



ESCUELA DE POSGRADOS

**“Factibilidad de generación de energía eléctrica del Complejo
Ambiental del DMQ”**

Maestría en Gestión Integral de Residuos Sólidos

Paula Barrera Peñaherrera

Director: Félix Schmidt

Cuenca, Ecuador 2026

Dedicatoria

Dedico el presente trabajo a mis padres, Anita y Jonny, por apoyarme incondicionalmente en cada etapa de mi vida, todo lo que soy es gracias a su amor incondicional. ¡Es por y para ustedes!

Agradecimiento

A Gestión y Tecnología del Medioambiente GTM S.A por permitirme crecer personal y profesionalmente durante todos estos años siendo parte de su equipo, gracias por creer en mí.

A EMGIRS-EP por facilitarme la información técnica necesaria para el desarrollo de esta investigación, permitiendo el análisis de datos reales del sistema de captación y aprovechamiento de biogás.

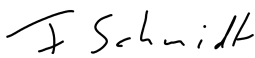
Al Ing. Félix Schmidt, en calidad de director de tesis, por su acompañamiento y apoyo durante el desarrollo del presente estudio.

Resumen

El presente estudio evalúa la factibilidad del aprovechamiento energético del biogás que se genera en el Complejo Ambiental del DMQ, utilizando herramientas de estimación de biogás, en este caso se adopta el modelo ecuatoriano, donde los resultados indican que se puede generar una potencia máxima de 1.60 MW con una eficiencia de captación del 34%, a su vez, económicamente el VAN es un valor positivo, concluyendo que el proyecto genera beneficios relevantes siendo viable de forma técnica, económica y ambiental para su implementación.

Abstract

This study evaluates the feasibility of energy recovery from the biogas generated at the Environmental Complex of the Metropolitan District of Quito (DMQ), using biogas estimation tools, specifically the Ecuadorian model. The results indicate that a maximum power generation of 1.60 MW can be achieved with a gas collection efficiency of 34%. Additionally, the economic analysis shows a positive Net Present Value (NPV), concluding that the project provides significant benefits and is therefore highly viable from a technical, economic, and environmental standpoint for its implementation.



14.07.2026

Palabras clave

1. Biogás: Gas producido por la descomposición anaerobia de la materia orgánica en condiciones controladas, compuesto principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), con potencial para ser utilizado como fuente de energía.
2. Complejo Ambiental: Infraestructura moderna de gestión integral de residuos sólidos que incorpora procesos de disposición final, tratamiento, valorización y aprovechamiento de subproductos como el biogás, bajo criterios de sostenibilidad ambiental.
3. Distrito Metropolitano de Quito (DMQ): Entidad territorial donde se desarrolla el proyecto de estudio, caracterizada por su alta generación de residuos sólidos y la implementación de sistemas integrales para su gestión y disposición final.
4. Captación de biogás: Proceso mediante el cual se recolecta el biogás generado en un sitio de disposición final mediante sistemas de extracción, con el objetivo de evitar su liberación a la atmósfera y permitir su aprovechamiento energético.

Tabla de contenido

CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN	7
1. TEMA DE INVESTIGACIÓN	7
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.2. JUSTIFICACIÓN	8
1.3. OBJETIVOS	9
1.3.1. General	9
1.3.2. Específicos	9
1.4. ALCANCE Y LIMITACIONES	10
1.5. METODOLOGÍA	10
1.5.1. Métodos de investigación	10
1.5.2. Modelos y formulación	11
1.5.3. Análisis económico	11
1.5.4. Proceso metodológico	12
2. CAPÍTULO: ESTADO DEL ARTE	13
2.1. GENERALIDADES	13
2.1.1. Fases para la generación de biogás	14
2.2. SITUACIÓN DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL ECUADOR	16
2.3. GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DEL DMQ	17
2.3.1. Relleno Sanitario El Inga	18
2.3.2. Complejo Ambiental del DMQ	20
2.4. PROYECTO DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DEL BIOGÁS QUE SE PLANTEA IMPLEMENTAR	21
2.4.1. Ubicación del proyecto	22
2.5. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE BIOGÁS	24
2.5.1. Caudal recolectado y caudal normalizado	24
2.5.2. Modelo LandGEM	25
2.5.3. Modelo de Biogás de Ecuador – Ministerio de Ambiente (2009)	25
2.6. SELECCIÓN DEL MODELO DE ESTIMACIÓN	26
2.6.1. Parámetros utilizados en el modelamiento	27
2.6.2. Comparación aplicada de modelos y selección del modelo de estimación	29
2.7. MODELO LANDGEM (EPA - EE. UU.)	30
2.8. MODELO ECUATORIANO	30
3. CAPÍTULO: ANÁLISIS TÉCNICO DEL PROYECTO	33
3.1. MODELAMIENTO DE GENERACIÓN DE BIOGÁS	33
3.2. MODELAMIENTO RELLENO SANITARIO EL INGA	34
3.2.1. Análisis de resultados de modelamiento	37
3.2.2. Condiciones operativas del sistema actual y comparación con el modelamiento ecuatoriano	39
3.3. MODELAMIENTO COMPLEJO AMBIENTAL DEL DMQ	41
3.3.1. Escenarios evaluados	42
3.4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL MODELAMIENTO	43
3.4.1. Escenario 1 (eficiencia de captación de biogás al 28%)	43
3.4.2. Escenario 2 (eficiencia de captación de biogás al 34%)	44
3.4.3. Escenario 3 (eficiencia de captación de biogás al 40%)	46
3.5. CÁLCULO DEL CAUDAL DE BIOGÁS REQUERIDO POR MOTO GENERADOR	47
3.5.1. Cálculo del caudal normalizado ($N\ m^3/h$) para el motor de 1MW	47

	Barrera	5
3.6.	CÁLCULOS DE PARÁMETROS PARA EL CUBETO 1	50
3.6.1.	<i>Cálculo de número de motores a implementar.....</i>	50
3.6.2.	<i>Potencia real del sistema.....</i>	50
3.6.3.	<i>Cálculo de toneladas de CO₂ evitadas</i>	50
3.6.4.	<i>Cálculo bonos de carbono e ingresos por venta de bonos de carbono.....</i>	52
3.7.	RESULTADOS DEL ESCENARIO DE EFICIENCIA DE CAPTACIÓN AL 34%	57
3.8.	ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS	58
3.9.	CRONOGRAMA DE IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO	60
4.	CAPITULO. EVALUACIÓN DE BENEFICIOS ECONÓMICOS DEL PROYECTO.....	61
4.1.	INVERSIÓN INICIAL CAPEX.....	61
4.2.	COSTOS DE OPERACIÓN OPEX.....	63
4.3.	INGRESOS DEL PROYECTO.....	63
4.3.1.	<i>Indicadores económicos del proyecto.....</i>	65
5.	CAPITULO. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	67
5.1.	DISCUSIONES GENERADAS	67
5.2.	CONCLUSIONES	69
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
7.	ANEXOS.....	73

Índice de Tablas

Tabla 1. Constituyentes típicos del biogás de un relleno sanitario de residuos urbanos	13
Tabla 2. Características del biogás	14
Tabla 3. Detalles de zonas del proyecto.....	23
Tabla 4. escenarios para la realidad de rellenos sanitarios en el Ecuador	27
Tabla 5. Parámetros de modelamiento	29
Tabla 6. Parámetros evaluados	33
Tabla 7. Datos reales de generación de biogás y energía producida en Relleno Sanitario El Inga	36
Tabla 8. Parámetros modelamiento Relleno Sanitario (escenario 2 tabla 4).....	37
Tabla 9. Análisis de resultados de modelamiento	43
Tabla 10. Supuestos de cálculo de toneladas de CO ₂ evitadas.....	50
Tabla 11. Supuestos bonos de carbono	52
Tabla 12. Cálculos para implementación proyecto	54
Tabla 13. Resultados proyecto cubeto 1	58
Tabla 14. Cronograma referencial del proyecto	60
Tabla 15. Detalle de Inversiones CAPEX.....	61
Tabla 16. Resumen CAPEX	62
Tabla 17. Resumen detalle de OPEX	63

Tabla 18. Detalle de ingresos del proyecto	64
Tabla 19. Indicadores económicos del proyecto	65
Tabla 20. CAPEX detallado	73
Tabla 21. <i>Detalle OPEX</i>	74

Índice de Figuras

Figura 1. Proceso generación biogás.....	13
Figura 2. Fases para la generación de biogás.....	15
Figura 3. Relleno Sanitario El Inga	19
Figura 4. Área de estudio, Complejo Ambiental del DMQ.....	21
Figura 5. Proyección de planos de planta	23
Figura 6. Tendencia generación biogás LandGem	30
Figura 7. Tendencia generación biogás Mod. Ecuatoriano.....	31
Figura 8. Tendencia y proyección de la situación real de RS El Inga	38
Figura 9. Curva estimación biogás escenario 1(28%)	44
Figura 10. Curva estimación biogás escenario 2 (34%).....	45
Figura 11. Curva estimación biogás escenario 3 (40%).....	46
Figura 12. Comparación tres escenarios de diferencia de eficiencias de captación de biogás.....	56
Figura 13. Evolución del VAN en el proyecto.....	66

CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN

1. Tema de investigación

El tema de investigación se basa en el análisis de factibilidad que existe en la valorización de energía a través del biogás generado en sitios de disposición final como complejos ambientales, esto permite realizar aprovechamiento de recursos, sostenibilidad ambiental y evaluación económico-social de proyectos que deben ser de interés público.

El eje central de esta tesis es determinar la factibilidad del aprovechamiento del biogás generado en el Complejo Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito – DMQ, para generación de energía, evaluando si genera beneficios suficientes para justificar su implementación como una estrategia sostenible dentro del sistema metropolitano de gestión de residuos.

La elección del tema responde también a la evaluación del cambio estructural en el modelo de disposición final de residuos que presenta el Distrito Metropolitano de Quito, desde la transición del Relleno Sanitario El Inga, que cuenta con un proceso de generación de energía de 9MW de capacidad operativa instalada, al Complejo Ambiental del DMQ, constituyéndose como una infraestructura distinta en operación y llevada a cabo como estrategia institucional para modernizar el sistema de gestión integral de residuos sólidos, a su vez, presentar una base de investigación como relevancia científica y aplicada, que permite fundamentar, desde una lógica académica, la conveniencia de incorporar la valorización energética como parte del nuevo esquema de gestión pública ambiental y presentar la importancia de que al llevar una correcta gestión integral de residuos sólidos se puede aprovechar el sistema para generar tanto recursos como beneficios económicos, ambientales y sociales al país.

1.1. Planteamiento del problema

La gestión integral de residuos sólidos urbanos representa una gran problemática en nuestro país, particularmente por el crecimiento poblacional, el incremento de consumo y la expansión urbana generan una presión constante sobre los sistemas de recolección,

tratamiento y disposición final. En el Distrito Metropolitano de Quito, esta problemática adquiere mayor relevancia debido a la necesidad de transición hacia un nuevo modelo de gestión, materializado en la implementación del Complejo Ambiental del DMQ, el cual busca incorporar criterios de sostenibilidad, valorización y aprovechamiento de subproductos generados en el proceso de disposición de residuos.

En este contexto, el biogás se presenta como una fuente potencial de energía renovable que puede ser aprovechada mediante sistemas de captación, tratamiento y generación eléctrica, transformando un residuo en un recurso energético con valor económico y ambiental.

En este sentido, el problema de investigación es determinar si el aprovechamiento energético del biogás en el Complejo Ambiental del DMQ constituye una alternativa factible desde una perspectiva técnica, económica, ambiental y social, que justifique su implementación dentro del modelo de gestión integral de residuos de Quito, evidenciando la importancia de una adecuada gestión de residuos sólidos como una oportunidad para generar beneficios no solo ambientales, sino también sociales y económicos.

1.2. Justificación

El presente estudio e investigación justifica la importancia de analizar la implementación de proyectos de captación, tratamiento y aprovechamiento energético del biogás que se estima en el Complejo Ambiental del DMQ, analizando los beneficios económicos, ambientales y sociales que produce. Este tipo de proyectos deben ser tomados con gran relevancia debido a que los sitios de disposición final generan grandes cantidades de metano, siendo un pasivo ambiental significativo si no es tratado adecuadamente.

El aprovechamiento de biogás para generación de energía constituye una estrategia de impulso para que los gobiernos locales se centren que implementar y efectuar un correcto sistema de gestión en ciudades y poblaciones, se puede llegar a ejecutar este tipo de proyectos, que no solo incide directamente en la reducción de la contaminación ambiental, sino que constituye un elemento fundamental para garantizar la salubridad

pública. Por otra parte, en el plano institucional, la investigación aporta a EMGIRS EP para poder tomar decisiones, en una etapa clave de planificación y construcción del nuevo Complejo Ambiental, poniendo énfasis en que llevando una la correcta ejecución desde la construcción de este, esto influye directamente en todos los sistemas de aprovechamiento y recirculación que posteriormente se puede seguir implementando.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Evaluar la factibilidad del proyecto de captación, tratamiento y aprovechamiento energético del biogás en el Complejo Ambiental del DMQ, mediante la proyección de generación de biogás, el análisis de escenarios de eficiencia de captación y la evaluación técnico-económica del sistema de generación eléctrica.

1.3.2. Específicos

- i. Comparar el modelo LandGEM y el Método Ecuatoriano para la estimación de la generación de biogás, con base en la información proyectada y la referencia de data operativa del relleno sanitario El Inga, eligiendo el mejor método que se adapta al caso de estudio.
- ii. Estimar el caudal de biogás generado y recuperable en el Cubeto 1 del Complejo Ambiental del DMQ, considerando escenarios de eficiencia de captación del 28%, 34% y 40%.
- iii. Determinar los parámetros calculados como número de moto generadores, generación de energía potencial real y las principales especificaciones técnicas requeridas para el aprovechamiento energético del biogás proyectado.
- iv. Evaluar el desempeño económico del proyecto mediante el análisis de inversión, costos operativos, ingresos por venta de energía eléctrica y valorización de bonos de carbono.
- v. Proponer estrategias orientadas a la optimización de la captación y aprovechamiento del biogás.

1.4. Alcance y limitaciones

El alcance del presente estudio permite evaluar la factibilidad del proyecto de captación, tratamiento y aprovechamiento del biogás del Complejo Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito – DMQ para generación de energía, tomando como base de información los estudios levantados del proyecto que están ejecutándose actualmente y la documentación técnica relacionada, planteando un análisis del potencial de implementación, los beneficios económicos, sociales y ambientales asociados al proyecto, y las estrategias para optimizar la operación.

Por otra parte, entre las principales limitaciones que tiene el presente estudio, radica en que el Complejo Ambiental del DMQ, se encuentra en fase de construcción, en consecuencia, la base de información está basada en datos proyectados y supuestos establecidos en el estudio de prefactibilidad que está realizando EMGIRS EP actualmente y la realidad operativa de generación de energía que han tenido en el relleno sanitario El Inga, sitio de disposición final actual del DMQ, que está próximo a culminar su tiempo de vida útil.

1.5. Metodología

El presente estudio analiza la factibilidad del proyecto de aprovechamiento del biogás del Complejo Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) con un enfoque detallado, analítico y comparativo.

1.5.1. Métodos de investigación

En el estudio realizado se consideró los siguientes métodos:

- i. Análisis documental: Evaluación sobre estudios científicos, técnicas y utilización del biogás en rellenos sanitarios (IPCC,2006).

- ii. Análisis comparativo: Realizar una verificación comparativa sobre las diferentes operaciones que se realiza en el relleno sanitario existente del Inga y condiciones estimadas en el complejo ambiental del DMQ.
- iii. Modelo matemático: Identificación del porcentaje de eficiencia y caudal de captación de biogás con tipos de modelamiento internacional, tomando en cuenta condiciones territoriales (Ministerio del Medioambiente MAE, 2009).
- iv. Estudio económico: Análisis de la viabilidad por medio de parámetros financieros más utilizados para evaluar proyectos como Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) (Sapag Chain, 2014).

1.5.2. Modelos y formulación

Para la estimación de biogás generado en el sitio de estudio, se consideraron dos modelos matemáticos que son ampliamente utilizados para proyectos de aprovechamiento energético a través del biogás de complejos ambientales:

- i. Modelo LandGEM: desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA).
- ii. Modelo Ecuatoriano de biogás: desarrollado en el marco del Programa Nacional para la gestión Integral de desechos sólidos.

Los modelos mencionados fueron creados con la finalidad de comparar resultados, determinando cual modelo se adapta mejor a las condiciones que presenta el sitio de estudio. La descripción conceptual, fórmulas y variables de los modelos utilizados, se encuentran descritas en el Capítulo 2: Estado del Arte.

Una vez seleccionado el modelo matemático, se aplicó para estimar la generación de biogás y establecer la disponibilidad de este recurso determinando la factibilidad técnica del proyecto.

1.5.3. Análisis económico

La evaluación económica del proyecto se desarrolló mediante indicadores financieros que permiten determinar la factibilidad financiera complementando a la parte técnica

para la toma de decisión de viabilidad del proyecto. Para este análisis se consideraron los costos de inversión (CAPEX), costos de operación (OPEX), y los ingresos que se genera tanto por la venta de energía como por la comercialización de bonos de carbono. Los principales indicadores que fueron utilizados en el presente estudio fueron:

- i. Valor Actual Neto (VAN).
- ii. Tasa Interna de Retorno (TIR).

La descripción conceptual, fórmulas y variables de los modelos utilizados, se encuentran descritas en el Capítulo 2: Estado del Arte.

1.5.4. Proceso metodológico

Las etapas se desarrollaron de la siguiente forma:

- i. Descripción del contexto en la gestión de residuos en el DMQ.
- ii. Recopilación de información técnica y específica acorde al proyecto.
- iii. Identificación de la generación de biogás mediante modelos matemáticos.
- iv. Evaluación comparativa del modelo más representativo.
- v. Análisis de los diferentes porcentajes de captación (28%, 34% y 40%).
- vi. Determinación del potencial energético del biogás.
- vii. Análisis económico del estudio.
- viii. Determinación de resultados para el análisis de factibilidad del proyecto.

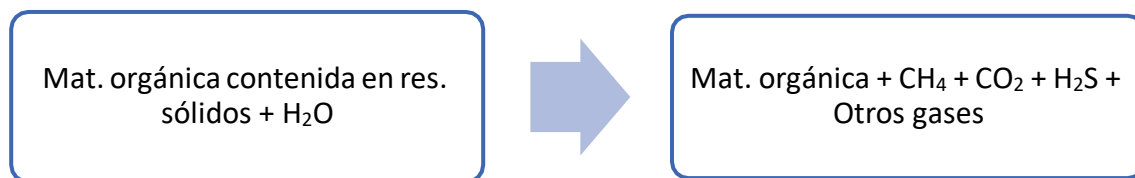
2. CAPÍTULO: ESTADO DEL ARTE

2.1. Generalidades

Según Tchobanoglous (1993) los rellenos sanitarios son reactores bioquímicos que tienen como entradas residuos, agua y sus salidas biogás y lixiviados. Se debe controlar las salidas de biogás, evitando las descargas de forma directa a la atmósfera para prevenir incendios o explosiones reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.

En la figura 1, se observan las reacciones internas que se producen en el relleno sanitario en la producción de biogás.

Figura 1. Proceso generación biogás



Fuente: (Tchobanoglous, 1993)

Por otra parte, en la Tabla 1. Se detalla los componentes típicos y sus porcentajes del biogás que compone los rellenos sanitarios:

Tabla 1. Constituyentes típicos del biogás de un relleno sanitario de residuos urbanos

Constituyentes típicos del biogás de un relleno sanitario de residuos urbanos	
Componente	Porcentaje (base volumen seco)
Metano (CH ₄)	45 - 60
Dióxido de carbono (CO ₂)	40 - 60
Nitrógeno (N ₂)	2 - 5
Oxígeno (O ₂)	0,1 - 1,0
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, otros (H ₂ S)	0 - 1,0

Amoníaco (NH_3)	0,1 - 1,0
Hidrógeno (H_2)	0 - 0,2
Monóxido de carbono (CO)	0 - 0,2
Trazas de otros gases	0,01 - 0,6

Fuente: (Tchobanoglous, 1993)

En la *Tabla 1.* en condiciones reales de operación el biogás generado, contiene mezclas de aire atmosférico debido a las infiltraciones que existen en los sistemas, influyendo directamente en la composición, aumentando las concentraciones de nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2), y reduciendo la concentración de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2).

En la *Tabla 2.* se observa las características que tiene el biogás en sitios de disposición final, valores que se adoptan para el modelamiento de estimación de gas:

Tabla 2. Características del biogás

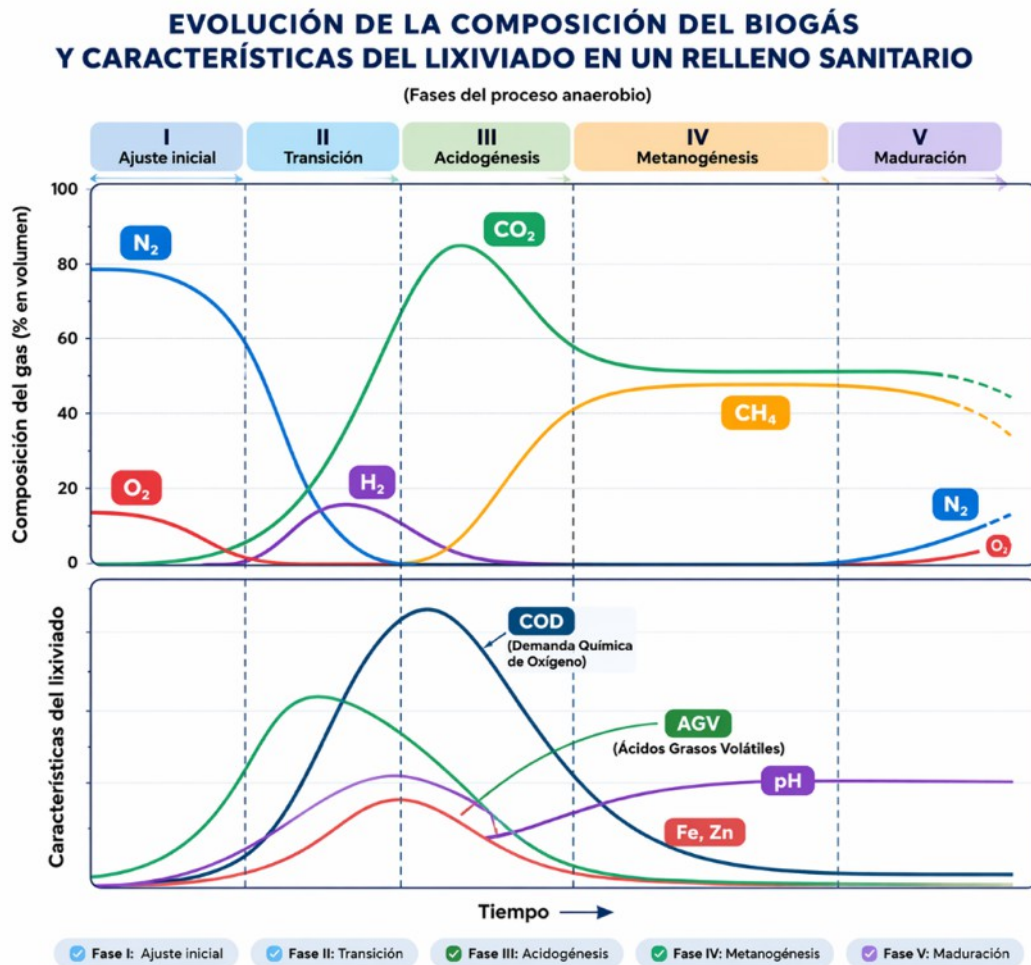
Características del biogás	
Característica	Valor
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	37 - 67
Peso específico (adimensional)	1,02 - 1,06
Contenido de humedad	Saturado
Poder calorífico del biogás (KWh/m^3)	5 KWh/Nm^3
Poder calorífico del Metano puro CH_4 (KWh/m^3)	10 KWh/Nm^3
Los valores varían según la antigüedad del relleno	

Fuente: (Tchobanoglous, 1993)

2.1.1. Fases para la generación de biogás

A continuación, se presenta la *Figura 2.* Donde se observa las fases de generación y comportamiento de biogás en un relleno sanitario:

Figura 2. Fases para la generación de biogás



Fuente: (Tchobanoglous, 1993)

Fase I Ajuste Inicial: Fase de descomposición biológica en presencia de oxígeno (aeróbica), ya que el aire queda dentro de las celdas del relleno. Todos los microorganismos provienen de lodos y lixiviado recirculado.

Fase II. Fase De Transición: Se empieza a dar condiciones anaerobias ya que el oxígeno ha desaparecido, y los microorganismos anaeróbicos empiezan a actuar.

Fase III. Fase Ácida: En esta fase se dan dos procesos gracias a la aceleración de la actividad microbiana

- i. Hidrólisis: en esta primera etapa las moléculas orgánicas se descomponen y forman moléculas más simples como azúcares,

aminoácidos y ácidos grasos, lo que les convierte en compuestos solubles.

- ii. Acidogénesis: en esta etapa el resultado como azúcares, aminoácidos y ácidos grasos, pasan a ser ácidos grasos volátiles y otros compuestos con peso molecular mínimo, produciendo gases como dióxido de carbono e hidrógeno.

Fase IV. Metanogénesis: etapa final de descomposición ya que los organismos convierten los productos en metano y dióxido de carbono siendo estrictamente anaerobios.

Fase V. Maduración: en esta fase se genera la degradación de materiales que no se descomponen en fases anteriores reducen de forma significativa la velocidad de generación de biogás. La cantidad de biogás y metano generado, así como la duración y efectividad de las distintas fases de descomposición, dependen de:

- i. Cantidades y características de los componentes orgánicos que llegan al relleno.
- ii. La disponibilidad de nutrientes.
- iii. El contenido de humedad de los residuos (óptimo para la biodegradación 50% – 60%).
- iv. El flujo de la humedad a través del relleno.
- v. El material de cobertura y el grado de compactación inicial.
- vi. Las condiciones hidrológicas de la localidad.

2.2. Situación de la gestión de residuos sólidos urbanos en el Ecuador

La gestión de residuos sólidos urbanos constituye uno de los principales desafíos ambientales y operativos en los países en desarrollo, debido al crecimiento poblacional, la expansión urbana y el incremento sostenido del consumo.

Actualmente en el Ecuador, un habitante de la zona urbana ecuatoriana produce en promedio 0,9 Kg de residuos sólidos al día (INEC, 2024). Es decir que Ecuador se

generan más de 14.000 toneladas de residuos sólidos cada día, lo que equivale a más de 5,1 millones de toneladas al año.

En cuanto a la disposición final, el país presenta una heterogeneidad en las condiciones de operación de los sitios de disposición, según información declarada por los GADM en el 2024, 132 municipios que representan el 59,7 % disponen los residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios, el 24,4 % en celdas emergentes y el 15,8 % en botaderos (INEC, 2024). Sin embargo, existen reportes relacionados con sitios de disposición final, como rellenos sanitarios y complejos ambientales, que evidencian un manejo inadecuado de los residuos sólidos, incumpliendo la normativa vigente aplicable a este tipo de infraestructuras. En el Reporte de Control Público No. 4 emitido por la Contraloría General del Estado (CGE), se analizaron diversos informes de auditoría gubernamental relacionados con la gestión integral de residuos sólidos que competen a los GADS, empresas públicas municipales y el Ministerio del Ambiente.

Como resultado, se concluye que varios gobiernos locales presentan deficiencias en la gestión de estos sistemas, evidenciándose la omisión de planes de manejo y licencias ambientales, así como la operación de algunos sitios de disposición final bajo condiciones similares a botaderos a cielo abierto (Contraloría General del Estado, s.f.).

En este contexto, resulta necesario que el Ecuador fortalezca la gestión integral de residuos sólidos urbanos. La adecuada disposición de los residuos no solo incide directamente en la reducción de la contaminación ambiental, sino que constituye un elemento fundamental para garantizar la salubridad pública. Asimismo, una gestión adecuada permite el desarrollo de proyectos orientados al aprovechamiento de subproductos, como el biogás, contribuyendo a la generación de energía y a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.

2.3. Gestión de residuos sólidos del DMQ

El Distrito Metropolitano de Quito presenta una generación diaria aproximada de 2.000 toneladas de residuos sólidos urbanos (EMGIRS, 2026) lo que evidencia una alta demanda sobre los sistemas de disposición final y la necesidad de soluciones

sostenibles a largo plazo. Este volumen de residuos, característico de una ciudad metropolitana, responde a factores como:

- i. Crecimiento poblacional
- ii. Expansión urbana
- iii. Incremento del consumo
- iv. Cambios en los patrones de generación de residuos

Sin embargo, bajo esquemas tradicionales de disposición final, este tipo de proyectos evitan:

- i. Emisiones de gases de efecto invernadero,
- ii. Generación de impactos ambientales,
- iii. Pérdida de valor energético.

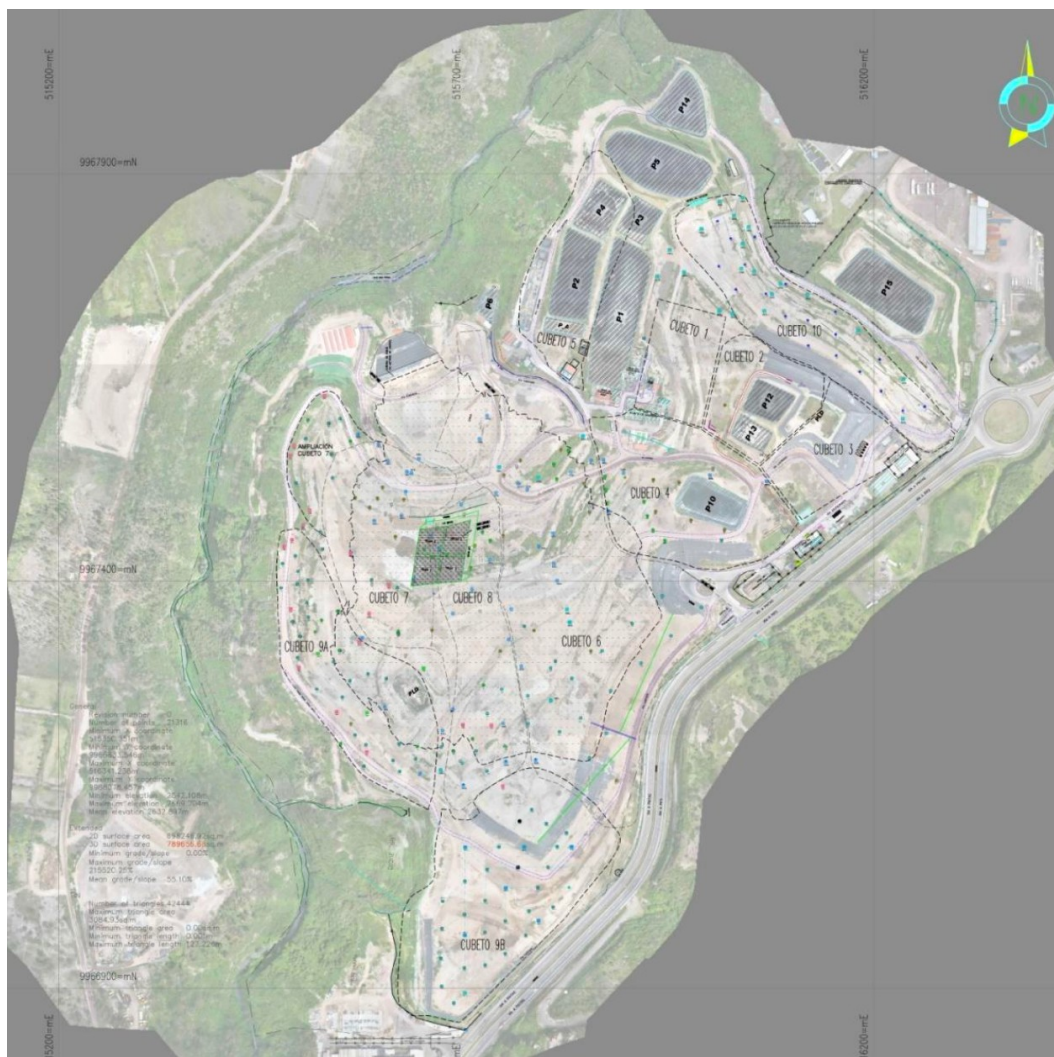
El sistema de disposición final del DMQ se encuentra actualmente en una etapa de transición, debido a la proximidad del agotamiento de la vida útil del relleno sanitario existente.

2.3.1. Relleno Sanitario El Inga

El Relleno Sanitario el Inga, se encuentra en funcionamiento desde el 2003, que a partir del 2010 se crea EMGIRS EP, con la finalidad de operar y gestionar el relleno sanitario, que está conformado por las siguientes zonas: Inga I (Cuatro cubetos funcionando desde 2003 a 2006), Inga II (Dos cubetos 2006 – 2012) e Inga II (2012 hasta la actualidad).

El Relleno se encuentra ubicado a 45 km de la ciudad de Quito, dentro de una zona industrial de alto impacto, en el sector del Inga Bajo, entre Pifo y Sangolquí, sobre la vía E35, su plano de ubicación geográfica se encuentra detallado en la Figura 3, presentada a continuación:

Figura 3. Relleno Sanitario El Inga



Fuente: EMGIRS EP (2026)

En base a la información proporcionada por EMGIRS EP, el ingreso de RSU, son receptados principalmente de las Estaciones de Transferencia Norte y Sur de Quito donde llega la recolección de residuos de la ciudad; sin embargo, el relleno acoge también a los residuos generados en el cantón Rumiñahui.

El Relleno Sanitario El Inga ha sido el sitio de disposición final de los residuos del DMQ durante 21 años aproximadamente y con el paso de los años, EMGIRS-EP, la nueva administración, especialmente en el año 2024, invirtió en la implementación de mejoras técnicas, optimizado los procesos que se ejecutan en el relleno para mejorar la generación y captación del biogás.

Actualmente tiene instalado cinco motores con una capacidad operativa instalada de 9MW, produciendo un promedio de 3.5 MW, sin embargo, el tiempo de vida útil del Relleno Sanitario está por terminar, proyectado su cierre total a finales del año 2026.

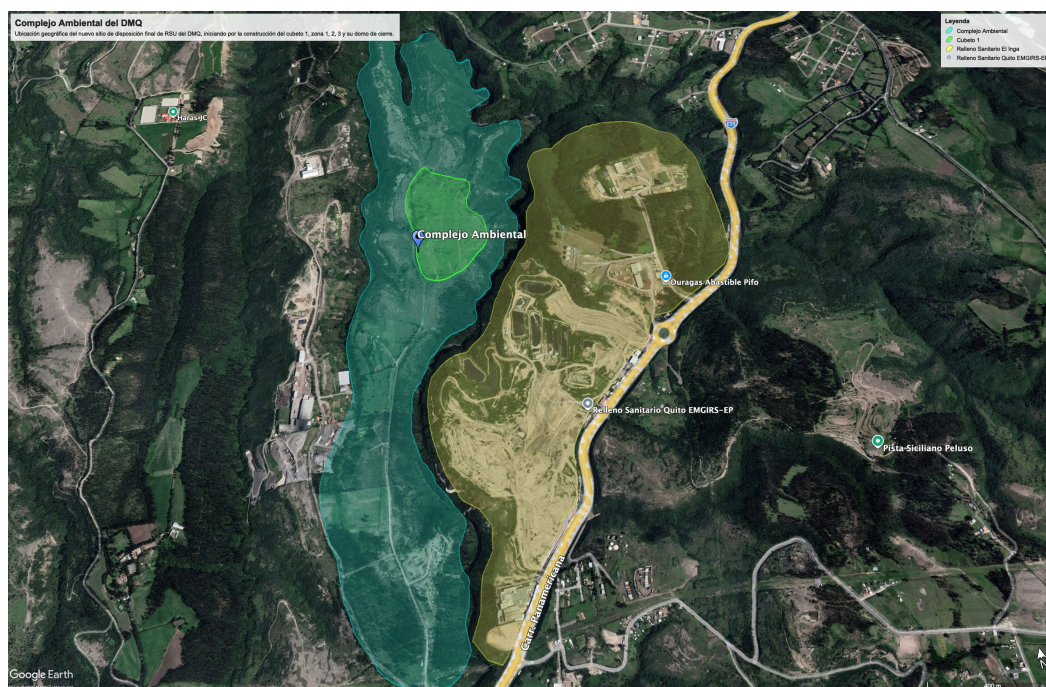
2.3.2. Complejo Ambiental del DMQ

Por tal motivo, la gestión de residuos de Quito depende de la ejecución y construcción del nuevo Complejo Ambiental, proyectado como una nueva infraestructura para la gestión de residuos sólidos. A diferencia de su anterior modelo de disposición final, el Complejo Ambiental del DMQ se concibe como un sistema integral orientado a:

- i. Valorización de residuos.
- ii. Reducción de impactos ambientales.
- iii. La incorporación de tecnologías de aprovechamiento.
- iv. La sostenibilidad operativa y financiera.

En este contexto, en la Figura 4. se observa que su operatividad se ha proyectado según la construcción programada de cubetos, actualmente se encuentra en ejecución la fase de construcción del Cubeto 1, que comprende celda de transición, zona 1, zona 2, zona 3 y su domo de cierre. Esta fase representa el punto de partida para la implementación de nuevas estrategias de gestión, incluyendo el proyecto de captación y aprovechamiento energético del biogás.

Figura 4. Área de estudio, Complejo Ambiental del DMQ.



Fuente: Autora (2026)

2.4. Proyecto de aprovechamiento energético del biogás que se plantea implementar

EMGIRS EP, es la empresa encargada de la construcción y operación del nuevo sitio de disposición final, llamado Complejo Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito -DMQ, como parte de sus etapas, se tiene la planificación de la construcción de varios cubetos, empezando este año con el primer cubeto junto con sus cuatro zonas. En este nuevo sitio de disposición final se estima el ingreso de aproximadamente 2000 toneladas diarias de RSU, que se caracterizan por contener 53,18% de material orgánico principal responsable de la producción de metano, un gas potencial de calentamiento global aproximadamente 25 veces mayor que el del dióxido de carbono (CO_2) (EMGIRS, 2026).

Por lo tanto, EMGIRS EP tuvo la iniciativa de declarar de interés público el proyecto de captación, tratamiento y aprovechamiento de biogás que se producirá en el Cubeto 1 del Complejo, destinado a la generación de energía. De acuerdo con los estudios de prefactibilidad presentados, el sistema proyecta la instalación de tres moto generadores

con una capacidad total aproximada de 2,4 MW, así como la implementación de una antorcha destinada a la quema controlada del biogás excedente.

La antorcha cumpliría la función no solo de reducción de emisiones de metano mediante su combustión controlada, sino de igual forma la gestión de excedentes en condiciones donde la generación de biogás supera la capacidad de los sistemas de aprovechamiento energético.

El proyecto plantea 8.760 h/año de captación, debido al trabajo en conjunto de motores y antorcha para la quema y aprovechamiento del biogás, mientras que para la operación de motores se trabajaría en torno a 8.000h/año por temas de mantenimiento, se recomienda que para prevenir la limitación de disponibilidad de motores ocasionando el suspensión de la operación, la implementación de un motor de back up que les de soporte a los dos primeros motores.

2.4.1. Ubicación del proyecto

La línea base del proyecto se enmarca en el Cubeto N.º 1, que constituye la primera fase operativa del Complejo Ambiental y donde se instalará progresivamente la infraestructura de captación y generación energética conforme avance la disposición de residuos y la producción de biogás.

El Cubeto 1, se encuentra planificado su construcción el 01 de octubre del 2026, dentro del predio del nuevo complejo ambiental del DMQ, el cubeto ha sido diseñado bajo criterios de ingeniería sanitaria que garantizan el aislamiento ambiental de los residuos. Su operación se estructura en celda de transición, zona 1, zona 2 y zona 3, seguidas por una etapa final correspondiente al domo de cierre, lo cual define la dinámica temporal de generación de biogás y la implementación del sistema energético (EMGIRS EP, 2026).

La operación del cubeto se desarrollará de forma progresiva conforme a la descripción de la Tabla 3, en las siguientes zonas según la planificación de EMGIRS EP:

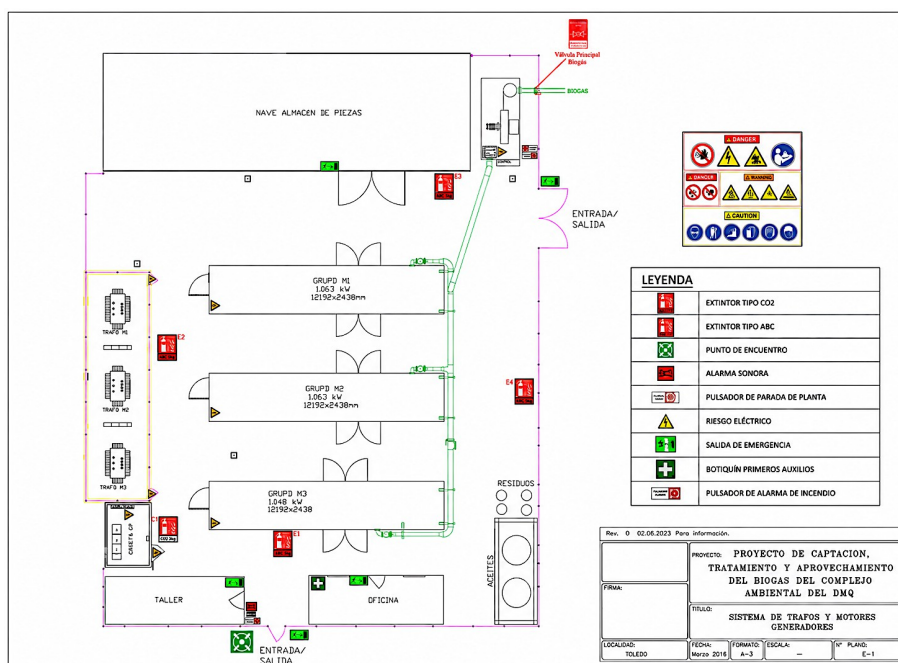
Tabla 3. Detalles de zonas del proyecto.

Fase	Inicio de operación	Duración / Vida útil	Capacidad (toneladas)
Celda de transición	Celda de transición de la operación del Relleno Sanitario	8 meses	528.000
Zona 1	Fase inicial del proyecto	14 meses	1.081.437
Zona 2	Posterior al avance de la Zona 1	16 meses	1.158.493
Zona 3	Etapa final de disposición activa	18 meses	1.238.304
Domo de cierre	Una vez completada la disposición en las tres zonas	7 meses	347.800

Fuente: EMGIRS EP (2026)

Se presenta el modelamiento de la planta de aprovechamiento que se ha planteado en la fase de prefactibilidad del proyecto en ejecución de EMGIRS, donde el Consorcio plantea implementar tres (3) moto generadores de 1MW como se observa en la Figura 5:

Figura 5. Proyección de planos de planta



Fuente: Promesa Consorcio El Inga CH₄ (2026)

El biogás se genera como resultado de la descomposición anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos. Su composición típica incluye aproximadamente, 50% metano (CH_4), 50% dióxido de carbono (CO_2) (Novoa, 2021).

2.5. Modelos de estimación de biogás

Existe una gran variedad de métodos para estimar la producción de biogás generada en los vertederos de residuos sólidos urbanos. Dichos modelos han sido desarrollados por diferentes entidades para usarlo en casos determinados.

Los modelos consideran el comportamiento temporal del biogás, el cual presenta una fase inicial de incremento, seguida de un pico de generación y posteriormente una disminución progresiva. Los resultados obtenidos permiten estimar el caudal total del cual constituye la base para el análisis del potencial de aprovechamiento energético del proyecto.

2.5.1. Caudal recolectado y caudal normalizado

El caudal del gas que se genera en los rellenos sanitarios se puede expresar en condiciones reales o en condiciones normalizadas (estándar) (Çengel & Boles, 2015).

El Caudal real (m^3/h), corresponde al volumen de la zona de estudio medido bajo condiciones específicas de presión, temperatura, y humedad, en las que se encuentra el gas durante la extracción, debido a que el volumen depende de las condiciones del sitio de disposición final. Mientras que el caudal normalizado (Nm^3/h) representa el volumen de gas corregido a las condiciones estándar, es decir a 0°C (273,15 K) y 1atm presión, lo que permite eliminar la influencia de variables termodinámicas (ISO, 2016).

Esta diferencia es relevante en sistemas de aprovechamiento de gas en sitios de disposición final como rellenos sanitarios, complejos ambientales, etc., donde las variaciones de temperatura y presión afectan directamente el volumen medido de gas. Por esta razón, organismos internacionales recomiendan el uso de caudales normalizados para la estimación del potencial energético y dimensionamiento de

equipos, debido a que este valor es más representativo en el valor que se tiene de cantidad real de gas disponible (IPCC, 2006).

2.5.2. Modelo LandGEM

El modelo LandGEM (Landfill Gas Emissions Model), desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), es una herramienta ampliamente utilizada para estimar la generación de biogás en rellenos sanitarios.

Su aplicación requiere parámetros como el potencial de generación de metano (L_0 , m^3/to) y la constante de degradación (k), los cuales pueden variar según la composición de los residuos y las condiciones del sitio (EPA, 2025).

El modelo calcula la generación de metano usando la ecuación:

$$QCH_4 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^t k L_0 M_i e^{-k(t-j)}$$

Donde:

Q ($m^3/año$) = generación de metano

k ($1/año$) = constante de degradación

L_0 ($m^3 CH_4/ton$) = potencial de generación de metano

M_i (ton) = masa de residuos dispuestos

t (años) = tiempo

j (año) = año de disposición

e = constante matemática ($e = 2.71828$)

2.5.3. Modelo de Biogás de Ecuador – Ministerio de Ambiente (2009)

Es un programa de cálculo del Programa Nacional de Gestión Integral de Desechos Sólidos (PNGIDS) del Ecuador, mismo que fue desarrollado por “Methane to Markets” para el Ministerio del Ambiente del Ecuador que es de uso abierto, denominado “Modelo de Biogás de Ecuador” Versión 1.1 de enero de 2009.

El modelo calcula la estimación de generación de metano usando la siguiente ecuación:

$$Q_{biogás} = 2 \frac{1}{\%v} k M L_0 e^{-k(t-ta)}$$

Donde:

$Q_{biogás}$ ($Nm^3/año$) = Caudal total de biogás generado.

n = Número total de años modelado.

t (años) = Tiempo en años, desde el inicio de la disposición de los desechos.

ta (años) = Tiempo estimado entre la disposición de los desechos y la generación de metano.

$\% v$ = Porcentaje volumétrico estimado de metano en el biogás del relleno sanitario.

L_0 (Nm^3CH_4/ton) = Volumen estimado que es generado por cada tonelada de desecho.

k ($1/año$) = Tasa estimada de descomposición de los desechos orgánicos.

M ($ton/año$) = Masa de desechos depositados en el lugar (relleno sanitario) en el año t en toneladas.

e = constante matemática ($e = 2.71828$).

Los resultados de este método dependen directamente de las condiciones particulares de cada relleno sanitario del país, entre ellas:

- i. Cantidades de desechos por año.
- ii. Composición de los residuos y en particular cantidad de materia orgánica.
- iii. Velocidad de biodegradación de la materia orgánica.
- iv. Grado de compactación y material de cobertura.
- v. Precipitaciones y climatología (temperatura).

2.6. Selección del modelo de estimación

Para el presente estudio, se realizó como primer paso, el análisis comparativo entre el Modelo LandGEM y el Modelo Ecuatoriano, con el objetivo de determinar cuál de ellos se ajusta mejor a las condiciones del proyecto.

2.6.1. Parámetros utilizados en el modelamiento

Ambos modelos fueron calibrados utilizando la misma base de datos de disposición de residuos, ajustada a la capacidad real del Cubeto 1 (4.354.034 toneladas), considerando un inicio parcial de operación en el año 2027 y un cierre en el año 2032.

Los parámetros utilizados en el modelamiento fueron definidos con base en la experiencia y criterio técnico aplicados en proyectos relacionados con el aprovechamiento energético de biogás en el país, tomando como principal el caso de estudio de la ciudad de Cuenca y Quito. Según Arévalo Vélez C (comunicación personal, 02 de febrero del 2026) especialista en gestión de residuos sólidos, quien, a partir de su experiencia en proyectos reales a nivel nacional, y haber liderado el proyecto de aprovechamiento energético del Relleno Sanitario Pichacay, se ha podido determinar rangos de valores que se ajustan de manera más representativa a las condiciones de los rellenos sanitarios en el Ecuador, cuyos valores se han planteado en escenarios, en base a los siguientes criterios:

- i. Cantidades de desechos que ya se han depositado.
- ii. Las precipitaciones medias alcanzan aproximadamente los 1500 mm por año.
- iii. Se considera que 1 año es el tiempo aproximado para que los desechos empiecen a emitir metano.
- iv. El contenido de materia orgánica de los desechos sólidos en los hogares es del 53,1% según el estudio realizado por EMGIRS-EP (2025). Este porcentaje no corresponde a una muestra sobre el total de los desechos que ingresan al relleno sanitario. Por seguridad asumimos el 50%.

Con las premisas expuestas, en la Tabla 4. se determina dos escenarios que reflejan la realidad de rellenos sanitarios en el Ecuador:

Tabla 4. escenarios para la realidad de rellenos sanitarios en el Ecuador.

Coeficiente	Unidad	Escenario 1	Escenario 2
-------------	--------	-------------	-------------

k	(1/año)	0,08	0,07
L ₀	$Nm^3CH_4/$ ton	84	60
Fuente y criterios		Modelo de Biogás para Ecuador, para precipitaciones entre 1000 y 1999 mm/año y para un contenido medio de residuos de comida o alimentos $\leq 50\%$.	El consultor estima que la biodegradación en Cuenca es un proceso lento según modelo de biogás del IPCC, k = 0,07 para "clima tropical y residuos húmedos", y la generación más baja de biogás por tonelada dada para el modelo ecuatoriano, 60 m ³ /ton.

Fuente: Arévalo (2026)

Uno de los parámetros relevantes para el modelamiento en los métodos matemáticos, es establecer el porcentaje de eficiencia de captación de caudal normalizado de biogás que se genera en el relleno sanitario, para este caso según el criterio de los expertos y consultores (Arévalo Vélez, C y Schmidt F, comunicación personal, 02 de febrero del 2026), se adoptó el valor de 34%, valor con base en su experiencia técnica en proyectos de aprovechamiento energético en biogás en el país y en el exterior. Y una vez analizado los datos de proyectos de generación de energía en Cuenca y Quito, se ha determinado que este porcentaje es un valor relacionado con la realidad proyectada para este tipo de casos de estudio en condiciones de operaciones en nuestro país, este porcentaje establece que solo el 34% del biogás producido es captado por el sistema, medido e incinerado o utilizado por el motor, este valor corresponde a la estimación de la cantidad de biogás que se puede captar de la producción total, el cual no puede ser perfecto. Lo demás, el 66% aproximadamente se fuga en el aire.

Por lo tanto, según las características del caso de estudio, se adopta el escenario 2 establecido en la Tabla 4. y una vez determinado los escenarios, los valores de parámetros para los modelamientos se presentan a continuación en la Tabla 5:

Tabla 5. Parámetros de modelamiento

Parámetro	Modelo Ecuatoriano	LandGEM
k (1/año)	0,070	0,070
L_0 (Nm^3CH_4/ton)	60	170
% CH_4	50%	50%
% Eficiencia de captación de biogás	34%	34%
Método	PNGIDS Ecuador	EPA LandGEM
Ajuste Local	Sí	No

Fuente: Autora (2026)

Por lo tanto, aunque los parámetros de ambos modelos presentan similitudes en la constante de degradación (k), el modelo de biogás de LandGem (EPA) no permite editar el potencial de generación de biogás (L_0), debido a que se encuentra calibrado con las condiciones que tiene EE. UU, siendo este valor casi tres veces mayor en el modelo LandGEM (EPA).

En este sentido, la adopción de dichos parámetros responde a la necesidad de emplear valores que reflejen la composición, condiciones climáticas y características operativas propias del país. Adicionalmente, se considera que el Complejo Ambiental del DMQ presentará condiciones similares a las del Complejo Ambiental Pichacay en Cuenca, el cual ha sido utilizado como referencia técnica en la calibración de estos parámetros.

Por tanto, el uso del modelo ecuatoriano permite obtener resultados más realistas y acordes al comportamiento esperado del sistema de generación de biogás en el sitio de estudio.

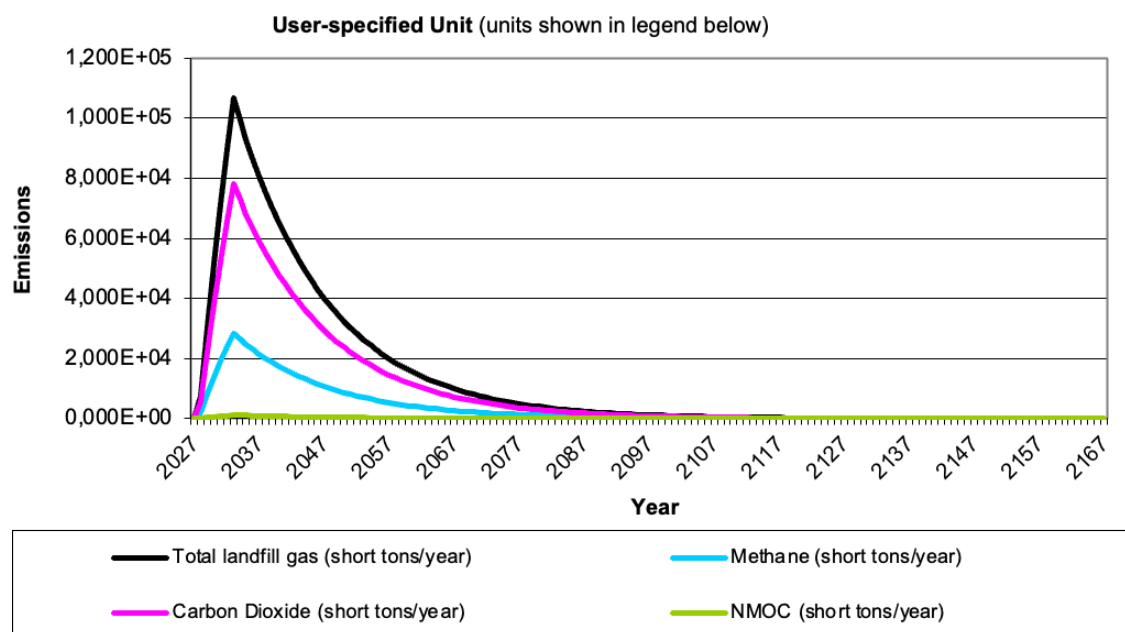
2.6.2. Comparación aplicada de modelos y selección del modelo de estimación

Una vez analizados los modelos de estimación de biogás y sus fundamentos teóricos, en esta sección se realiza el modelamiento en ambos métodos matemáticos, evaluando con los resultados, el que mejor representa conforme a las condiciones reales del caso de estudio.

2.7. Modelo LandGem (EPA - EE. UU.)

Una vez realizado el modelamiento, en la Figura 6, se presenta el resultado del comportamiento y estimación del biogás que se proyecta en el área de estudio según el Modelo LandGEM (EPA).

Figura 6. Tendencia generación biogás LandGem



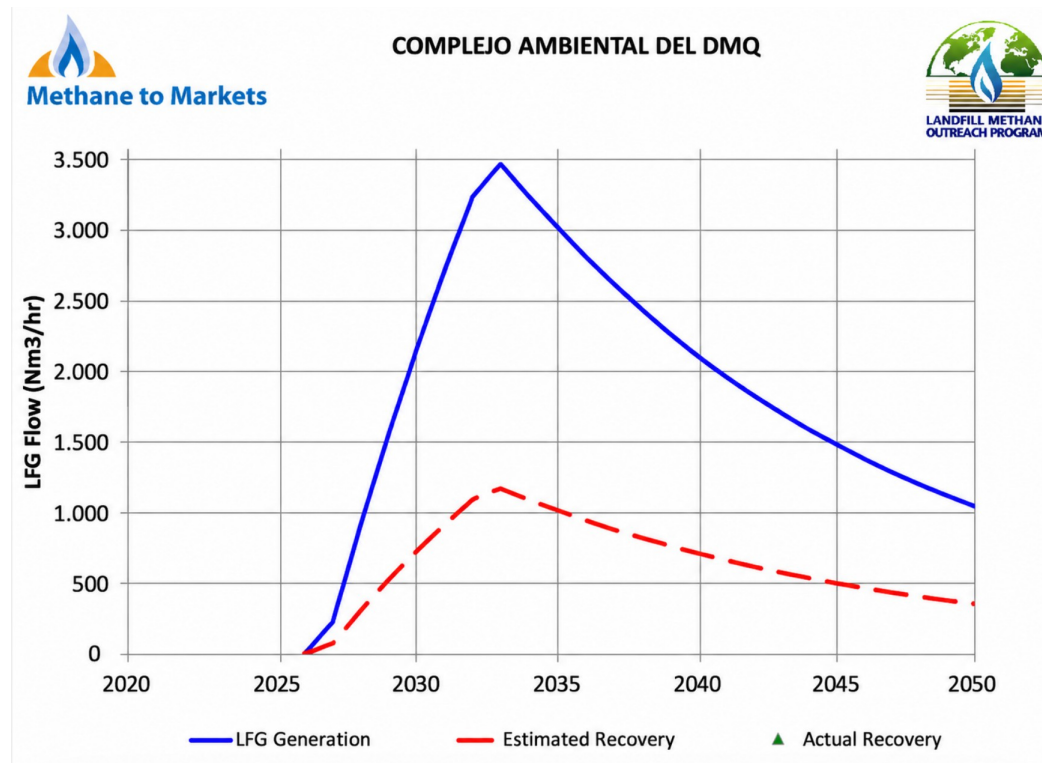
Fuente: Autora (2026)

Como se puede evidenciar en la Figura 6, el modelo LandGEM (EPA) presenta su pico más alto de generación de biogás en entre los años 2032 – 2033, proyectando aproximadamente **25,8 millones de m³/año. de metano CH₄**, al convertir este resultado en valores normalizados se obtiene un aproximado de **4119 Nm³/h de metano CH₄**.

2.8. Modelo Ecuatoriano

En la Figura 7, se presenta el resultado del modelamiento, proyectado el comportamiento y estimación del biogás que se produciría en el área de estudio según el Modelo Ecuatoriano.

Figura 7. Tendencia generación biogás Mod. Ecuatoriano



Fuente: Autora (2026)

Como se observa en la Figura 7, el modelo ecuatoriano presenta su pico más alto de generación de biogás en el 2033, proyectando aproximadamente 3443 Nm³/año de biogás generado, del cual 1171 Nm³/año equivale al 34%, podría ser captado y valorizado en energía eléctrica, aproximadamente con una concentración de 50% de metano, el caudal 585,5 Nm³/h CH₄ es aprovechable. Analizando y comparando los resultados de ambos modelamientos, el modelo LandGem asume un mayor potencial de degradación de la materia orgánica L_0 170 Nm³CH₄/ton, valor de lo que resulta en una sobreestimación de tres veces más de generación de biogás.

Por el contrario, el modelo ecuatoriano incorpora parámetros adaptados a las condiciones locales, L_0 60 Nm³CH₄/ton tomando en cuenta la composición real de residuos, humedad, condiciones climáticas, etc. proporcionando estimaciones más conservadoras y representativas de la realidad operativa.

A partir del análisis de variables y constantes de condiciones del sitio de estudio, se determinó en este capítulo según los resultados y gráficas presentadas, que el método ecuatoriano presenta una mejor aproximación al comportamiento real del biogás, porque se ajusta a condiciones reales termodinámicas de nuestro país, al contrario de LandGem que sus constantes están determinadas por otras condiciones que corresponden a su país de origen, por lo que el método ecuatoriano fue seleccionado como base para el desarrollo del análisis técnico del proyecto.

3. CAPÍTULO: ANÁLISIS TÉCNICO DEL PROYECTO

En el capítulo anterior se realizó la comparación entre el modelo LandGEM (EPA) y el Modelo Ecuatoriano, determinándose que este último representa de mejor manera el comportamiento del biogás bajo las condiciones del proyecto. En consecuencia, el presente capítulo desarrolla el análisis técnico del proyecto de captación, tratamiento y aprovechamiento energético del biogás en el Complejo Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito.

Este enfoque permite evaluar el desempeño del sistema proyectado bajo diferentes condiciones operativas, sin modificar el diseño planteado por el estudio de prefactibilidad, sino complementándolo mediante un análisis académico de escenarios.

3.1. Modelamiento de generación de biogás

En base al modelo matemático y parámetros definidos en el capítulo anterior, desarrollamos y realizamos el modelamiento de la estimación de biogás tanto para:

- i. Relleno Sanitario El Inga (condición real).
- ii. Complejo Ambiental – Cubeto 1 (proyección).

Esto permite establecer una comparación entre el comportamiento actual y el esperado. Para este modelamiento, como se presenta en la Tabla 6, para ambos casos se trabajó con los parámetros que se presentan a continuación:

Tabla 6. Parámetros evaluados.

Parámetro	Unidad	Relleno Sanitario El Inga	Complejo Ambiental del DMQ (Cubeto 1)
Residuos ingresados	t/día	2.000	2.000
Capacidad del sitio	t	16 millones ton	4.354.034 (total Cubeto 1)

Vida útil	meses	23 años (En fase final)	63 meses (aprox.)
Etapa operativa	-	Cierre progresivo	Desarrollo por fases
Fases operativas	-	Conexión dispersa en todo el relleno	Celda de transición, Zona 1, Zona 2, Zona 3 y domo de cierre
Duración por fase	meses	-	CT:8 / Z1: 14 / Z2: 16 / Z3: 18 / Domo: 7
Precipitación anual	mm/año	1500	1500
Fracción orgánica	%	53,1	53,1
Porcentaje de metano	%	49%	50
Potencia por motor	MW	1 MW	1 MW
Horas de operación	h/año	8.000	8.000

Fuente: Autora (2026)

Asimismo, con esta comparativa, se busca identificar oportunidades de mejora orientadas a optimizar la captación y maximizar la eficiencia del sistema, contribuyendo a la factibilidad del proyecto.

3.2. Modelamiento Relleno Sanitario El Inga

Para el análisis del Relleno Sanitario El Inga, se utilizó la información técnica proporcionada por EMGIRS-EP, la cual incluyó registros históricos de captación de biogás, generación de energía eléctrica.

GasGreen es la empresa que opera actualmente el proyecto de aprovechamiento energético del biogás que se genera en el Relleno Sanitario El Inga, inicia su participación en el 2012, en alianza estratégica con la Empresa Metropolitana de Gestión Integral de Residuos Sólidos (EMGIRS-EP). En el año el 2024, con la optimización de la

operación del manejo y operación del Relleno Sanitario, GasGreen plantea ampliar su capacidad operativa a 9MW.

En base a los datos reportados por EMGIRS EP, se obtiene los siguientes resultados:

Periodo evaluado 2023 – 2026

- i. Caudal promedio captado de biogás: 2500 Nm³/h (2023) - 2800 Nm³/h (2026)
- ii. % CH₄ = 49%
- iii. Poder calorífico del metano CH₄= 10 KWh/Nm³ = 0,010 MWh/h térmicos

Es decir que por cada m³ de metano puro produce aproximadamente 0,010MWh de energía

Según los datos tomados de la base de datos de la operación actual se calcula la energía del biogás que tiene el relleno sanitario:

Periodo 2023-2025:

$$E = Q \text{ Nm}^3/\text{h} \times \% \text{CH}_4 \times \text{PCI CH}_4$$

$$E = 2500 \text{ (Nm}^3/\text{h)} \times 0,49 \text{ (\%)} \times 0,01 \text{ (MWh/h)}$$

$$E = 12,25 \text{ MW térmicos}$$

Periodo 2026 (ene – feb - mar)

$$E = Q \text{ Nm}^3/\text{h} \times \% \text{CH}_4 \times \text{PCI CH}_4$$

$$E = 2800 \text{ (Nm}^3/\text{h)} \times 0,49 \text{ (\%)} \times 0,01 \text{ (MWh/h)}$$

$$E = 13,72 \text{ MW térmicos}$$

El rango aproximado de 12,25 MW a 13,72 MW térmicos significa la cantidad de energía que tiene el biogás captado en condiciones reales de la operación, según el porcentaje de metano y el caudal que han captado en ese periodo. Entonces sin importar la potencia instalada (número de motores = 9MW), ese es el potencial de la energía real que tiene el biogás, con esto conocemos el límite real de generación.

Según la base de datos, el sistema actual genera aproximadamente:

- i. **Periodo 2023-2025: E 3,5MW**
- ii. **Periodo 2026 (ene – feb - mar): E 4,5 MW**

Para calcular el rendimiento de transformación eléctrica de los motores se utiliza la siguiente fórmula:

$$\eta_{elect.} = \frac{\text{MW generados}}{\text{MW térmicos (potencia biogás térmica)}}$$

i. Periodo 2023-2025: E 3,5MW

$$\eta_{elect.} = \frac{3,5 \text{ MW}}{12,25 \text{ MW térmicos}} = 0,28 = 28\%$$

ii. Periodo 2026 (ene – feb - mar): E 4,5 MW

$$\eta_{elect.} = \frac{4,5 \text{ MW}}{13,72 \text{ MW térmicos}} = 0,32 = 32\%$$

En base a la data de la operación actual de generación de energía a través del biogás del relleno sanitario el Inga, se presenta la Tabla 7. como resumen de valores registrados desde el 2023, hasta la fecha:

Tabla 7. Datos reales de generación de biogás y energía producida en Relleno Sanitario El Inga

Periodo	Caudal biogás captado (Nm³/h)	% CH₄	Potencia térmica del biogás (MW)	Potencia eléctrica generada (MW)	Rendimiento transformación eléctrica
2023 – 2025	2.500	48% – 49%	12.25 MW	3,5 MW	28%
2026 (ene– feb–mar)	2.800	49%	13,72 MW	4,5 MW	32%

Fuente: Autora (2026)

Como se puede observar en la tabla presentada, tomando en cuenta que el relleno sanitario el Inga, tiene más de 20 años, su tiempo de vida útil culmina aproximadamente en octubre 2026 y en base a los datos analizados se observa que el sistema de Gasgreen, tiene una capacidad operativa de 9MW, su operación evidencia que no existe limitación por parte de la capacidad instalada de 9MW. Los datos analizados durante dos

periodos, del 2023 al 2025 y los meses de enero, febrero y marzo del 2026, aumenta su porcentaje de rendimiento de generación eléctrica, y su captación del caudal de biogás, esto coincide que la administración actual del EMGIRS EP, en el periodo 2025 hasta la actualidad, mejoraron las condiciones de operación del relleno sanitario para potenciar y mejorar la captación del biogás, reflejando:

- i. Mayor estabilidad del caudal del biogás (2.5 a 2.9 mil Nm³/h biogás).
- ii. Incremento de la generación eléctrica (3.5 MW a 4.5MW).

Sin embargo esta mejora no implica que se ha podido generar la potencia real instalada (los 9MW), lo que confirma que el sistema tiene una limitación, ya sea en la disponibilidad del recurso captado, o el rendimiento de transformación eléctrica del motor, o no se está captando el total del biogás producido, por lo tanto analizando la data, y los valores de rendimiento eléctrico calculado, estos justifican que puede existir factores de pérdidas en el sistema de captación como fugas, aireación, planificación de captación, calibración de motores, capacidad de carga, variabilidad en la concentración del metano (48-49%), operación parcial de motores ya sea por fallas en el sistema o mantenimiento, esto se aproxima debido a que en la base de datos, existen valores inconsistentes con rendimientos no posibles.

La operación actual tiene un rendimiento entre 28% al 32% aproximadamente utilizando dos (2) a tres (3) motores de los cinco (5) instalados, lo que evidencia un sobredimensionamiento de la capacidad de generación respecto al potencia enérgica del relleno.

3.2.1. Análisis de resultados de modelamiento

Se emplea el método del Modelo Ecuatoriano, y para el presenta caso, utilizamos los siguientes parámetros y criterios detallados en la Tabla 8:

Tabla 8. Parámetros modelamiento Relleno Sanitario (escenario 2 tabla 4)

Parámetro	Modelo Ecuatoriano
k (1/año)	0,070
L ₀ (m ³ /t) CH ₄	60

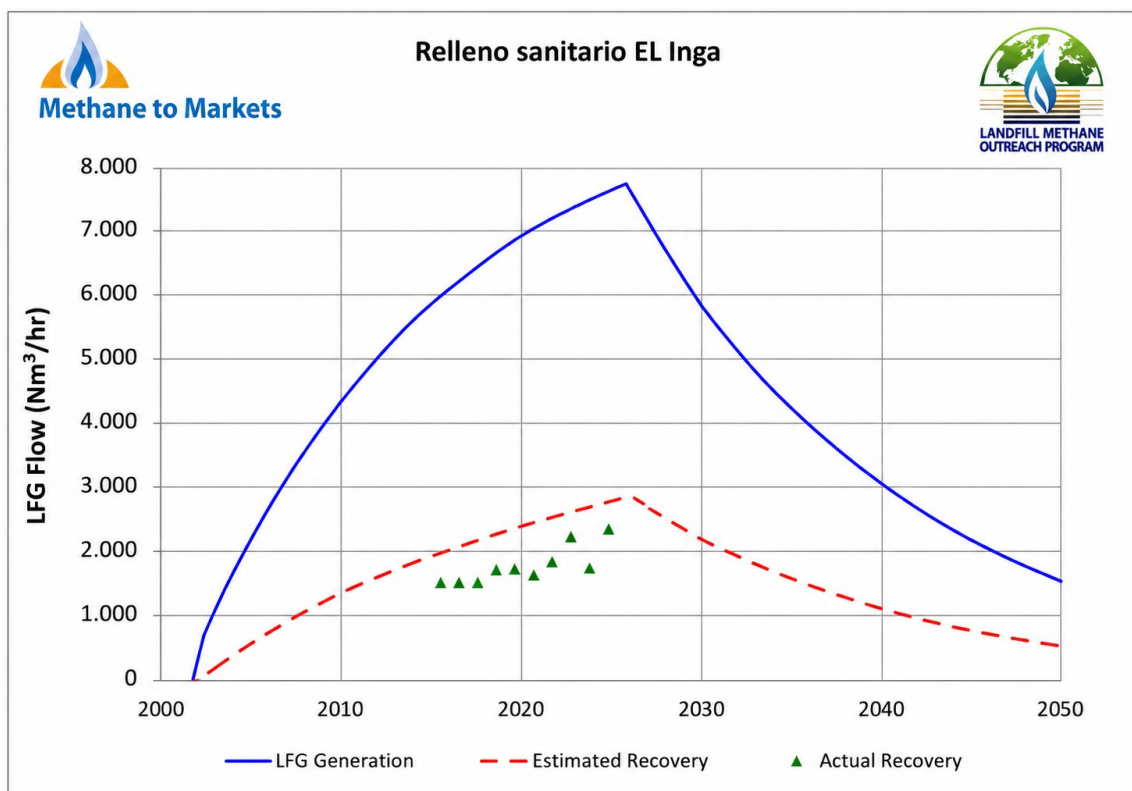
% CH ₄	50%
% Captación biogás	34%

Fuente: Arévalo (2026)

En la Tabla 8. se presenta los valores utilizados para el modelamiento de la estimación del biogás, utilizamos data de ingreso de toneladas diarias reportadas por EMGIRS EP, se colocó los valores de los últimos años del caudal captado de biogás de la operación actual.

Una vez realizado el modelamiento se presenta a continuación en la Figura 8, los resultados obtenidos de la estimación de producción de biogás que se dispone en el RS El Inga:

Figura 8. Tendencia y proyección de la situación real de RS El Inga



Fuente: Autora (2026)

Como se puede observar, la Figura 8 muestra un análisis comparativo del comportamiento del biogás del relleno durante toda su vida útil, a partir de la generación

total de biogás (línea azul), la recuperación estimada (línea roja) que se proyectó con el 34% de eficiencia de captación y el caudal de captación real de biogás (puntos verdes), evidenciando que el relleno se encuentra ya en la fase madura con un pico de generación alrededor del año 2025.

La línea azul representa la potencia total de generación de biogás que puede producir el relleno, mostrando que aún se puede generar energía durante unos años más, por su parte la línea roja, corresponde a la recuperación estimada, es decir a la cantidad de biogás que se puede captar, proyectados con el 34% de eficiencia de captación del sistema, sin embargo los datos reales que son los puntos verdes, evidencian que la captación efectiva es menor al potencia recuperable (línea roja) lo que indica que existe deficiencias o limitaciones en el sistema actual.

A su vez, los valores de la captación actual muestran que ha existido durante los años una operación variable y no completamente estabilizada posiblemente asociadas a condiciones de mantenimiento, configuración del sistema, etc.

En conjunto la Figura 8, muestra que aún existe potencial significativo de biogás en el relleno, y que no todo el gas generado es captado limitando la generación de energía.

3.2.2. Condiciones operativas del sistema actual y comparación con el modelamiento ecuatoriano

Aunque se ha establecido por experiencia de casos reales en el país que el porcentaje de captación de biogás de un sistema de aprovechamiento energético es del 34%, con el modelamiento podemos determinar que para el año 2026 el relleno genera aproximadamente:

$$Q_{generado} = 8.431 \text{ Nm}^3/h$$

Y con el porcentaje de eficiencia de captación del 34% el caudal recuperado es:

$$Q_{captado} = 8.431 \frac{Nm^3}{h} \times 0,34 = 2.867 \frac{Nm^3}{h}$$

Un valor coherente y que tiene relación con los datos reportados por Gasgreen, donde el caudal captado se encuentra alrededor de $2.880 \frac{Nm^3}{h}$, concluyendo que el modelo ecuatoriano utilizado si proyecta una estimación adecuada a la operación actual del sistema. Por otra parte, en base a este valor del caudal captado de la operación real y los 12.25 MW calculados de potencial térmico del biogás, significa que, aunque el relleno genera mayor cantidad de biogás, la operación actual solo permite recuperar aproximadamente 12.25 MW térmicos para el sistema de generación eléctrica

Y al tener en la operación una generación eléctrica registra entre 3.5 MW y 4.5 MW, el rendimiento de transformación eléctrica de los motores esta entre 28% al 32%.

También con esta comparativa, se determinó que se puede mejorar el porcentaje de captación de biogás que se genera diariamente en el relleno, influenciando directamente en todo el sistema, debido a que considerando el valor máximo de LFG Generation rate del modelo ecuatoriano nos refleja que se genera un total de aproximadamente $8431 \frac{Nm^3}{h}$ de biogás, aumentando el porcentaje de eficiencia al 40% nos permite cambiar el escenario, aumentando el caudal captado, el potencial térmico del biogás y por ende la generación eléctrica.

Sin embargo, en base al análisis realizado, se puede determinar que existen limitaciones en el sistema actual, pudiendo ser diversos factores operativos y organizacionales que influyen directamente en la eficiencia de captación y aprovechamiento del biogás.

Entre los principales aspectos identificados se destacan:

- i. Paradas no programadas de moto generadores, asociadas a actividades de mantenimiento correctivo o preventivo, que en ciertos casos involucran la indisponibilidad simultánea de más de una unidad de generación.
- ii. Variabilidad en la disponibilidad del biogás captado, debido a la falta de optimización en la red de pozos de extracción y en su interconexión.

- iii. Configuración no estandarizada del sistema de captación, donde la conexión de pozos y líneas de extracción no sigue necesariamente criterios técnicos homogéneos, lo que puede generar pérdidas de eficiencia.
- iv. Pérdidas asociadas a fugas superficiales y subsuperficiales, que reducen el volumen de biogás efectivamente recuperado.

Adicionalmente, factores inherentes a la etapa de operación del relleno, como la heterogeneidad en la disposición de residuos, la evolución de las celdas y la interacción con condiciones climáticas, también influyen la captación del biogás y el comportamiento del sistema.

Es importante señalar que estos aspectos no deben interpretarse como deficiencias puntuales del operador, sino como condiciones propias de sistemas complejos en operación continua, especialmente en infraestructuras que no fueron diseñadas inicialmente con criterios integrales de aprovechamiento energético.

3.3. Modelamiento Complejo Ambiental del DMQ

Una vez analizada la condición real del aprovechamiento energético del biogás en el Relleno Sanitario El Inga, se procede a desarrollar el modelamiento de la generación de biogás esperada en el Cubeto 1 del Complejo Ambiental del DMQ. Este análisis permite establecer una estimación del comportamiento del sistema, así como definir aspectos clave para su futura implementación, entre ellos el dimensionamiento de equipos, las fases de incorporación del sistema de generación y las condiciones de operación del cubeto.

El proyecto de aprovechamiento energético se plantea para el Cubeto 1 del Complejo Ambiental del DMQ, el cual comprende la Celda de transición, Zona 1, Zona 2, Zona 3 y el domo de cierre. A diferencia del caso del Relleno Sanitario El Inga, donde se trabajó con información histórica y operativa real, en esta sección el análisis se desarrolla con base en información proyectada del cubeto, considerando su capacidad de disposición, la tasa de ingreso de residuos y la vida útil de cada una de sus fases operativas (Ver Tabla 3).

En este contexto, el modelamiento matemático se realiza utilizando el modelo ecuatoriano previamente seleccionado en el capítulo anterior, con el fin de estimar la generación de biogás a lo largo del tiempo y proyectar su potencial de captación y aprovechamiento energético.

Adicional en este ejercicio se analiza bajo diferentes condiciones de eficiencia de captación (28%, 34%, 40%) desarrollados a lo largo de este capítulo, que constituyen la base para los cálculos posteriores relacionados con caudal recuperable, número de moto generadores, potencia real, producción de energía y beneficios ambientales y económicos del proyecto.

3.3.1. Escenarios evaluados

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema de generación y aprovechamiento energético del biogás en el Complejo Ambiental del DMQ, se definieron tres escenarios de eficiencia de captación, cuyos valores, representan las distintas condiciones operativas, tomando como referencia tanto la realidad del Relleno Sanitario El Inga, Relleno Sanitario Pichacay, como las posibles mejoras en el diseño del nuevo sistema.

- i. Escenario 1 (eficiencia de captación de biogás al 28%): Representa la condición real del periodo 2023 al 2024 del relleno sanitario El Inga, valor que refleja el comportamiento actual del sistema de captación del biogás del sistema de Gasgreen.
- ii. Escenario 2 (eficiencia de captación de biogás al 34%): Representa una condición evaluada según la experiencia en campo y criterios técnicos establecido del estudio realizado. Es uno de los escenarios más representativo con respecto al comportamiento esperado del cubeto 1, incorporando mejoras respecto al sistema actual, sin asumir condiciones óptimas.

- iii. Escenario 3 (eficiencia de captación de biogás al 40%): Representa una condición mejorada de captación y mayor aprovechamiento del biogás, obteniendo un sistema con un alto nivel de gestión operativa, planteando desde un inicio la optimización de todas las fases del proyecto, aprovechando la construcción del cubeto para captar el biogás tanto en la parte inferior y superior para aprovechar todo el caudal de biogás, reduciendo fugas y complementándolo con la recirculación de lixiviado, etc.

3.4. Análisis de los resultados del Modelamiento

Se procede a realizar el modelamiento en base a los datos de entrada del cubeto 1, y para el presenta caso, utilizamos los siguientes datos y criterios como se establece en la Tabla 9, con las características que presenta nuestro caso de estudio, detallando toneladas proyectadas, carga orgánica, entre otros:

Tabla 9. Análisis de resultados de modelamiento

Características	Valor	Unidad
Toneladas de ingreso de residuos	2000	ton/día
Fracción orgánica	53,1	%
Contenido de metano	50	%
Precipitación	1500	mm/año
Vida útil del cubeto	4,7	años
Tiempo de generación de biogás	1	año

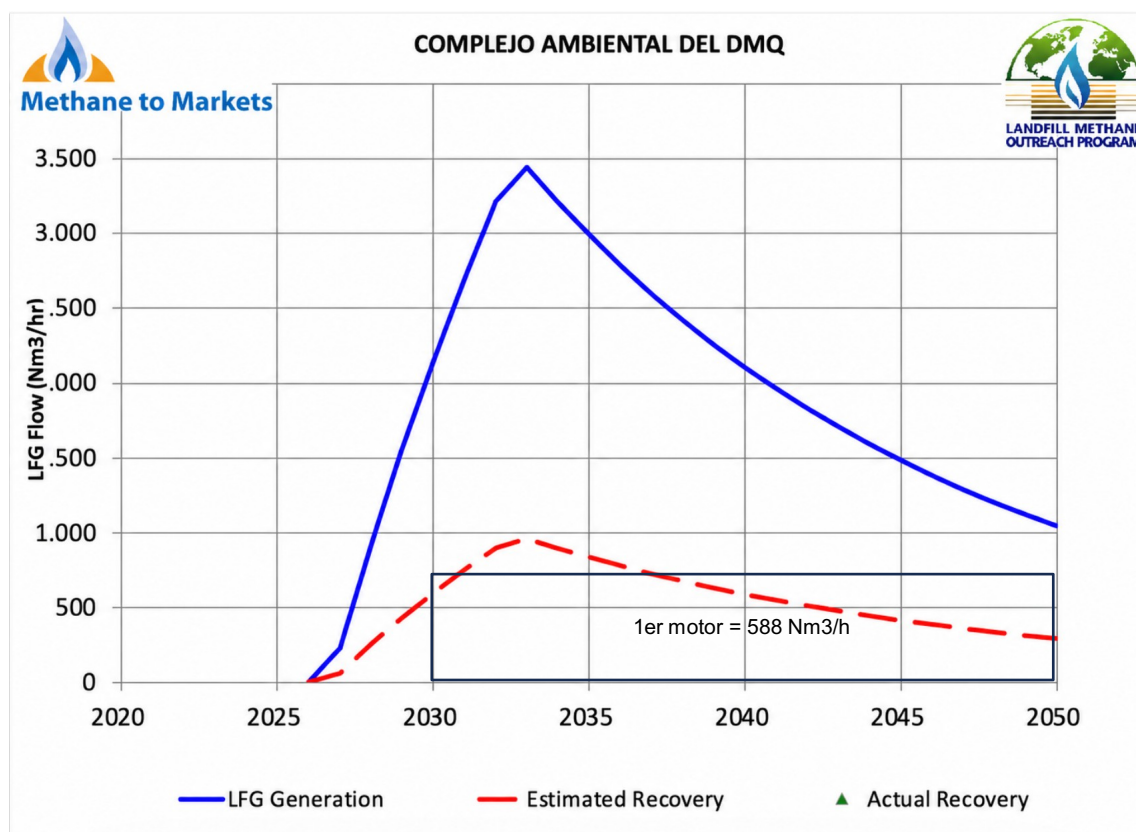
Fuente: Autora (2026)

En base a los parámetros determinados en la Tabla 9, se ha modelado tres escenarios con diferentes porcentajes de eficiencia de captación:

3.4.1. Escenario 1 (eficiencia de captación de biogás al 28%):

El primer escenario desarrollado se evalúa con el 28% de eficiencia de captación, valor que representa las condiciones de la operación actual del Relleno Sanitario El Inga, reflejados en la proyección del Complejo Ambiental.

Figura 9. Curva estimación biogás escenario 1(28%)



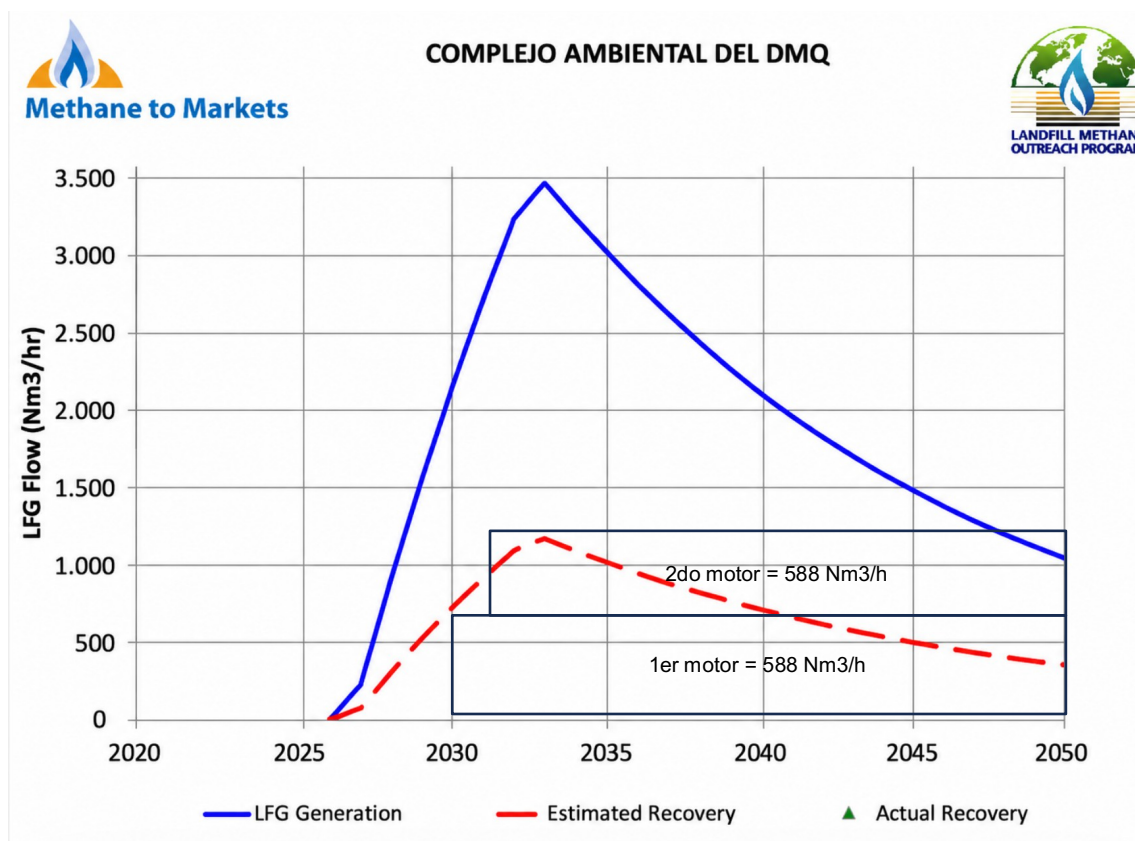
Fuente: Autora (2026)

En la Figura 9, se observa que, considerando el porcentaje de eficiencia de captación del 28% y tomando como base el caudal mínimo requerido para la operación y funcionamiento del motor de 1MW (588 Nm³/h), el caudal de biogás se proyecta a 964 Nm³/h, indicándonos que para este escenario se necesita implementar un motor.

3.4.2. Escenario 2 (eficiencia de captación de biogás al 34%):

El segundo escenario desarrollado se evalúa con el 34% de eficiencia de captación, valor que representa las condiciones actuales de casos de estudio existentes en el país para aprovechamiento energético.

Figura 10. Curva estimación biogás escenario 2 (34%)



Fuente: Autora (2026)

En la Figura 10, presenta el escenario que tiene las condiciones y rendimiento más apegados a la realidad de casos existentes en el país, determinando que la curva proyecta que sí existe biogás suficiente y disponible para su aprovechamiento e implementación.

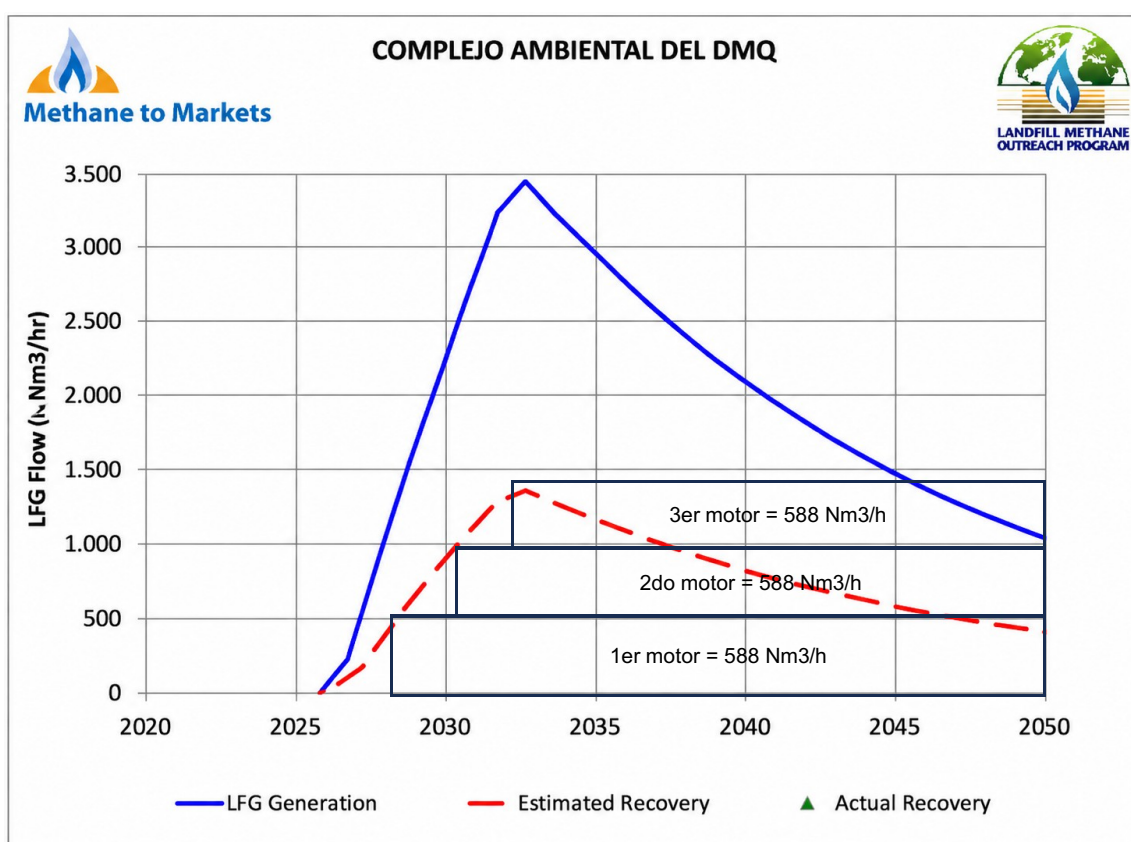
En base a esto, se observa que la generación de biogás presenta un incremento progresivo hasta alcanzar un punto máximo en el año 2033, que se ajusta donde el cubeto llega a su mayor acumulación de degradación, sin embargo es importante señalar que la disminución posterior a este punto, no implica reducción real de producción de biogás, debido a que el complejo ambiental tiene la planificación futura de construir nuevos cubetos en etapas posteriores, provocando que la producción incremente, esto incluso se podría proyectar al aumento del potencial de aprovechamiento que se tiene planificado, por lo tanto en base a la Figura 10, podemos determinar que se puede

implementar de forma gradual dos (2) motores de 1 MW y tener la planificación de un (1 motor) de back up para tiempo de mantenimientos.

3.4.3. Escenario 3 (eficiencia de captación de biogás al 40%):

Para el tercer caso, en la Figura 11, se evalúa la estimación de biogás con 40% de eficiencia de captación, valor establecido para la mejora y optimización del sistema de aprovechamiento energético:

Figura 11. Curva estimación biogás escenario 3 (40%)



Fuente: Autora (2026)

Al comparar los tres escenarios, podemos determinar que la eficiencia de captación es un parámetro condicionante e influyente en todo el sistema, debido a que puede cambiar el planteamiento del proyecto en la capacidad de generación que se instalará. Con base en este análisis, se toma como referencia el segundo escenario del 34% de eficiencia de captación, donde se plantea la necesidad de implementar dos (2) motores para la operación durante todos los años de ejecución del proyecto, y se sugiere que se debe

proyectar la compra de un (1) motor de 1MW como back up, para actividades de mantenimiento y overhaul de los motores programados, garantizando la continuidad operativa, este escenario se toma como referencia en este estudio, debido a que representa la situación y condiciones de las operaciones actuales que están operando en el país.

3.5. Cálculo del caudal de biogás requerido por moto generador

Para el dimensionamiento del sistema de generación eléctrica, es necesario determinar el caudal de captación que necesitan los motores para su funcionamiento

Para el caso de estudio, es necesario calcular primero el caudal de biogás requerido por motor, y expresarlo en condiciones normalizadas, con el fin de obtener un valor más representativo del gas realmente disponible para generación eléctrica.

El caudal normalizado de biogás constituye la variable base para determinar la potencia real del sistema y el número de motores que pueden operar de forma eficiente en cada escenario analizado. El cálculo del caudal normalizado para el caso de estudio se presenta a continuación:

3.5.1. Cálculo del caudal normalizado (N m³/h) para el motor de 1MW

El caudal de un gas depende de la presión y de la temperatura y se debe normalizar: m³ - > Nm³

El **caudal normalizado** (Q_{nom}) convierte el caudal medido a las condiciones de referencia normales: **0°C, 101 325 Pa, gas seco**.

Fórmula general

$$Q_{nom} = Q_{mes} \times \frac{273,15}{273,15+T} \times \frac{P_{atm}(Z)+P_{mes}}{101\,325} \times d1 - \frac{e_s(T)}{P_{atm}(Z)} f = Q_{mes} \times k_T \times k_Z \times k_H$$

a. Desglose de los factores de corrección:

Corrección de temperatura:

$$k_T = \frac{273,15}{273,15 + T[^\circ\text{C}]} = \frac{273,15}{293,15} = 0,925$$

$$273,15 / 293,15 = 0,9318$$

Corrección de altitud:

$$P_{atm}(Z) = 101\,325 \times \left(1 - \frac{Z}{44\,330}\right)^{5,255} \text{ [Pa]}$$

$$k_z = \frac{P_{atm}(Z) + P_{mes}}{101\,325} = \frac{75\,156 + 17\,000}{101\,325} = 0,910$$

Corrección de humedad al 100%:

Presión de vapor saturante (Magnus-Tetens):

$$e_s(T) = 611,2 \times e^{\frac{17,67 \cdot T}{T + 243,5}} \text{ [Pa]}$$

$$k_H = 1 - \frac{e_s(T)}{P_{atm}(Z)} = 0,965$$

Donde

Q_{mes} = caudal medido del biogás (m³/h) en las condiciones del sitio

T = Temperatura en °C = ~ 22 °C

P_{gas} = presión absoluta en el sitio de medida (Pa)

P_{atm}(Z) = presión atmosférica depende de la altura Z (msm) = ~ 2450 m Pa

P_{mes} = Presión medida en la tubería en las condiciones del sitio = 170 Pa (1mbar = 100

Pa) = ~ 170 mbar = 17'000 Pa

e_s(T) = presión de vapor saturante dependiendo de la temperatura, considerando que el biogás es saturado, lo que es generalmente el caso = Pa
(T °C + 273.15 K)

Sin embargo, tomamos en cuenta un motor de 1000 KW trabajando a 80%:

$$1 \text{ MW} = 1000 \text{ KW} = 1000 \text{ KWh/h} \times 0,80 = 800 \text{ KWh/h} = 0,8 \text{ MW/h}$$

El CH₄ tiene un poder calorífico de 13.9 KWh/kg o de 10 KWh/Nm³

b. Para un rendimiento eléctrico del motor de 0.40:

Caudal de CH₄ necesario en condición normalizada:

$$Q_{CH_4} \text{ (Nm}^3\text{/h)} = 800 \text{ KW/h} / (10 \text{ KWh/Nm}^3) / 0.40 = 200 \text{ Nm}^3_{CH_4}\text{/h}$$

Caudal de biogás necesario en condición normalizada con 50% metano:

$$Q_{\text{biogás}} \text{ (Nm}^3\text{/h)} = Q_{CH_4} / 0.5$$

$$Q_{\text{biogás}} \text{ (Nm}^3\text{/h)} = 200 / 0.5 = 400 \text{ Nm}^3_{\text{biogás}}\text{/h}$$

Entonces **el caudal teórico normalizado de biogás para generar 1MW es 588 Nm³_{biogas}/h**

Para pasar del caudal normalizado al caudal que se puede medir en las condiciones locales, hay que utilizar la fórmula:

$$Q_{\text{nom}} \text{ (Nm}^3\text{/h)} = Q \text{ med (m}^3\text{/h)} \times P_{\text{gas}}/P_N \times T_N/T \text{ med}$$

$$Q \text{ mes (m}^3\text{/h)} = Q_{\text{mes}} = Q_{\text{nom}} / (k_T \times k_z \times k_H)$$

Utilizando el valor de 662 Nm³/h (40% metano) dada por el productor tenemos

$$Q_{\text{mes}} = 588 / (0.925 \times 0.910 \times 0.965) = 724 \text{ m}^3\text{/h}$$

= 724 m³/h biogás medido en las condiciones locales = Q motor

Y analizando los datos generados del relleno sanitario, en la operación actual, el caudal normalizado necesario para generar 1MW es 588 Nm³_{biogas}/h de biogás captado, resultado que se ajusta al valor obtenido mediante los cálculos realizados asumiendo 50% de metano y 34% de eficiencia de captación.

Por lo tanto, el valor teórico calculado indica que un moto generador de 1 MW requiere aproximadamente 588 Nm³/h en condiciones normalizadas o 724 m³/h en las alturas y temperaturas de la zona.

3.6. Cálculos de parámetros para el cubeto 1

3.6.1. Cálculo de número de motores a implementar

Para este cálculo utilizaremos de referencia de caso de estudio las condiciones del Escenario 2 con valores de estimación de biogás con una captación del 34%. Para determinar el número de motores que necesitamos en el sistema, se realiza la siguiente operación:

$$N = \frac{Q_{rec\ biogás} (Nm^3/h)}{Q_{motor} (Nm^3/h)}$$

Tomando el pico más alto de biogás disponible ($Q_{rec\ biogás} (Nm^3/h)$) se tiene lo siguiente:

$$N = \frac{1049}{588} = 1.78 \text{ motores} = 2 \text{ motores de } 1 \text{ MW} + 1 \text{ back up}$$

(recomendable en tiempo de mantenimiento)

3.6.2. Potencia real del sistema

Para determinar la potencia real del sistema se debe realizar mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{Q_{rec\ biogás} (m^3/h)}{Q_{motor} (Nm^3/h)}$$

$$P = \frac{964}{588} = 1,63 \text{ MW}$$

3.6.3. Cálculo de toneladas de CO₂ evitadas

Suponemos que:

Tabla 10. Supuestos de cálculo de toneladas de CO₂ evitadas

Supuestos para t _{CO2e}		
Parámetro	Valor	Unidad

Tiempo de operación	8000	h/año
Fracción de CH ₄ (f CH ₄)	0,5	%
Densidad CH ₄	0,000716	kg/ Nm ³
GWP CH ₄	25	tCO ₂ e / t CH ₄
1 Nm ³ /h	78,4	tCO ₂ e / año

Fuente: Autora (2026)

Para el cálculo de toneladas de CO₂ evitadas se utiliza la siguiente fórmula:

$$\mathbf{tCO_2e = tCH_4 \times 25}$$

Para calcular las toneladas de tCH₄/año se realiza el siguiente cálculo:

$$tCH_4/año = Q_{rec} (Nm^3/h) \times t \times f CH_4 \times \text{densidad } CH_4 (kg/ Nm^3)$$

Tomando en cuenta el valor de la densidad del metano:

$$\text{Densidad } CH_4 (kg/ Nm^3) = 0,716 (kg/ Nm^3) = 0,000716 t/ Nm^3$$

Reemplazamos los valores en la fórmula:

$$t CH_4/año = Q_{rec} (Nm^3/h) \times t \times f CH_4 \times \text{densidad } CH_4 (kg/ Nm^3)$$

$$GWP CH_4 = 25 (tCO_2e / t CH_4)$$

Reemplazamos en la fórmula inicial y tenemos que:

$$\mathbf{T CO_2e = t CH_4 \times 25}$$

$$T CO_2e = Q_{rec} (Nm^3/h) \times t \times f CH_4 \times \text{densidad } CH_4 (kg/ Nm^3) \times 25$$

$$T CO_2e = Q_{rec} (Nm^3/h) \times 8000 h/año \times 0,50 \times 0,000716 t/ Nm^3 \times 25$$

$$T CO_2e = Q_{rec} (Nm^3/h) \times 78,4 (tCO_2e / año)$$

3.6.4. Cálculo bonos de carbono e ingresos por venta de bonos de carbono

Para el cálculo de bonos de carbono utilizamos estos supuestos:

Tabla 11. Supuestos bonos de carbono

Bonos de carbono		
1 bono	1	tCO ₂ e e
Precio mercado bonos de carbono	1,66	USD/bono
1 Nm ³ /h de biogás	2472	USD/año
1 MW	588	Nm ³ /h

Fuente: Autora (2026)

Ingresos (\$) bonos de carbono

$$\text{Ingresos (\$)} = \text{tCO}_2\text{e} * \text{precio mercado bonos (\$)}$$

Ingresos (\$) venta de energía

$$\text{Ingreso energía} = 0,1236 \text{ (\$/KWh)} = 123,60 \text{ (\$/MWh)}$$

Para calcular el ingreso de valores por la venta de bonos de carbono se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Ingreso energía (\$/año)} = E \text{ vendida (KWh / año)} \times 0,1236 \text{ (\$/KWh)}$$

Pero determinar la energía vendida que se tiene en base a la siguiente fórmula:

$$E \text{ vendida (KWh / año)} = P(\text{MW}) \times 8000 \text{ (h/año)}$$

Y reemplazamos en la fórmula inicial:

$$\text{Ingreso energía (\$/año)} = P(\text{MW}) \times 8000 \text{ (h/año)} \times 0,1236 \text{ (\$/KWh)}$$

$$\text{Ingreso energía (\$/año)} = P(\text{MW}) \times 8000 \text{ (h/año)} \times 123,60 \text{ (\$/MWh)}$$

$$\text{Ingreso energía (\$/año)} = P(\text{MW}) \times 988'800 \text{ (\$/ (año} \times \text{MW))}$$

Una vez realizados los cálculos correspondientes, se observa en la Tabla 12, los resultados, en base a los parámetros adoptados para el caso de estudio.

Tabla 12. Cálculos para implementación proyecto

LFG GENERATION AND RECOVERY PROJECTION																				
COMPLEJO AMBIENTAL DEL DMQ																				
Fases	Year	Disposal Rate	Waste In-Place	LFG Generation Rate			System Efficiency	LFG Recovery from Existing and Planned System			Cálculos para el planteamiento del proyecto con parametros de escenario 2 con una eficiencia de captacion del 34% con un caudal de 588Nm3/h por motor									
		(metric tonnes/yr)	(metric tonnes)	(m3/min)	(m3/hr)	(mmBtu/yr)	(%)	(m3/min)	Q rec (Nm3/hr)	(mmBtu/yr)	Q biogas necesario para 1MW (Nm3/h)	N motores	P real (MW)	P max instalada (MW)	tCO2e	Bonos de carbono estimado	Ingresos (\$) bonos de carbono	Ingresos (\$) energía (\$/año)	Producción Anual MWh	Q rec M3/año
Celda de transición (octubre 2026 - Jun 2027)	2026	240.000	240.000	0,0	0	0	34%	0,0	0	0	588	0,0	0,00	0,00	0	0	\$0,00	\$0	0	0
Zona 1 (30/06/2027 - 23/07/2028)	2027	730.000	970.000	3,8	230	35.983	34%	1,3	78	12.234	588	0,0	0,13	0,00	6128	6128	\$10.171,84	\$0	1164	684.650
Zona 2 (24/07/2028 - 16/11/2029)	2028	730.000	1.700.000	15,2	914	142.998	34%	5,2	311	48.619	588	1,0	0,53	0,80	24352	24352	\$40.423,52	\$866.189	4627	2.720.840
Zona 2 (24/07/2028 - 16/11/2029)	2029	730.000	2.430.000	25,8	1.551	242.778	34%	8,8	527	82.545	588	1,0	0,90	0,80	41343	41343	\$68.630,00	\$866.189	7856	4.619.371
Zona 3 (17/11/2029 - 11/05/2031)	2030	730.000	3.160.000	35,8	2.145	335.813	34%	12,2	729	114.176	588	1,0	1,24	0,80	57186	57186	\$94.929,55	\$866.189	10867	6.389.550
Zona 3 (17/11/2029 - 11/05/2031)	2031	730.000	3.890.000	45,0	2.699	422.557	34%	15,3	918	143.670	588	2,0	1,56	1,60	71958	71958	\$119.451,08	\$1.732.378	13674	8.040.054
Domo de cierre (2030 - 2031)	2032	464.034	4.354.034	53,6	3.216	503.438	34%	18,2	1.093	171.169	588	2,0	1,86	1,60	85732	85732	\$142.314,81	\$1.732.378	16291	9.578.974
	2033	0	4.354.034	57,4	3.443	538.974	34%	19,5	1.171	183.251	588	2,0	1,99	1,60	91783	91783	\$152.360,46	\$1.732.378	17441	10.255.129
	2034	0	4.354.034	53,5	3.210	502.536	34%	18,2	1.092	170.862	588	2,0	1,86	1,60	85578	85578	\$142.059,95	\$1.732.378	16262	9.561.819
	2035	0	4.354.034	49,9	2.993	468.562	34%	17,0	1.018	159.311	588	2,0	1,73	1,60	79793	79793	\$132.455,82	\$1.732.378	15162	8.915.381
	2036	0	4.354.034	46,5	2.791	436.884	34%	15,8	949	148.541	588	2,0	1,61	1,60	74398	74398	\$123.500,99	\$1.732.378	14137	8.312.646
	2037	0	4.354.034	43,4	2.602	407.348	34%	14,7	885	138.498	588	2,0	1,50	1,60	69368	69368	\$115.151,56	\$1.732.378	13181	7.750.660
	2038	0	4.354.034	40,4	2.426	379.809	34%	13,7	825	129.135	588	1,0	1,40	0,80	64679	64679	\$107.366,60	\$866.189	12290	7.226.667
	2039	0	4.354.034	37,7	2.262	354.131	34%	12,8	769	120.405	588	1,0	1,31	0,80	60306	60306	\$100.107,95	\$866.189	11459	6.738.100
	2040	0	4.354.034	35,2	2.109	330.190	34%	12,0	717	112.265	588	1,0	1,22	0,80	56229	56229	\$93.340,04	\$866.189	10685	6.282.563
	2041	0	4.354.034	32,8	1.967	307.867	34%	11,1	669	104.675	588	1,0	1,14	0,80	52428	52428	\$87.029,67	\$866.189	9962	5.857.823
	2042	0	4.354.034	30,6	1.834	287.053	34%	10,4	623	97.598	588	1,0	1,06	0,80	48883	48883	\$81.145,93	\$866.189	9289	5.461.798
	2043	0	4.354.034	28,5	1.710	267.647	34%	9,7	581	91.000	588	1,0	0,99	0,80	45578	45578	\$75.659,96	\$866.189	8661	5.092.546
	2044	0	4.354.034	26,6	1.594	249.552	34%	9,0	542	84.848	588	1,0	0,92	0,80	42497	42497	\$70.544,88	\$866.189	8075	4.748.259
Total		4.354.034	68.992.442	662	39.698	6.214.118	34	225	13.497	2.027.952	588	2,0	1,99	1,60	1.058.220	1.058.220	\$1.756.644,61	\$20.788.531	201.083	118.236.832

Fuente: Autora (2026)

Como se había mencionado en este capítulo, se ha realizado el análisis de tres diferentes escenarios con porcentajes de captación, sin embargo, se ha seleccionado el escenario 2, con el 34% de eficiencia de captación para el desarrollo de todo el ejercicio y factibilidad del proyecto. En la Tabla 12, se presenta todos los cálculos desarrollados, donde nos indican que con el caudal mínimo normalizado de 588 Nm³/h, es necesario implementar dos (2) motores de 1MW, y adicional tener la proyección de un (1) back up para continuidad de la operación en tiempo de mantenimiento.

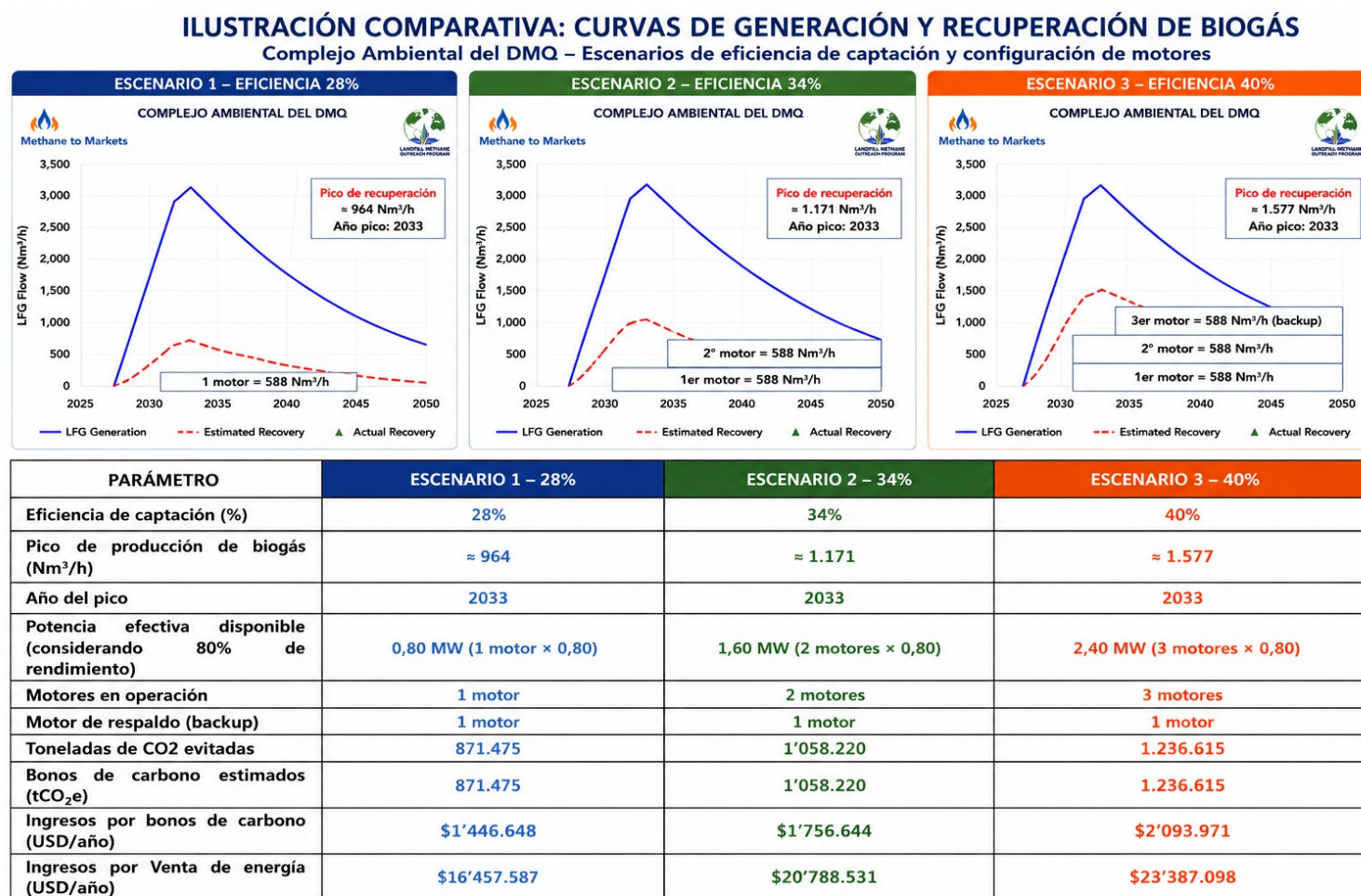
La compra de los dos (2) motores principales, se plantea su adquisición de forma gradual en el año 2029 y 2033 aproximadamente, con una generación 1,60 MW a su vez, el proyecto presenta beneficios económicos resultando que se plantea evitar 1'058.220 tCO₂ a la atmósfera, con un ingreso por comercialización de bonos de carbono equivalente a \$1'756.644,61.

Al ser un proyecto de aprovechamiento energético, sus ingresos por venta de energía están regidos por la Resolución Nro. ARCONEL- 006/ 2024, vigente desde septiembre de 2024, determinando que el precio actual para proyectos que generen hasta 10MW, es de 123,60 el MW. Hay que resaltar, que los ingresos del proyecto obtenidos en cálculos del modelo ecuatoriano, representa un potencial teórico de generación de energía no considerando las restricciones asociadas a la implementación gradual de motores, en contraste con el flujo financiero que se presenta en el siguiente capítulo, donde se modela según el cronograma de implementación de motores , limitación de rendimiento de motores, generación de MW, proyectando ingresos acumulados por venta de energía eléctrica de aproximadamente \$20,8 a \$ 17,5 millones.

Es decir que, para los resultados de ingresos del proyecto el Modelo Ecuatoriano estima el recurso disponible, mientras que el modelo financiero estima la energía efectiva comerciable. Resaltando que existe el recurso necesario en tiempo y cantidad para la implementación del proyecto, generando beneficios económicos, ambientales y sociales.

En la Figura 12. se ha realizado para finalizar el análisis, una comparativa entre los tres escenarios, estableciendo las diferencias en cada escenario en la parte operativa y económica, evidenciando que el incremento en la eficiencia de captación tiene un impacto directo en el potencial energético del sistema como se muestra a continuación:

Figura 12. Comparación tres escenarios de diferencia de eficiencias de captación de biogás



Fuente: Autora (2026)

Por otra parte, es importante detallar que el sistema de captación y tratamiento de biogás se considera operativo durante 8760h/año, debido a que el biogás excedente puede ser conducido a una antorcha de combustión controlada.

Tomando de base la Figura 12. que compara los escenarios, permite visualizar de manera clara el desempeño del sistema en función de la eficiencia de captación, se observa que, a medida que aumenta la eficiencia, el caudal del biogás recuperado y la potencia generada se incrementan mejorando el aprovechamiento energético.

Sin embargo, este aumento es relacionado con los requerimientos operativos, por una parte en el escenario del 28%, un motor cubre la demanda del proyecto, el escenario del 34% que es el porcentaje que más se apega a la realidad de casos existentes en el país, se alcanza un punto óptimo donde se puede implementar dos motores y finalmente para el escenario 40%, se plantea mejoras para alcanzar este porcentaje y aprovechar el recurso disponible, por lo que según el caudal recuperado refleja que se podría implementar tres motores para tener como respaldo debido a que los dos motores no cubre el total del caudal generado y así se puede evitar pérdidas de biogás y garantiza la continuidad operativa en tiempos de mantenimiento de equipos.

Por lo que se concluye que presenta ventajas significativas invertir mayormente al inicio y durante la operación del relleno sanitario para tener un rendimiento más eficiente de captación y por ende un rendimiento financiero optimizado, realizando desde el comienzo del cubeto trabajos operativos que mejoren las condiciones de captura de biogás y producción es la clave para mejorar el rendimiento financiero.

3.7. Resultados del escenario de eficiencia de captación al 34%

Sin embargo, como se ha mencionado el escenario con el 34% de eficiencia de captación, es el caso de estudio evaluado, debido a que las condiciones operativas son las más similares a la realidad del país, no sobrestimando ni operando con una eficiencia muy baja que no aproveche todo el recurso que genera el complejo ambiental.

Por lo tanto, en base a los cálculos realizados, se refleja en la Tabla 13:

Tabla 13. Resultados proyecto cubeto 1

Bloque	Parámetro	Valor	Observación
Condiciones del escenario	Eficiencia de captación	34%	● Adecuada
	Año pico	2033	
	Caudal recuperado pico	1.171 Nm ³ /h	Promedio
	LFG generado (constante)	3.443 Nm ³ /h	Promedio
Sistema de generación	Número de motores	2	1 back up
	Horas de trabajo	8760	● Eficiente
Desempeño energético	Potencia efectiva	1,60 MW	
	Producción energética	17.441,00 MWh/año	● Alta
Desempeño económico	Ingresos por energía	\$20.8 a \$ 17.5 Millones	● Rentable
	Bonos de carbono	1.05 millón tCO ₂ e acumuladas durante la vida útil	● Alto beneficio
	Ingresos de bonos carbono	\$ 1.7 millones	● Rentable

Fuente: Autora (2026)

La Tabla 13, representa un resumen de los resultados calculados en el escenario 2, con 34% de eficiencia de captación, estableciendo que según los valores presentados, el proyecto operativamente es viable, debido a la existencia suficiente de caudal de biogás y si bien es cierto, aunque son condiciones ideales, existen ciertas acciones que nos permitirían mejorar y llegar a tener la captación del biogás y aproximar el desempeño del proyecto hacia una eficiencia del 40% como se presenta a continuación.

3.8. Estrategias de optimización del sistema de captación y aprovechamiento de biogás

a. Implementar captación inferior y superior del biogás

La generación de biogás ocurre de forma heterogénea dentro del cuerpo del relleno, por lo que limitar la captación a un solo nivel reduce la eficiencia del sistema, se puede

aprovechar la construcción del cubeto para instalar sistemas de captación tanto en la parte inferior como en la parte superior del cuerpo de residuos, la combinación de drenes en el fondo con pozos verticales y redes superficiales incrementa el volumen recuperado, permitiendo interceptar de manera más eficiente el biogás generado en distintas zonas del relleno y reducir fugas hacia la superficie o hacia zonas no controladas.

b. Diseñar una red organizada de pozos y tuberías

Una red organizada mejora el balance hidráulico del sistema y facilita el control del vacío, del caudal y de la calidad del gas, por lo tanto, el sistema debe contar con una disposición planificada de pozos, cabezales y líneas de conducción, evitando conexiones improvisadas o no estandarizadas.

c. Evaluar la recirculación de lixiviados

La recirculación controlada de lixiviados puede favorecer la degradación de la fracción orgánica, aumentar la humedad del residuo y acelerar la generación de biogás. Esta estrategia debe evaluarse técnicamente, pero puede convertirse en un elemento importante para incrementar y acelerar el caudal de biogás recuperable y mejorar la estabilidad del sistema.

d. Diseñar una red organizada de pozos y tuberías

El sistema debe contar con una disposición planificada de pozos, cabezales y líneas de conducción, evitando conexiones improvisadas o no estandarizadas. Una red organizada mejora el balance hidráulico del sistema y facilita el control del vacío, del caudal y de la calidad del gas.

e. Incorporación de un sistema de respaldo

La inclusión de un motor adicional como respaldo operativo permite garantizar la continuidad en la generación eléctrica durante periodos de mantenimiento o fallas en los equipos principales. Esta estrategia evita la pérdida de biogás captado y contribuye a maximizar el aprovechamiento energético, mejorando la confiabilidad del sistema y los ingresos del proyecto.

3.9. Cronograma de implementación del proyecto

El horizonte temporal de implementación del proyecto es de diez y ocho (18) años posterior al título habilitante, construcción y montaje de equipos, iniciando la generación de energía, es decir establecido en tres (3) años de pre-operación y quince (15) años de operación. El cronograma mostrado en la Tabla 14. a continuación muestra las fases y tiempos referenciales de implementación del proyecto:

Tabla 14. Cronograma referencial del proyecto

[illegible]

Fuente: Autora (2026)

4. CAPITULO. EVALUACIÓN DE BENEFICIOS ECONÓMICOS DEL PROYECTO

Este capítulo presenta la evaluación económica del proyecto de aprovechamiento energético del biogás generado en el cubeto 1 del Complejo Ambiental del DMQ, se ha considerado los costos de inversión CAPEX y los costos de operación OPEX, así como también los ingresos derivados de la venta de energía eléctrica y la comercialización de los bonos de carbono que se generen de esta operación.

En base a los cálculos realizados en capítulos anteriores, se establece que el proyecto con una eficiencia energética y de captación del 34%, tiene una potencia máxima aproximadamente de 1,60 MW, basados en un requerimiento de 588 Nm³/h de biogás por MW.

4.1. Inversión Inicial CAPEX

La inversión total proyectada del proyecto asciende aproximadamente a (\$3'737.557,84) Tres millones setecientos treinta y siete mil, quinientos cincuenta y siete dólares con ochenta y cuatro centavos. A continuación, se detalla en la Tabla 15. los componentes planteados:

Tabla 15. Detalle de Inversiones CAPEX

\$3.737.557,84	Cronograma valores corrientes
Ingeniería.	Proyecto Ejecutivo (prefactibilidad y factibilidad EMGIRS emp. Elec.).
	Estudios Ambientales
	Ingeniería Civil
	Ingeniería Electromecánica
Obra.	Obra Civil Planta (3 motores)

	Drenes Horizontales de gas
	Tubería de superficie de gas con evacuación de condensación
	Obras de subestación
	Sistema de recirculación de lixiviados - bombeo
	Captación (40 pozos)
Costos Indirectos.	Importación Costos inherentes al traslado de motores a Ecuador
Equipos.	Enfriadora y chiller.
	Línea de transmisión de 2 kilómetros AT y Estación Seccionadora
	Motores 1 MW.
	Transformadores de 1000 KVA
	Líneas y cableados de baja tensión y media tensión
	Sistema Contra Incendios
	Subestación MT a AT
	Sondas, caudalímetros y equipos adicionales
	CCTV, Señalización y alumbrado exterior
	SCADA General
	Climatización.
	Equipo soplador
	Sistema de compresión de gas
	Sistema de almacenamiento de gas - buffer
	Equipo soplador
	Equipo para quema de excedentes (antorcha)

Fuente: Autora (2026)

A continuación, en la Tabla 16. Se presenta los valores que representan cada uno de estos subgrupos del detalle de inversiones para el proyecto:

Tabla 16. Resumen CAPEX

Detalle Resumido CAPEX	Total, USD\$
Ingeniería.	\$ 105.000,00
Obra.	\$ 279.000,00
Costes Indirectos.	\$ 80.000,00
Equipos	\$ 3.273.557,84
Total, Capex	\$ 3.737.557,84

Fuente: Autora (2026)

4.2. Costos de operación OPEX

Los costos de operación y mantenimiento OPEX acumulados en el proyecto asciende aproximadamente a (\$3' 485.991) tres millones de dólares, cuatrocientos ochenta y cinco mil novecientos noventa y uno como se observa en la Tabla 17.

Los costos de operación tienen un comportamiento de incremento gradual, donde el valor más importante se encuentra en el mantenimiento preventivo y correctivo de los motores. A continuación, se detallan todas las variables que se plantean para los costos de operación acumulada para implementación de dos (2) motores más un back up, para generación de 1.60 MW.

Tabla 17. Resumen detalle de OPEX

OPEX	
Mantenimiento Anual.	\$ 678.000,00
Repuestos de almacén.	\$ 66.000,00
Sueldos, salarios y asimilados.	\$ 749.960,43
Primas de seguros.	\$ 83.625,00
Suministros de caldera (agua y gasoil).	\$ 15.000,00
Overhaul motores (mantenimiento mayor)	\$ 270.000,00
Asesoría Legal	\$ 88.000,00
Outsourcing Contable	\$ 80.000,00
Red de Tuberías de Conducción de Biogás	\$ 48.000,00
Canon de Biogás Royalti	\$ 500.332,80
Costo de Venta de bonos de carbono	\$ 907.072,65
Total, OPEX	\$ 3.485.990,88

Fuente: Autora (2026)

4.3. Ingresos del proyecto

El proyecto genera importantes beneficios económicos:

- i. La venta de energía
- ii. Comercialización de bonos de carbono (CERS)

Donde se plantea que como retribución económica para EMGIRS EP, se entregue el 4% de la facturación mensual generada de la venta de energía producida por el proyecto. Y a su vez, el 100% de ingresos de la comercialización de bonos de carbono, una vez descontado los costos asociados al bróker intermediario de comercializar los bonos.

Los resultados de los ingresos generados del proyecto se muestran a continuación en la Tabla 18:

Tabla 18. Detalle de ingresos del proyecto

Años	Venta de MW	Bonos de carbono
2027	\$ -	\$ -
2028	\$ -	\$ -
2029	\$ 791.040,00	\$ -
2030	\$ 791.040,00	\$ -
2031	\$ 856.960,00	\$ 10.171,84
2032	\$ 1.582.080,00	\$ 40.423,52
2033	\$ 1.582.080,00	\$ 68.630,00
2034	\$ 1.582.080,00	\$ 94.929,55
2035	\$ 1.582.080,00	\$ 119.451,08
2036	\$ 1.582.080,00	\$ 142.314,81
2037	\$ 1.582.080,00	\$ 152.360,46
2038	\$ 1.582.080,00	\$ 142.059,95
2039	\$ 791.040,00	\$ 132.455,82
2040	\$ 791.040,00	\$ 123.500,99
2041	\$ 791.040,00	\$ 115.151,56
2042	\$ 791.040,00	\$ 107.366,60
2043	\$ 791.040,00	\$ 100.107,95
2044	\$ -	\$ 93.340,04
2045	\$ -	\$ 87.029,67
2046	\$ -	\$ 81.145,93
2047	\$ -	\$ 75.659,96
2048	\$ -	\$ 70.544,88
Total	\$ 17.468.800,00	\$ 1.756.644,61

Fuente: Autora (2026)

Para el desarrollo del escenario base de ingresos del presente estudio se consideró un precio de venta de energía de USD 123,60/MWh, valor establecido conforme a la

Resolución ARCONEL 006/2, mientras que el valor de bonos de carbono se ha tomado un valor referencial del mercado global de USD 1,66 por tCO₂ e (tomado del estudio de mercado presentado por la empresa consultora GTM S.A que está realizando actualmente el proyecto de factibilidad de este proyecto con EMGIRS EP).

Según los resultados presentados en la Tabla 22. El ingreso acumulado del proyecto es aproximadamente \$ 19.2 millones, tanto de la venta de energía como de comercialización de bonos de carbono generados por el aprovechamiento energético del biogás del Cubeto 1 del Complejo Ambiental del DMQ.

Hay que resaltar, que los ingresos del proyecto obtenidos en cálculos del modelo ecuatoriano, para la venta de energía, representa un potencial teórico de generación de energía no considerando las restricciones asociadas a la implementación gradual de motores, en contraste con el flujo financiero que se presenta en el siguiente capítulo, donde se modela según el cronograma de implementación de motores , limitación de rendimiento de motores, generación de MW, proyectando ingresos acumulados por venta de energía eléctrica de aproximadamente \$20,8 a \$ 17,5 millones.

4.3.1. Indicadores económicos del proyecto

El proyecto de aprovechamiento energético genera importantes beneficios económicos que según el modelo financiero del proyecto se reflejan los siguientes resultados presentados en la Tabla 19:

Tabla 19. Indicadores económicos del proyecto

Indicador	Valor
Tasa de descuento	12 %
TIR	14,74%
VAN	\$ 4' 858.557
Retorno de la Inversión (ROI)	303%
Tiempo de retorno (Payback)	3.6 años

Fuente: Autora (2026)

Los indicadores financieros indican que existe viabilidad económica en el proyecto, presentando un VAN positivo de USD 4,8 millones, generando beneficios superiores a la inversión inicial y un TIR de 14,74% superior a la tasa de descuento del 12% planteado en el proyecto, resultando que existe rentabilidad del proyecto.

Se muestra a continuación la evolución del VAN a lo largo de la temporalidad del proyecto que se plantea en diez y ocho (18) años establecidos en tres (3) años de pre operación y quince (15) años de operación.

Figura 13. Evolución del VAN en el proyecto



Fuente: Autora (2026)

En la Figura 13. Se observa que el proyecto depende específicamente de la generación de biogás del cubeto tomando en cuenta las variaciones tanto en su producción como ingresos, por lo que el VAN en los 18 años del proyecto se tiene una inversión fuerte en los primeros años debido a la adquisición de los motores. El pico más alto de producción es en el año 2033 con un caudal de 1.171 Nm³/h permitiendo la operación de dos motores y un back up, alcanzando una potencia de 1,60 MW.

5. CAPITULO. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

5.1. Discusiones generadas

El análisis desarrollado en la presente investigación permitió evaluar de manera integral la factibilidad del aprovechamiento energético del biogás en el Complejo Ambiental del DMQ, abordando componentes técnicos, ambientales y económicos. Los resultados obtenidos evidencian la importancia de utilizar metodologías que utilicen parámetros de modelamiento que sean representativas al contexto local, así como la necesidad de considerar variables operativas reales en la planificación de este tipo de proyectos.

Modelos matemáticos para estimación de biogás

Uno de los aspectos más relevantes del estudio corresponde a la comparación entre el modelo LandGEM y el modelo ecuatoriano. Los resultados muestran una diferencia significativa entre ambos enfoques, evidenciando que el modelo LandGEM sobreestima la generación de biogás en aproximadamente tres veces en comparación con el modelo ecuatoriano. Esta diferencia se debe principalmente a que el modelo LandGEM utiliza parámetros calibrados para condiciones de Estados Unidos, particularmente en el valor del potencial de generación de metano (L_0), el cual no refleja las características reales de los residuos sólidos urbanos del Ecuador.

En contraste, el modelo ecuatoriano incorpora parámetros ajustados a condiciones locales, como la composición de los residuos, el clima y la humedad, lo que permite obtener resultados más conservadores y representativos. Este hallazgo es consistente con la literatura técnica, donde se establece que la calibración de parámetros es fundamental para obtener estimaciones confiables en modelos de generación de biogás. En este sentido, la selección del modelo ecuatoriano no solo se justifica técnicamente, sino que también constituye una decisión metodológica clave que fortalece la validez de los resultados obtenidos en el estudio.

Generación de biogás

Por otra parte, el análisis de la operación que actualmente tiene el Relleno Sanitario El Inga permitió evidenciar que con la cantidad y porcentaje de residuos orgánicos que cuenta el DMQ, permite que el biogás que se estima en el cubeto 1, tiene las condiciones para ser aprovechado, sin embargo, es importante poner énfasis que se debe tomar acción en optimizar la operación tanto de captación como recirculación de lixiviados, que son factores que influyen directamente en la producción del biogás, debido a que el sistema actual presenta limitaciones operativas, como fugas, configuraciones no óptimas de la red de captación, mantenimiento inadecuado y variabilidad en la operación influyen directamente en esta eficiencia. Este resultado confirma que la captación del biogás no depende únicamente de su generación, sino principalmente de la calidad del diseño y la operación del sistema.

En el caso del Complejo Ambiental del DMQ, la evaluación de escenarios de eficiencias de captación (28%, 34% y 40%) permite establecer un rango de comportamiento posible, donde el 34% representa una condición realista y alcanzable bajo una adecuada gestión técnica. Por su parte, el escenario del 40% evidencia el potencial máximo del sistema bajo condiciones optimizadas, demostrando que la eficiencia de captación constituye el factor más crítico en el aprovechamiento energético del biogás, ya que condiciona directamente la potencia generada, los ingresos económicos y el impacto ambiental del proyecto.

Potencial energético del biogás

Los resultados del modelamiento indican que la potencia máxima alcanzable en el Cubeto 1 es aproximadamente de 1,60 MW bajo un escenario del 34% de eficiencia de captación. Sin embargo, se ha planteado la implementación de mejoras en el sistema y operación para alcanzar la eficiencia al 40%, influyendo a la producción de biogás y por ende de energía, beneficios ambientales y sociales. Asimismo, se observa que la generación de biogás presenta un comportamiento progresivo en el tiempo, al final de la etapa definida en el año 2032. Esto justifica la implementación gradual del sistema de generación, evitando sobredimensionamientos y optimizando la inversión en función de la disponibilidad real del recurso.

Viabilidad económica

Los resultados económicos evidencian que el proyecto tiene viabilidad económica. El (VAN) positivo y la (TIR) superior al 14% demuestran que el proyecto genera beneficios económicos sostenidos a lo largo del tiempo. Con este estudio se puede demostrar que los ingresos provenientes de la venta de energía constituyen la principal fuente de rentabilidad, mientras que los bonos de carbono representan un ingreso complementario que refuerza la sostenibilidad económica del proyecto.

El período de recuperación de la inversión (payback) de aproximadamente 3.6 años, se considera adecuado para proyectos de infraestructura ambiental, lo que confirma la viabilidad financiera del sistema bajo las condiciones analizadas.

Impacto ambiental del proyecto

El aprovechamiento energético del biogás permite evitar la emisión de grandes cantidades de metano, un gas que tiene un alto porcentaje de impacto ambiental. En este estudio, se estimó una reducción de aproximadamente 1,05 millones de toneladas de CO₂ equivalente, lo que representa un impacto ambiental significativo. Este resultado posiciona al proyecto como una estrategia efectiva de mitigación del cambio climático, alineada con políticas ambientales y compromisos internacionales de reducción de emisiones. Además, la valorización del biogás contribuye a transformar un pasivo ambiental en un recurso energético, fortaleciendo el enfoque de economía circular en la gestión de residuos sólidos.

5.2. Conclusiones

En función del objetivo general de la investigación, se concluye que el proyecto de aprovechamiento energético del biogás en el Complejo Ambiental del DMQ es viable desde una perspectiva técnica, económica y ambiental. Desde el punto de vista técnico, el proyecto cuenta con un potencial suficiente de generación de biogás que permite la operación de dos motores (y un back up) de 1 MW, bajo condiciones realistas de captación con una implementación progresiva del sistema como estrategia para garantizar su eficiencia y sostenibilidad.

En términos económicos, los indicadores financieros obtenidos evidencian la rentabilidad del proyecto, con un VAN positivo, una TIR atractiva y un período de recuperación adecuado. Estos resultados confirman que la valorización energética del biogás constituye una alternativa económicamente viable dentro del sistema de gestión de residuos.

Por otra parte, desde la perspectiva ambiental, el proyecto genera beneficios significativos mediante la reducción de olores, y contaminación atmosférica mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y al cumplimiento de objetivos de sostenibilidad.

Finalmente, la presente investigación evidencia la importancia que tiene el desarrollo de implementar correctos sistemas de GIRS en ciudades y poblaciones, demostrando que el manejo de residuos no solo debe entenderse como una necesidad sanitaria, sino también como una estrategia y oportunidad para obtener beneficios con alto impacto ambiental, social y económico. Debido a que la correcta gestión de residuos constituye el punto de partida para generar una cadena de beneficios que permite transformar un problema ambiental en una fuente de recursos, energía y desarrollo sostenible.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- INEC. (2024). *INEC*. Obtenido de Ecuador en cifras: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Encuestas_Ambientales/Municipios/2024/grs/BOLETIN_RESIDUOS_2024.pdf
- Contraloría General del Estado. (s.f.). *Reporte de Control Público No. 4: Gestión integral de desechos y residuos sólidos*. Obtenido de Contraloría General del Estado: <https://www.contraloria.gob.ec/SalaDePrensa/NoticiasPorSector/24191>
- EMGIRS. (2026). *Quito impulsa proyecto que reducirá emisiones de metano en los rellenos sanitarios*. Obtenido de Empresa Pública de gestión Integral de residuos: <https://emgirs.gob.ec/quito-impulsa-proyecto-que-reducira-emisiones-de-metano-en-los-rellenos-sanitarios/>
- Novoa, E. (2021). *Biogás de residuos orgánicos como fuente de energía renovable. Análisis del potencial de la ciudad de Quito*. Quito. Obtenido de <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/8410/1/T3670-MCCSD-Espinosa-Biogas.pdf>
- EPA. (19 de mayo de 2025). *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM)*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/land-research/landfill-gas-emissions-model-landgem>
- Arévalo, C. (2026). *Rellenos Sanitarios II*. Cuenca: Universidad del Azuay.
- EMGIRS - EP. (2025). *INFORME DE CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS EN SITIOS DE DESCARGA DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO*. DMQ.
- (IEA), I. E. (2020). *biomethane: Prospects for organic growth*. Obtenido de <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>
- (IPCC), I. P. (2006). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Obtenido de <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- Sapag Chain, N. &. (2014). Obtenido de <https://www.mheducation.com/>
- (EPA), U. E. (2023). Obtenido de <https://www.epa.gov/landfill-gas/landgem-landfill-gas-emissions-model>

- Ministerio del Medioambiente MAE. (2009). Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/>
- Tchobanoglous, G. T. (1993). *Gestión integral de residuos sólidos*. Madrid: McGraw-Hill.
Obtenido de <https://books.google.com/books?id=Z0dRAAAAMAAJ>
- Jenbacher. (2017). *Especificaciones técnicas del motogenerador GE Jenbacher JGC 320 GS-L.L.*
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An engineering approach*. McGraw-Hill.
- International Organization for Standardization (ISO. (2016). *ISO*. Obtenido de ISO 13443: Natural gas — Standard reference conditions: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:13443:ed-1:v1:en>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Obtenido de IPCC: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>

7. ANEXOS

Tabla 20. CAPEX detallado

\$3.737.557,84	CRONOGRAMA VALORES CORRIENTES	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
		\$40.000	\$65.000	\$223.000	\$2.106.558	\$0	\$0	\$0	\$673.000	\$0	\$630.000	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Ingeniería.	Proyecto Ejecutivo (PREFACTABILIDAD Y FACTIBILIDAD EMGIRS EMP. ELEQ.)	\$ 40.000,00																		
	Estudios Ambientales		\$ 15.000,00																	
	Ingeniería Civil		\$ 20.000,00																	
	Ingeniería Electromecánica		\$ 30.000,00																	
Obra.	Obra Civil Planta (3 motores)			\$100.000																
	Drenes Horizontales de gas			\$10.000					\$10.000											
	Tubería de superficie de gas con evacuación de condensación			\$3.000	\$3.000				\$3.000											
	Obras de subestación			\$10.000																
	Sistema de recirculación de lixiviados - bombeo				\$20.000				\$20.000											
	Captación (40 pozos)			\$100.000																
Costos Indirectos.	Importación Costos inherentes al traslado de motores a Ecuador				\$80.000															
	Enfriadora y chiller.				\$150.000															
Equipos.	Línea de transmisión de 2 kilómetros AT y Estación Seccionadora				\$100.000															
	MOTORES 1 MW				\$600.000				\$600.000		\$600.000									
	Transformadores de 1000 KVA				\$30.000				\$30.000		\$30.000									
	Líneas y cableados de baja tensión y media tensión				\$10.000				\$10.000											
	Sistema Contra Incendios				\$12.000															
	Subestación MT a AT				\$400.000															
	Sondas, caudalímetros y equipos adicionales				\$110.000															
	CCTV, Señalización y alumbrado exterior				\$40.000															
	SCADA General				\$80.000															
	Climatización.				\$30.000															
	Equipo soplador				\$50.000															
	Sistema de compresión de gas				\$100.000															
	Sistema de almacenamiento de gas - buffer				\$100.000															
	Equipo soplador				\$50.000															
	Equipo para quema de excedentes (antorcha)				\$141.558															

Fuente: Autora (2026)

Tabla 21. Detalle OPEX

OPEX	TOTAL	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044
Mantenimiento Anual.	\$ 678.000,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 27.000,00	\$ 57.000,00	\$ 57.000,00	\$ 87.000,00	\$ 57.000,00	\$ 57.000,00	\$ 57.000,00	\$ 57.000,00	\$ 57.000,00	\$ 57.000,00	\$ 27.000,00	\$ 27.000,00	\$ 27.000,00	\$ 27.000,00	\$ -
Repuestos de almacén.	\$ 66.000,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ -
Sueldos, salarios y asimilados.	\$ 749.960,43	\$ -	\$ -	\$ 43.431,79	\$ 44.300,43	\$ 45.186,44	\$ 46.090,17	\$ 47.011,97	\$ 47.952,21	\$ 48.911,25	\$ 49.889,48	\$ 50.887,27	\$ 51.905,01	\$ 52.943,11	\$ 54.001,98	\$ 55.082,02	\$ 56.183,66	\$ 56.183,66	\$ -
Primas de seguros.	\$ 83.625,00	\$ -	\$ -	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ 5.575,00	\$ -
Suministros de caldera (agua y gasoil).	\$ 15.000,00	\$ -	\$ -	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00	\$ -
Overhaul motores (mantenimiento mayor)	\$ 270.000,00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 30.000,00	\$ -	\$ 60.000,00	\$ -	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00	\$ -	\$ 60.000,00	\$ -	\$ 30.000,00	\$ 30.000,00	\$ -	\$ -	\$ -
Asesoría Legal	\$ 88.000,00	\$ 5.500,00	\$ -	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ 5.500,00	\$ -
Outsourcing Contable	\$ 80.000,00	\$ -	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ 5.000,00	\$ -
Red de Tuberías de Conducción de BIOGAS	\$ 48.000,00	\$ -	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ 3.000,00	\$ -
Canon de BIOGAS ROYALTI	\$ 500.332,80	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 23.731,20	\$ 25.708,80	\$ 47.462,40	\$ 47.462,40	\$ 47.462,40	\$ 47.462,40	\$ 47.462,40	\$ 47.462,40	\$ 47.462,40	\$ 23.731,20	\$ 23.731,20	\$ 23.731,20	\$ 23.731,20	\$ 23.731,20	\$ -
Costo de Venta de bonos de carbono	\$ 907.072,65	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 94.929,55	\$ 119.451,08	\$ 142.314,81	\$ 152.360,46	\$ 142.059,95	\$ 132.455,82	\$ 123.500,99	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Total OPEX	\$ 3.485.990,88	\$ 5.500	\$ 8.000	\$ 63.507	\$ 213.036	\$ 300.421	\$ 317.942	\$ 418.910	\$ 319.550	\$ 340.904	\$ 332.928	\$ 180.425	\$ 241.442	\$ 158.749	\$ 159.808	\$ 160.888	\$ 131.990	\$ 131.990	\$ 0

Fuente: Autora (2026)