eficiencia de recuperación de biogás medio del 71 %. Con el Biogás generado por cada modelo matemático y la eficiencia de recuperación, se aplicará la Ecuación 26 ya que estimará el biogás que será aprovechable para la generación eléctrica.

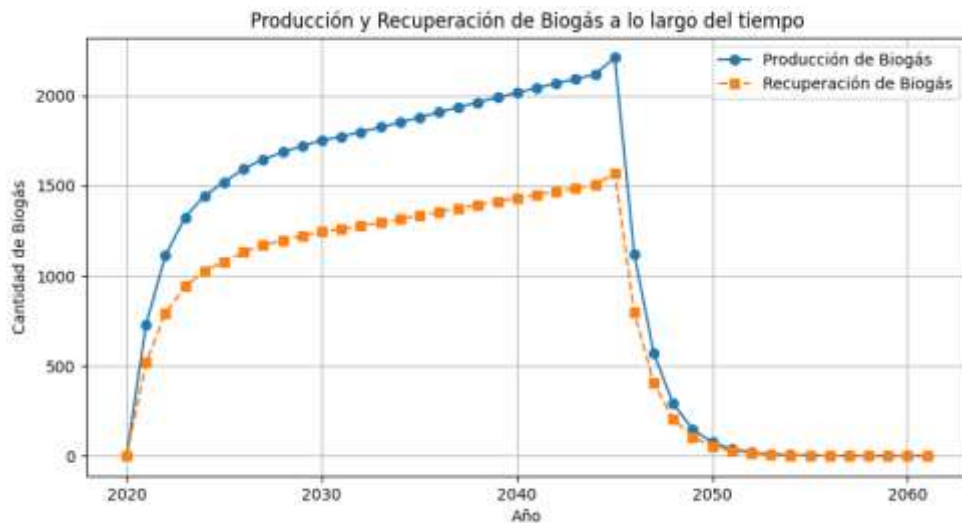
$$Biogas_{recuperable} = \frac{Q_{LandGEM} + Q_{ecuatoriano}}{2} \times \gamma \quad (26)$$

**Donde:**

$\gamma$ : Eficiencia de recuperación

$Q_{LandGEM,ecuatoriano}$ : flujo de biogás producido por cada modelo

En el ANEXO E se detalla el promedio de biogás obtenido de los modelos anteriores, y la estimación del biogás recuperado. Por lo tanto, en la Figura 16 se muestra la cantidad de biogás generado por los dos modelos y la cantidad de biogás recuperado para el uso energético.



**Figura 16.** Recuperación de biogás aprovechable y el promedio de biogás generado en el RS de Latacunga.

El modelo ecuatoriano gracias a los valores de  $k$  y  $L_0$ , mostró cifras superiores en la generación de biogás, alcanzando un pico en el año 2045 con un valor de 2566 m³/h. En contraste, el modelo LandGEM exhibió cifras más bajas, llegando a un máximo en el año 2045 un valor de 1857,6 m³/h.

Otro de los elementos que puede llegar variar el resultado final es el valor promedio de la precipitación mm/año ya que en el modelo LandGEM la eficiencia de recuperación bajaba

gracias a sus respectivos cálculos y en el modelo ecuatoriano se basa en la Tabla 7. A pesar de esto la diferencia entre estos valores, no se encuentran tan alejados.

### **5.3. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA DISPONIBLE**

El estudio acerca del aprovechamiento de producción de energía eléctrica a través de biogás en el vertedero de Latacunga se llevó a cabo utilizando un motogenerador, ya que ofrece un mejor rendimiento en comparación con turbinas y microturbinas. Para el cálculo de la energía y potencia disponible, se consideraron factores clave como la eficiencia del generador y las horas de operación, estableciendo un factor de disponibilidad del 80%, de acuerdo con estudios previos [36].

Según el ANEXO F, la potencia eléctrica útil (kW) del biogás generado en el relleno sanitario de Latacunga ha mostrado un crecimiento constante a lo largo del tiempo. Este incremento es lógico, ya que la acumulación de residuos aumenta la producción de biogás. En base a este análisis, se determinó la necesidad de un motogenerador de 4.459 MW, tomando en cuenta que la eficiencia del generador en este estudio es del 46.6%, según el fabricante.

Un aspecto crucial a considerar es la influencia de la altitud en el rendimiento del motor. A mayor altitud, la menor presión atmosférica reduce la concentración de oxígeno, afectando la combustión y, por ende, la eficiencia del generador. Se estima una reducción de rendimiento del 1% al 1.5% por cada 100 metros sobre el nivel del mar [36]. En este caso, la planta de generación estará ubicada a 3,000 msnm. Sin embargo, los generadores Jenbacher, utilizados en rellenos sanitarios como Inga I y II, están diseñados para operar en condiciones de altura, ya que cuentan con turbocompresores de alta eficiencia que compensan la falta de oxígeno, permitiendo mantener la potencia nominal incluso a grandes altitudes.

La producción de energía eléctrica promedio anual es de 24.53 GWh considerando un consumo promedio de 143.36 kWh/mes se estima que esta generación de energía permitiría abastecer aproximadamente a 14,264 hogares. Esto representa el 10.2% del total de clientes residenciales de la provincia de Cotopaxi, que asciende a 139.794. Este porcentaje indica un impacto significativo en la cobertura de la demanda residencial a través de una fuente de energía alternativa y sostenible.

En términos de producción, la generación de energía eléctrica promedio anual es de 24.53 GWh. Con un consumo residencial promedio de 143.36 kWh/mes, esta energía podría abastecer aproximadamente a 14,264 hogares. Esto demuestra el impacto significativo del proyecto en la cobertura de la demanda residencial a través de una fuente de energía renovable y sostenible.

Además de la generación de electricidad, el sistema basado en biogás contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Se estima una reducción anual de 7,359.94 tCO<sub>2</sub>. Para ponerlo en perspectiva, considerando que un vehículo promedio emite alrededor de 4.3 toneladas de CO<sub>2</sub> al año, esta reducción es comparable a retirar de circulación aproximadamente 1,712 vehículos cada año.

#### 5.4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ECONÓMICA DEL PROYECTO

Como se puede observar en la Tabla 18 se consideraron tres centrales de la misma tecnología y con potencias similares con el objetivo de obtener una estimación promedio de inversión para la implementación de la central de generación de biogás en el Relleno Sanitario de Latacunga.

**Tabla 16.** Inversión estimada de la Planta de generación de Biogás [45].

Central	Planta Referencial MW	Inv. Referencial MUS\$	Planta EPAGAL MW	Costo Promedio MUS\$
Planta 1	5.0	8.96	4,459	6,671,065,31
Planta 2	4.5	6.30		
Inga I, II	5.0	6,03		

El análisis nos llevó a un costo referencial de acuerdo al mercado de 0.11 USD/kWh para nuestra planta generadora de 4,459 MW. A lo largo de los 18 años de operación, los costos de mantenimiento y operación (O&M) se han mantenido en un promedio de 493,761.87 USD lo que brinda estabilidad en los egresos del proyecto.

El flujo de inversiones se calcula restando el ingreso menos el egreso donde se tomó también en cuenta la venta de los CER's para la recuperación pronta de la inversión.

En la siguiente Tabla 17 se presentará un resumen de los resultados obtenidos del análisis económico del relleno sanitario Latacunga con una planta generadora de 4.459 MW.

**Tabla 17.** Análisis Económico.

	<b>GASGREEN</b>	<b>RS de Latacunga</b>
<b>VAN (\$)</b>	\$ 11,301,391.77	\$ 11,853,969.14
<b>TIR (%)</b>	21%	31%
<b>PBP (tiempo)</b>	3 años, 5 meses	4 años
<b>USD/kWh</b>	0.11	0.11

La comparación entre los proyectos de generación eléctrica GasGreen y el Relleno Sanitario de Latacunga revela diferencias clave en rentabilidad y eficiencia. El RS de Latacunga tiene la mayor rentabilidad con una TIR del 31%, superando el 21% de GasGreen, lo que indica un mejor desempeño financiero. Sin embargo, GasGreen recupera su inversión en solo 3 años, 5 meses, en comparación a los 4 años del Relleno Sanitario de Latacunga, lo que implica un retorno más rápido del capital. En cuanto al VAN, ambos proyectos son rentables, con GasGreen en \$11.3 MUSD y el RS de Latacunga en USD11.85 MUSD, lo que confirma su viabilidad.

Respecto al costo de comercialización de energía, GasGreen y el relleno sanitario de Latacunga presentan el mismo valor de 0,11 USD/kWh, ya que este fue tomado de una Ley presentado por la ARCONEL para la empresa de GasGreen en donde hasta la actualidad conserva el mismo precio.

En general, el proyecto es rentable, con un VAN positivo, pero la decisión depende del objetivo financiero. del RS de Latacunga ya que es la mejor opción en términos de rentabilidad, mientras que GasGreen es ideal si se prioriza un retorno rápido del capital. Por otro lado. Es recomendable comparar el precio de comercialización de energía de este tipo de tecnología con las tarifas actuales del mercado para evaluar su competitividad frente a otras fuentes de generación.

Para determinar la factibilidad del proyecto de generación de energía eléctrica a partir de biogás en el relleno sanitario del cantón Latacunga, se analizaron los flujos de caja proyectados en función de los ingresos por venta de energía y la obtención de certificados de reducción de emisiones (CER's). A continuación, en el ANEXO G se presenta un resumen de los resultados económicos clave.

El análisis del flujo de caja demuestra que el proyecto de generación de energía eléctrica con biogás en el relleno sanitario de Latacunga es rentable desde su primer año de operación,

alcanzando la recuperación de la inversión inicial en 2031, cuando el flujo de caja acumulado supera los 6.67 millones de USD invertidos. Con costos operativos estimados en un 7.4% de la inversión inicial (aprox. 493,761.87 USD/año), la rentabilidad está asegurada gracias a los ingresos por venta de energía y la comercialización de Certificados de Reducción de Emisiones (CER's), cuyo precio se estima en 2.75 USD por unidad, además, considerando que desde el año 2028 hasta el año 2045 se obtiene un total de ingresos por CER's de 364,316.82 \$.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

El análisis de la producción de biogás en el relleno sanitario de Latacunga confirma su viabilidad como fuente de generación eléctrica. Se estima que el procesamiento de 250 toneladas diarias de residuos, equivalentes a 91,256 toneladas anuales, permitirá generar un volumen de biogás de aproximadamente 1,365 m<sup>3</sup>/h, con un potencial energético de 5.5 kWh/m<sup>3</sup>. Esta capacidad de producción posibilita una generación eléctrica promedio de 24.53 GWh al año. Además, la producción de biogás experimentará un crecimiento progresivo en el tiempo, alcanzando su punto máximo en 2045 con un flujo de 1,570 m<sup>3</sup>/h, lo que garantiza un suministro energético confiable y sostenible a largo plazo.

El proyecto genera un ingreso adicional de 20,239 USD/año en promedio por la venta de bonos CER's, lo que mejora su rentabilidad y refuerza su contribución a la producción de energía limpia, además de los ingresos obtenidos por la venta de energía.

El análisis económico demuestra que con un costo de venta de 0.11 USD/kWh genera una TIR del 31 % lo cual es más alto que la tasa de descuento del 8,5 %, valor referencial para este tipo de proyectos. Esto indica que el uso de residuos de los rellenos sanitarios como materia prima para la producción de energía eléctrica ofrece oportunidades rentables.

### **RECOMENDACIONES**

Se sugiere, actualizar los costos de la inversión al momento de tomar una decisión de implementación teniendo en consideración equipos eficientes que permitan el mejor aprovechamiento del Biogás existente en el relleno sanitario de Latacunga.

Es aconsejable, buscar convenios estratégicos con empresas gubernamentales e internacionales, con el fin de obtener incentivos financieros, además, es importante revisar la normativa eléctrica ecuatoriana en busca de políticas que incentiven la producción de este tipo de energías.

Se recomienda que, para asegurar el uso continuo del proyecto, es muy importante incentivar en la capacitación del personal técnico que se encuentra en el área de operación y mantenimiento de la planta de biogás. Un programa de formación permitirá al personal responder efectivamente ante posibles fallos que ocurra en la planta, por otro lado, es importante

realizar un plan de mantenimiento preventivo y correctivo para una mejor durabilidad y rendimiento en los equipos.

## 7. REFERENCIAS

- [1] “4.-EXPANSION-DE-LA-GENERACION.pdf”. Consultado: el 9 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.recursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/4.-EXPANSION-DE-LA-GENERACION.pdf>
- [2] “OT-44416\_Libro-Blanco\_paginas.pdf”. Consultado: el 9 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2021/05/OT-44416\\_Libro-Blanco\\_paginas.pdf](https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2021/05/OT-44416_Libro-Blanco_paginas.pdf)
- [3] “Ecuador, ahogado en basura, está lejos de cumplir las metas de los ODS al 2030 - Plan V”. Consultado: el 9 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://planv.com.ec/historias/ecuador-ahogado-basura-esta-lejos-cumplir-metas-ods-al-2030/>
- [4] ING. J. ING. GUEVARA CARRILLO, “Parte-1-Informe-Anual-CENACE-2023”, 2023. Consultado: el 9 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cenace.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/04/Parte-1-Informe-Anual-CENACE-2023.pdf>
- [5] C. A. Forero Nuñez, C. A. Guerrero Fajardo, y F. E. Sierra Vargas, “Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación”, *ITECKNE Innov. E Investig. En Ing.*, vol. 9, núm. 1, pp. 21–30, 2012.
- [6] P. E. P. Martínez, “BIOMASA: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTAR UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE RESIDUOS VEGETALES”.
- [7] F. A. O. Landázuri, “MECANISMOS PARA LA PROMOCIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL ECUADOR”.
- [8] M. A. L. Navarro, W. W. Larco, A. P. Piretta, y G. B. Zeisler, “MODELO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOMASA FORESTAL”.
- [9] C. A. S. Zambrano, “Energías renovables y alternativas como fuente de desarrollo económico: Determinación de un plan de negocios para el municipio de Zapatoca, Santander”.
- [10] K. Zhang *et al.*, “Modeling and utilization of biomass-to-syngas for industrial multi-energy systems”, *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 7, núm. 5, pp. 932–942, sep. 2021, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.06190.
- [11] R. E. Guzmán, “Econ. RAFAEL CORREA DELGADO”.
- [12] “CAP 1.pdf”, Google Docs. Consultado: el 9 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://drive.google.com/file/d/1CAvX2LfFeaaUJEMNA8NjX1h6wrqi98A1/view?usp=sharing&usp=embed\\_facebook](https://drive.google.com/file/d/1CAvX2LfFeaaUJEMNA8NjX1h6wrqi98A1/view?usp=sharing&usp=embed_facebook)

- [13] “López Montero, J. (2023) Energía Renovable y Crecimiento Economico en el Ecuador.pdf”. Consultado: el 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/11441/1/L%C3%B3pez%20Montero%20J.%20%282023%29%20Energ%C3%ADa%20Renovable%20y%20Crecimiento%20Economico%20en%20el%20Ecuador.pdf>
- [14] M. F. L. Rojas y E. M. S. Sandoval, “La Biomasa como fuente de generación de energía eléctrica en el Ecuador: The Biomass as a source of electrical energy generation in Ecuador”, *Rev. Científica Multidiscip. G-Nerando*, vol. 5, núm. 1, Art. núm. 1, jun. 2024, doi: 10.60100/rcmg.v5i1.189.
- [15] “Incentivos financieros por la reducción de CO2 en el relleno sanitario Pichacay en Cuenca”. Consultado: el 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.caf.com/es/actualidad/noticias/2021/09/incentivos-financieros-por-la-reduccion-de-co2-en-el-relleno-sanitario-pichacay-en-cuenca-1/>
- [16] “Gasgreen Energia (ECU)”. Consultado: el 22 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.jenbacher.com/es/casos-de-estudio/gasgreen-energia-ecu>
- [17] S. Torri, “¿Qué es un relleno sanitario?”, *Cent. Estud. Desarro. Políticas Públicas*, may 2017.
- [18] “FASE\_I\_Diagnostico\_y\_Factibilidad\_Agosto2020\_revDA010”.
- [19] “UPS - KT00806.pdf”. Consultado: el 21 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6350/6/UPS%20-%20KT00806.pdf>
- [20] “FASE\_II\_Diseño\_Definitivo 2021”.
- [21] D. C. Zuñiga y G. Enrique, “LÍNEA DE INVESTIGACIÓN”.
- [22] “content.pdf”. Consultado: el 10 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/826afa4d-16aa-4446-85ea-1067868846c9/content>
- [23] J. Rodrigo-Ilari y M.-E. Rodrigo-Clavero, “Mathematical Modeling of the Biogas Production in MSW Landfills. Impact of the Implementation of Organic Matter and Food Waste Selective Collection Systems”, *Atmosphere*, vol. 11, núm. 12, Art. núm. 12, dic. 2020, doi: 10.3390/atmos11121306.
- [24] “LFG Energy Project Development Handbook”.
- [25] “Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization | Publicaciones”. Consultado: el 14 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/publications/english/viewer/Guidance-Note-on-Landfill-Gas-Capture-and-Utilization.pdf>
- [26] “El tratamiento de los residuos sólidos urbanos (RSU). (I) - Ingeniería Química”. Consultado: el 20 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/295-el-tratamiento-de-los-residuos-solidos-urbanos-rsu-i>

- [27] C. D. González, “Despacho económico de cargas en sistemas eléctricos de potencia: modelado, simulación y análisis”.
- [28] “Auditoría Expost del Relleno Sanitario de Latacunga”. Consultado: el 21 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.cectiedu.com/auditoria-expost-del-relleno-sanitario-de-latacunga.html>
- [29] D. Á. L. Arriaza, L. N. Lazo, Á. V. Musalem, y B. G. Córdova, “MODELO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS PRODUCIDO EN RELLENOS SANITARIOS”.
- [30] R. R. Ambuludi-Paredes, V. P. Carvajal-Padilla, K. Diéguez-Santana, R. R. Ambuludi-Paredes, V. P. Carvajal-Padilla, y K. Diéguez-Santana, “Estimación de gas metano mediante el modelo LandGEM del relleno sanitario municipal de residuos sólidos de Patate-Pelileo, Tungurahua, Ecuador”, *Rev. Tecnol. En Marcha*, vol. 35, núm. 1, pp. 67–78, mar. 2022, doi: 10.18845/tm.v35i1.5413.
- [31] “P1009C8L es”.
- [32] V. Córdoba, “MODELADO DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS”.
- [33] V. Ludwig, “Ministerio de Medio Ambiente Ministerio Desarrollo Urbano y Vivienda Gobierno de Preparado en nombre”.
- [34] E. A. Barragán, P. D. Arias, y J. Terrados, “FOMENTO DEL METABOLISMO ENERGÉTICO CIRCULAR MEDIANTE GENERACIÓN ELÉCTRICA PROVENIENTE DE RELLENOS SANITARIOS”, *Ingenius*, núm. 16, p. 36, oct. 2016, doi: 10.17163/ings.n16.2016.05.
- [35] “Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico | Publicaciones”. Consultado: el 26 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/Generaci%C3%B3n-de-electricidad-a-partir-de-biog%C3%A1s-capturado-de-residuos-s%C3%B3lidos-urbanos-Un-an%C3%A1lisis-te%C3%B3rico-pr%C3%A1ctico.pdf>
- [36] O. Ruiz y J. Miguel, “Valoración de la producción de energía eléctrica a partir del biogás que se genera en el relleno sanitario Ceibales de la ciudad de Machala”.
- [37] A. Levy, D. Messina, y R. C. Lisperguer, “Definiciones del sector eléctrico para la incorporación de las energías renovables variables y la integración regional en América Latina y el Caribe”.
- [38] O. L. Yeni, “Obtención de la certificación de “Carbono Neutro” y su impacto en la creación de valor empresarial: resultados de casos reales.”.
- [39] A. G. Savinovich, S. R. F. Naranjo, y R. E. Q. Veliz, “MINISTRO DE ENERGÍA Y MINAS”.

- [40] “Resolución 031-16 - Deróguese la Codificación de la Regulación No. CONELEC 001-13 para ‘La Participación de los generadores de energía eléctrica producida con Recursos Energéticos Renovables No Convencionales’”, vLex. Consultado: el 23 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://vlex.ec/vid/deroguese-codificacion-regulacion-no-643952329>
- [41] D. B. Cárdenas, I. Á. Plazarte, S. N. Ávila, I. Fernando, y R. Tello, “Consejo Planificación del GAD Municipal del Cantón Latacunga”.
- [42] “Latacunga – Prefectura Cotopaxi”. Consultado: el 26 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://test.cotopaxi.gob.ec/index.php/latacunga/>
- [43] “Jenbacher J312”. Consultado: el 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.jenbacher.com/es/motores-de-gas/motor-jenbacher-tipo-3/j312>
- [44] “17220241002170258.pdf”. Consultado: el 14 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: [http://erp.emgirs.gob.ec:8080/files\\_erp/upload/respuesta/17220241002170258.pdf](http://erp.emgirs.gob.ec:8080/files_erp/upload/respuesta/17220241002170258.pdf)
- [45] “content.pdf”. Consultado: el 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ruja.ujaen.es/server/api/core/bitstreams/283418c7-9b87-428c-b01f-938d899ac4ec/content>