

## Evaluación de la factibilidad técnico-económica para la implementación de un sistema de aprovechamiento de biogás en la celda emergente de Inchapo, Latacunga

Evaluation of the technical-economic feasibility for the implementation of a biogas utilization system in the emerging cell of Inchapo, Latacunga

### Artículo Original

**Recibido:**

18/11/2025

**Erik Eduardo Vásquez Copara** <sup>1</sup>

erik.vasquez3339@utc.edu.ec

ORCID: 0009-0008-1031-5504

**Secundino Marrero Ramírez** <sup>1</sup>

secundino.marrero@utc.edu.ec

ORCID: 0000-0001-5161-545X

**Aceptado:**

12/03/2026

**Universidad Técnica de Cotopaxi** <sup>1</sup>

**Publicado:**

23/03/2026

### Resumen

La gestión de los residuos sólidos urbanos representa un desafío ambiental y energético creciente en ciudades de países en desarrollo, debido a la generación de metano derivado de la descomposición anaerobia de la fracción orgánica. En la ciudad de Latacunga, la celda emergente de Inchapo cumple un rol fundamental en la disposición final de los residuos; sin embargo, el biogás generado se libera actualmente a la atmósfera sin mecanismos de captura ni aprovechamiento energético. El presente estudio evalúa la factibilidad técnico-económica de implementar un sistema de aprovechamiento de biogás en dicha celda, mediante la estimación del potencial de generación utilizando modelos cinéticos de primer orden, incluido el modelo LandGEM, y el análisis de alternativas tecnológicas de captación y generación eléctrica. Los resultados muestran que la producción de biogás puede sostenerse hasta aproximadamente el año 2037, alcanzando en 2036 una energía estimada de 5 101,6 MWh/año, equivalente a una potencia eléctrica aproximada de 0,638 MW. El análisis económico, considerando una inversión referencial de 1,1 millones de USD y una evaluación basada en tasa interna de retorno, evidencia que el costo de generación con biogás (0,08-0,10 USD/kWh) resulta competitivo frente a la generación térmica con diésel, especialmente en escenarios de estiaje donde los costos pueden superar los 0,30 USD/kWh. Estos resultados posicionan al biogás como una alternativa técnica y estratégicamente viable para complementar el sistema energético nacional y reducir emisiones de gases de efecto invernadero.

**Palabras Clave:** Metano; biogás; residuos.

## Abstract

The management of local solid waste represents a growing environmental and energy challenge in cities in developing countries, due to the generation of methane derived from the anaerobic decomposition of the organic fraction. In Latacunga city, the emerging Inchapo cell plays a fundamental role in the final disposal of waste; however, the biogas generated is currently released into the atmosphere without capturing mechanisms or energy utilization. This study evaluates the technical and economic feasibility of implementing a biogas utilization system in that cell, through the estimation of the generation potential using first-order kinetic models, including the LandGEM model, and analyzing technological alternatives for capturing and generating electricity. The results show that biogas production can be sustained until approximately 2037, reaching an estimated energy of 5,101.6 MWh/year in 2036, equivalent to an approximate electrical power of 0.638 MW. The economic analysis, considering a reference investment of USD 1.1 million and an evaluation based on internal rate of return, shows that the cost of generation with biogas (USD 0.08–0.10/kWh) is competitive compared to thermal generation with diesel, especially in drought scenarios where costs can exceed USD 0.30/kWh. These results position biogas as a technically and strategically viable alternative to complement the national energy system and reduce greenhouse gas emissions.

**Keywords:** methane, biogas, waste.

## INTRODUCCIÓN

La disposición final de residuos sólidos urbanos sigue siendo un tema pendiente en muchas ciudades de países en desarrollo, tanto por su impacto ambiental como por el recurso energético que se desperdicia. El crecimiento poblacional y la expansión urbana han incrementado el volumen de residuos, mientras que la infraestructura disponible para manejarlos no siempre crece al mismo ritmo (Ramírez, 2024). En este contexto, la fracción orgánica juega un papel central, ya que al degradarse en condiciones anaerobias genera biogás, compuesto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Cuadros,

2017). El metano es especialmente relevante porque su efecto sobre el calentamiento global es considerablemente mayor que el del dióxido de carbono. De manera general, se reporta que, en un horizonte de 100 años, su potencial de calentamiento puede ser alrededor de 28 veces superior, lo que hace que su liberación directa sea un problema ambiental serio (Sánchez, 2024). Por eso, cuando no existen medidas de control o captura, los sitios de disposición final pueden convertirse en fuentes importantes de emisiones (Sánchez, 2024).

En la ciudad de Latacunga, la celda emergente de Inchapo cumple una función clave en la recepción y disposición de los residuos del cantón. Sin embargo, al igual que ocurre en otros sistemas similares de la región, el biogás generado se libera a la atmósfera sin un esquema de captura ni aprovechamiento energético, lo que reduce la posibilidad de mitigación efectiva y desaprovecha un recurso potencial (Jiménez, 2023). Frente a esta situación, la instalación de un sistema de captación y aprovechamiento aparece como una opción que podría aportar beneficios ambientales y dependiendo de las condiciones del sitio, también beneficios económicos mediante la producción de energía. A nivel local y nacional, la información técnica disponible sobre el aprovechamiento real del biogás en celdas emergentes es todavía limitada. En varios casos se presentan estimaciones generales, pero sin un análisis completo que permita responder con claridad si la inversión resulta técnicamente viable y económicamente conveniente (Anaya, 2025). Esto deja un vacío práctico para la toma de decisiones, especialmente cuando se trata de infraestructura municipal con restricciones presupuestarias.

En consecuencia, el problema principal se resume en la falta de una evaluación estructurada para determinar si un sistema de aprovechamiento de biogás en la celda emergente de Inchapo puede implementarse de forma segura, operativa y sostenible, y si su costo se justifica frente a los beneficios esperados. Sin ese análisis, es difícil valorar con objetividad el alcance

del proyecto y su aporte a una gestión más eficiente de los residuos del cantón Latacunga. Desde el punto de vista tecnológico, existen distintas alternativas para convertir el biogás en energía útil. En aplicaciones municipales, una opción frecuente es el uso de motores de combustión interna adaptados a biogás, principalmente por su disponibilidad comercial, facilidad de mantenimiento y capacidad de operar con caudales variables. En términos generales, su eficiencia eléctrica suele ubicarse en rangos del 25 % al 35 %, y puede mejorar cuando se aprovecha el calor residual en esquemas de cogeneración (Blanco et al., 2017). Además, estos equipos pueden adaptarse a variaciones en el caudal de gas a lo largo del tiempo, lo cual es importante en sitios donde la producción de biogás no es constante (Blanco et al., 2017).

En la práctica, los sistemas de aprovechamiento requieren una cadena mínima: captación del gas, acondicionamiento (por ejemplo, remoción de humedad y contaminantes) y conversión energética mediante equipos de generación. Aunque existen otras tecnologías como microturbinas o celdas de combustible, los motores a biogás son de los más extendidos por su madurez tecnológica y su tolerancia a variaciones en la calidad del combustible (López, 2020). Sin embargo, para decidir su aplicación en un sitio específico, se necesita comparar costos y desempeño con alternativas convencionales disponibles en el país, especialmente en condiciones de estiaje

donde los costos marginales de generación tienden a incrementarse. Bajo este enfoque, el objetivo del presente trabajo es evaluar la factibilidad técnico-económica de implementar un sistema de aprovechamiento de biogás en la celda

emergente de Inchapo, considerando el potencial energético estimado, las alternativas de captación y uso del gas, y el costo de la energía producida frente a otras fuentes de generación utilizadas en el contexto nacional.

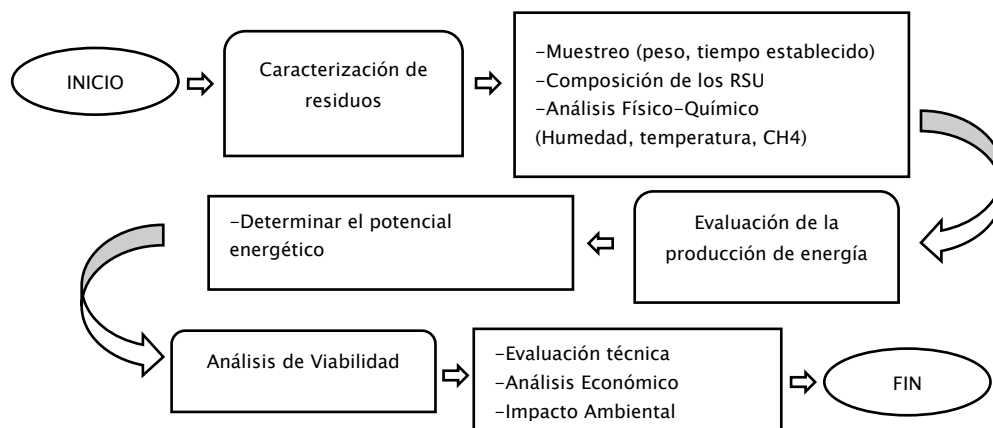
## METODOLOGÍA

El diagrama de flujo de la Figura 1 sintetiza de manera estructurada y secuencial la metodología empleada para evaluar el

aprovechamiento energético de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) hasta llegar al análisis de su viabilidad.

**Figura 1**

*Flujograma resumen de la metodología usada en el artículo*



Este trabajo se planteó como un estudio aplicado, con un análisis descriptivo y comparativo, orientado a responder una pregunta práctica: si en la celda emergente de Inchapo es razonable implementar un sistema de captación y aprovechamiento de biogás desde el punto de vista técnico y económico (Alzate, 2017). Para ello se utilizó información del sitio (condiciones de operación, contexto municipal y referencias técnicas) y se contrastaron resultados con experiencias reales reportadas en el país.

Y en cuanto a la evaluación de la factibilidad técnico-económica se desarrolló mediante un enfoque aplicado, orientado a la toma de decisiones de inversión, considerando las condiciones reales de operación de la celda emergente de Inchapo comparada con casos reales ya existentes.

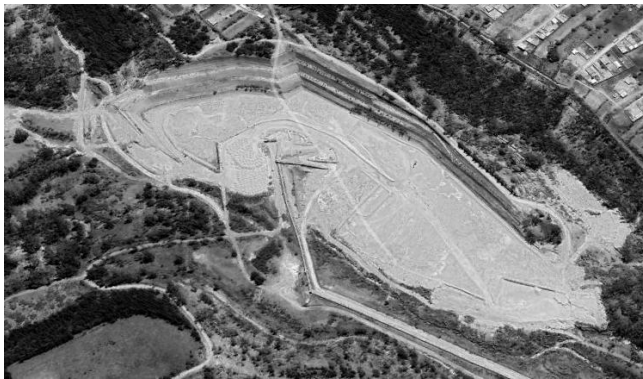
### **Caracterización del sitio y del sistema de disposición final**

La evaluación se desarrolló para la celda emergente de Inchapo, en el cantón Latacunga. El sitio se ubica en coordenadas

WGS84, zona UTM 17S, alrededor de 760 200 m E y 9 895 550 m N como se observa en la Figura 2 . Además, por su ubicación en la región interandina a (2 800 m s. n. m.) aproximadamente, se consideró que las condiciones ambientales pueden influir en la dinámica de degradación de la fracción orgánica y, por tanto, en la generación de biogás (Rosero, 2018).

### Figura 2

*Imagen satelital de la Celda emergente Inchapo, ciudad Latacunga*



Con base en información municipal, Latacunga dispone del orden de 25 000 toneladas/año de residuos sólidos urbanos. En estudios locales se reporta una fracción orgánica que supera el 60%, lo que sugiere un potencial favorable para la generación de biogás. Sin embargo, al ser una celda emergente, el sitio no cuenta con infraestructura específica para captación y manejo del gas, por lo que el biogás tiende a liberarse a la atmósfera de forma no controlada. Esta condición hace que Inchapo sea un caso útil para evaluar alternativas de mitigación y aprovechamiento energético a escala municipal (Pico, 2024).

**Estimación del potencial de biogás mediante el modelo LandGEM**

Para aproximar la generación de metano (CH<sub>4</sub>) se utilizó el modelo LandGEM, principalmente por su uso extendido en evaluaciones preliminares de rellenos y sitios de disposición final. En términos prácticos, LandGEM permite estimar la producción anual de gas a partir de la masa de residuos dispuesta cada año y parámetros cinéticos asociados a la degradación de la fracción biodegradable (Escamilla, 2019).

En este estudio se trabajó con la formulación de primer orden incluida en el modelo la ecuación (1). Más que entrar en una explicación teórica extensa del modelo, se consideró lo esencial para el cálculo: cada bloque anual de residuos aporta a la generación total, y esa contribución tiende a disminuir con el tiempo conforme avanza la degradación anaerobia. La parametrización incluyó el año de inicio de operación, la tasa anual de disposición y los parámetros cinéticos utilizados para la estimación del metano generado, entre ellos la constante de generación de metano (k) y el potencial de generación de metano (L<sub>0</sub>) (Sanipatín, 2022).

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[ \frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF)(F) \quad (1)$$

**Donde:**

Q<sub>LFG</sub>= generación anual de metano m<sup>3</sup>/año

i = incremento de 1 año

n = año de cálculo menos año de inicio de disposición de residuos

j = incrementos de 0,1 año

k = tasa de generación de metano (año<sup>-1</sup>)

$L_O$  = potencial de generación de metano ( $m^3/Mg$ )

$M_i$  = cantidad de residuos aceptados en el año “i”

### Estimación del potencial de generación eléctrica

La energía eléctrica anual se estimó como el contenido energético del combustible disponible multiplicado por la eficiencia del sistema, conforme al rendimiento térmico en ciclos de potencia. De acuerdo con (Moran & Shapiro, 2018) el rendimiento térmico ( $\eta$ ) se define como la relación entre el trabajo neto producido por el ciclo ( $W_{ciclo}$ ) y la energía térmica suministrada al sistema en forma de calor ( $Q_e$ ).

Donde ( $W_{ciclo}$ ) representa el trabajo neto útil entregado por el sistema y ( $Q_e$ ) la energía de entrada proveniente del combustible. Al reorganizar esta expresión, se obtiene que el trabajo o energía útil producida es igual a la energía suministrada multiplicada por la eficiencia del proceso.

$$W_{ciclo} = Q_e - Q_s$$

$$\eta = \frac{W_{ciclo}}{Q_e}$$

En el caso del aprovechamiento energético del metano, la energía de entrada se determina a partir del volumen disponible y su poder calorífico inferior ( $PCI_{CH_4}$ ), mientras que la energía eléctrica generada resulta del producto entre dicha energía química y la eficiencia eléctrica del sistema de conversión.

$$E_{2036} = V_{CH_4} \times PCI_{CH_4} \times \eta_e \quad (2)$$

### Evaluación técnica del sistema de aprovechamiento

La evaluación técnica se centró en analizar la compatibilidad entre el potencial estimado de generación de biogás y las tecnologías disponibles para su captación y aprovechamiento. Dadas las características de la celda emergente de Inchapo, se consideraron sistemas de captación mediante pozos verticales, redes de conducción y equipos básicos de acondicionamiento del gas.

En función de los caudales estimados, se identificaron dos alternativas técnicas principales. La primera corresponde a la instalación de un sistema de captación con antorcha de quema controlada, orientado principalmente a la mitigación de emisiones de metano. La segunda alternativa incorpora un sistema de generación eléctrica a partir del biogás captado, sujeto a la estabilidad del caudal y a la viabilidad operativa del sistema (Amorós, 2024).

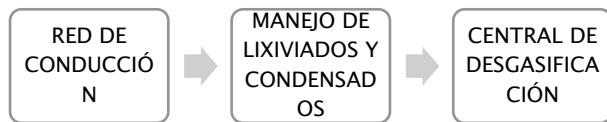
### Componentes de Instalación

El aprovechamiento energético del biogás requiere un conjunto de elementos que permitan su captación como se aprecia en la Figura 3, transporte y acondicionamiento antes de su utilización final. En primer lugar, el sistema de captación está formado por pozos verticales instalados en el macizo de residuos, los cuales permiten extraer de forma controlada el gas generado durante la degradación anaerobia de la materia orgánica. Estos pozos se conectan a una red de conducción que transporta el biogás hacia las unidades de tratamiento o generación energética. Desde el punto de vista constructivo, cada pozo incluye perforación, tubería ranurada, material

filtrante y su conexión a la red colectora, constituyendo uno de los componentes más relevantes dentro de la inversión inicial del sistema (Agudelo & Carmona, 2020).

**Figura 3**

*Componentes de instalación del aprovechamiento de biogás*



Durante el proceso de captación también es necesario gestionar los líquidos presentes en el interior del relleno, ya que el movimiento de lixiviados o condensados hacia los pozos puede generar obstrucciones que reduzcan la eficiencia de extracción del gas. Por esta razón se incorporan sistemas de drenaje y bombeo, generalmente de tipo neumático por motivos de seguridad. Finalmente, los flujos provenientes de los diferentes pozos convergen en una central de desgasefacción, donde se regula la presión del sistema y se acondiciona el biogás mediante colectores, válvulas de control, sopladores e instrumentos de medición que permiten monitorear parámetros como caudal, presión y composición del gas antes de su aprovechamiento energético (Espinosa, 2021).

### Sistema de utilización del biogás

En la Tabla 1 se presentan de forma resumida las dos principales alternativas de utilización del biogás consideradas en este estudio: la quema controlada mediante antorcha y la generación de energía eléctrica. La antorcha permite oxidar el metano presente en el biogás, reduciendo

su impacto ambiental y contribuyendo a mejorar las condiciones de seguridad del sistema (Erdoğdu, 2025).

**Tabla 1**

*Tipos de sistemas para el aprovechamiento de biogás*

Sistemas para el aprovechamiento de biogás	
Antorcha de quema controlada	Sistema de generación eléctrica
Sistema utilizado para la oxidación controlada del metano presente en el biogás, con el objetivo de reducir su impacto ambiental y mejorar la seguridad del sitio.	Sistema que utiliza el biogás como combustible para motores de combustión interna acoplados a generadores eléctricos para la producción de energía.

Cuando el caudal de biogás es suficiente y relativamente estable, también es posible aprovechar su contenido energético para la producción de electricidad. En este tipo de proyectos se emplean con frecuencia motores de combustión interna adaptados para biogás, una tecnología ampliamente utilizada en instalaciones de pequeña y mediana escala por su confiabilidad operativa y facilidad de mantenimiento (Zamonsky & Bajsa, 2020).

### Sistemas de generación ya aplicados en el país

#### Relleno sanitario de Pichacay

Un referente relevante en Ecuador para el aprovechamiento energético del biogás es el relleno sanitario de Pichacay, ubicado en la parroquia Santa Ana, aproximadamente a 21 km de la ciudad de Cuenca, en la provincia del Azuay. Este sitio ocupa una superficie cercana a 16 hectáreas y es administrado por la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP). El

proyecto de generación eléctrica a partir de biogás es operado por la empresa mixta EMAC-BGP Energy (Alcaldía de Cuenca, 2025).

En esta instalación, el biogás captado del relleno sanitario es utilizado como combustible en motores de combustión interna adaptados para este tipo de gas. Esta tecnología es perfecta principalmente por su confiabilidad operativa, su capacidad de adaptarse a variaciones en la composición del biogás y por requerir inversiones moderadas en comparación con otras alternativas de generación.

El sistema cuenta con una capacidad instalada total de 2 MW. En una primera etapa se instaló una potencia de 1 MW y posteriormente se incorporó una segunda unidad con potencia similar. La energía producida se genera inicialmente a un nivel de tensión de 480 V y posteriormente es elevada mediante un transformador de 2,2 MVA hasta 22 kV para su conexión a la red de media tensión del sistema eléctrico local (Carpio Freddy & Tepán, 2014).

Desde el punto de vista económico, el proyecto opera bajo el esquema de generación distribuida, beneficiándose de un precio preferencial de venta de electricidad establecido para energías renovables no convencionales. La planta registra entre 6 900 y 8 200 horas de operación anual, alcanzando producciones cercanas a 14 GWh por año cuando opera a plena capacidad instalada (Carpio Freddy & Tepán, 2014).

La Tabla 2 presenta un resumen referencial de los principales costos asociados a la

Central Pichacay, incluyendo la potencia instalada, el transformador principal y los costos de inversión y operación. Estos valores se utilizan como base comparativa para estimar el orden de magnitud de la inversión requerida en proyectos de generación eléctrica a partir de biogás en contextos municipales similares.

**Tabla 2**

*Cuadro resumen presupuestos Central Pichacay*

<b>Cuadro resumen costos Central Pichacay</b>	
Potencia instalada	2MW
Transformador principal	2,2 MVA
Costos, USD	
Generador INNIO J320	1,200.000
Costos operacionales	419.000
Transformador 2,2 MVA	180.000

*Nota.* Tomado de Carpio Freddy & Tepán, 2014

### **Caso PTAR Naranjito**

Otro ejemplo de aprovechamiento energético del biogás en Ecuador se encuentra en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del cantón Naranjito, en la provincia del Guayas. En este caso, el biogás se genera a partir de la degradación anaerobia de los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales domésticas.

La producción de biogás se realiza mediante biodigestores, en los cuales los lodos orgánicos se descomponen en ausencia de oxígeno. La cantidad de gas generado depende de diversos factores, entre ellos la carga orgánica del influente, parámetros como los sólidos suspendidos volátiles (SSV), la demanda química de oxígeno (DQO) y la cantidad de residuos generados por habitante.

En esta instalación se indican que el volumen promedio de biogás producido puede alcanzar aproximadamente 836,86 m<sup>3</sup> por día durante la época seca, mientras que en temporada lluviosa este valor puede disminuir hasta cerca de 272,87 m<sup>3</sup> diarios, evidenciando una marcada variación estacional del recurso.

Considerando una concentración típica de metano cercana al 65 %, es posible estimar el potencial energético del biogás generado en la planta. Bajo estas condiciones, el recurso energético disponible se aproxima a 5 423 kWh por día en época seca (alrededor de 1 979 MWh por año), mientras que en temporada lluviosa el potencial se reduce a aproximadamente 1 768 kWh diarios (Parra & Zambrano, 2021).

En la Tabla 3 se observa que la mayor proporción de la inversión corresponde al grupo electrógeno a biogás, mientras que los costos operacionales se mantienen relativamente bajos en comparación con tecnologías térmicas convencionales.

**Tabla 3**

*Cuadro resumen presupuestos Central Naranjito*

Cuadro resumen costos Central Naranjito	
Potencia instalada	200 KW
Costos, USD	
Generador 250 KW	250.000
Costos operacionales	90.000
Inversión total estimada	820.000

*Nota.* Tomado de Parra & Zambrano, 2021

### **Evaluación económica y financiera preliminar**

El análisis económico se realiza para valorar la conveniencia de invertir en un sistema de aprovechamiento de biogás, considerando

tanto los costos de implementación como los beneficios potenciales asociados. La inversión inicial contempla los costos de instalación del sistema de captación, equipos auxiliares y, en el caso de aprovechamiento energético, el sistema de generación eléctrica.

Los costos de operación y mantenimiento incluyen actividades de monitoreo, mantenimiento preventivo y correctivo, así como la gestión operativa del sistema. En cuanto a los beneficios, se consideraron los ingresos potenciales por sustitución de energía convencional, la posible comercialización de energía eléctrica y los beneficios ambientales derivados de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Con el análisis preliminar se obtiene que la viabilidad económica del proyecto es sensible a la estabilidad del caudal de biogás y al esquema de aprovechamiento seleccionado. En este sentido, la implementación progresiva del sistema, iniciando con la captación y quema controlada y evolucionando hacia el aprovechamiento energético, se presenta como una estrategia prudente desde el punto de vista financiero.

### **Factor de emisión [CO<sub>2</sub>] \_2 Ecuador**

La estimación de emisiones evitadas por generación eléctrica a partir de biogás se fundamenta en el principio de desplazamiento de generación marginal del Sistema Nacional Interconectado (S.N.I.), conforme a la metodología establecida por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

(UNFCCC), adoptada oficialmente en el Ecuador para el cálculo del factor de emisión de CO<sub>2</sub> del sistema eléctrico (Criollo, n.d.).

La ecuación (3) se basa en el procedimiento de multiplicar la energía eléctrica generada

por el proyecto  $[[ER]]_{red}$  por el factor de la red eléctrica  $[[FE]]_{red}$ , el cual representa el promedio de las emisiones realizadas en la generación eléctrica del Sistema Nacional.

$$ER_{red} = E_{gen} \times FE_{red} \quad (3)$$

## RESULTADOS

Para determinar la producción de biogás de la celda Inchapo, se debe tomar en cuenta que el biogás se genera después de la colocación de los residuos en el sitio de disposición final, después de haber ingresado los datos al modelo Landgem se obtuvo la cantidad de biogás.

En la Figura 4 se observa la cantidad de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) que ingresan a la celda emergente de Inchapo por años hasta el 2024, datos que serán utilizados para aproximar la generación de metano en este sitio.

**Figura 4**

*Toneladas de RSU ingresadas a Inchapo*



*Nota.* Tomado de Pico, 2024

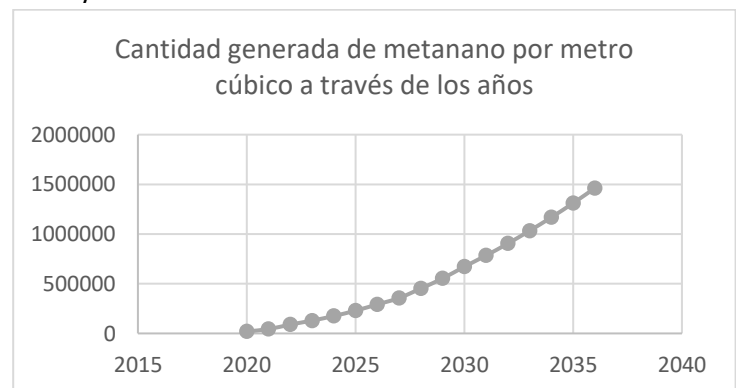
### Producción de biogás

En la Figura 5, se muestra el biogás producido utilizando el método de

Landgem, para luego calcular la potencia mediante cálculos que parten de obtener el poder calorífico y luego determinar la potencia.

**Figura 5**

*Cantidad de metano presente en el sector Inchapo*



En la Tabla 4. se encuentran los valores útiles para realizar el cálculo de la potencia por medio de la ecuación (2)

**Tabla 4**

*Datos a utilizar para el cálculo de potencia*

Valores para el cálculo de Potencia	
Volumen metano	1,462.000 m <sup>3</sup> /año
Poder calorífico	9.97 KWh/m <sup>3</sup>
Eficiencia promedio	0,35
Horas de operación	8000 h/año

$$E_{2036} = V_{CH_4} \times PCI_{CH_4} \times \eta_e$$

La potencia eléctrica equivalente se determinó a partir de la energía anual generada, dividiéndola por las horas efectivas de operación, conforme a la metodología de conversión energía-potencia.

$$E_{2036} = 1\,462\,000 \times 9.97 \times 0.35$$

$$E_{2036} = 5\,101\,649 \text{ kWh/año}$$

$$E_{2036} = 5\,101.6 \text{ MWh/año}$$

Potencia eléctrica equivalente

$$P_{2036} = E_{2036} / t$$

$$P_{2036} = (5\,101.6) / 8000$$

$$P_{2036} = 0.638 \text{ MW}$$

$$P_{2036} = 638 \text{ kW}$$

Para determinar los costos y beneficios generados de la implementación del sistema se realizó una evaluación económica basada en la tasa interna de retorno, la cual es una medida de la rentabilidad del proyecto.

En la comparación con un caso real que actualmente está funcionando en la ciudad de Cuenca como es el proyecto Pichacay y con el caso de la ciudad de Naranjito, después de analizados los costos de estos casos, se llegó a un valor aproximado 1 100 000 USD, necesarios para la implementación de un sistema de generación de energía por medio de biogás. En la Tabla 5. se muestran precios referenciales, para la implementación de los equipos en el sector de Inchapo en la ciudad de Latacunga, basado en los casos que ya se han aplicado en el país (Pichacay en la ciudad de Cuenca).

**Tabla 5**

*Costo de Materiales o servicios para planta de Generación de biogás en Inchapo*

Componentes, materiales o servicios para Generación-USD	
Generador 700 kW	450000
Sistema pretratamiento gas	60000
Trampas de condensado	200000
Tableros, protecciones	90000
Transformador elevador	120000
Interconexión	50000
Obra civil	120000
Contingencias	10000
Total	1 100 000

### Costo medio de generación

El costo medio de generación se determinará como la relación entre el costo de generación y la energía producida conforme la siguiente expresión (4) de (ARCONEL, 2024):

$$CMG = \frac{C_{Gx}}{P_{Gx}} [USD/kWh]$$

(4)

Donde:

CMG=Costo medio de Generación

C<sub>Gx</sub>=Costo de Generación

P<sub>Gx</sub>=Energía producida

Para la estimación del costo de generación eléctrica se empleó el Factor de Recuperación de Capital (CRF, Capital Recovery Factor), el cual permite anualizar la inversión inicial considerando una tasa de descuento del 12 % y la vida útil del proyecto. Asimismo, se incluyó el Costo Anual de Operación y Mantenimiento (CAOM), que contempla gastos asociados a operación, mantenimiento, personal y reposición de componentes. Finalmente, los resultados pueden contrastarse con el

Costo Marginal de generación (CMg) reportado por el operador del sistema eléctrico ecuatoriano

$$CAOM = 0.05 \times 1,100,000 = 55\,000 \text{ USD/año}$$

Para el cálculo de la energía total se usó 300 kW porque los 638 kW son el punto máximo de la generación en la planta de Inchapo

Energía total = 300kW × 8000 h/año=2,400,000 kWh/año con r=12%, CRF de 0,1388.

$$CMG=(1,100,000(0,1388)+55,000)/2,400,000$$

$$CMG=0.08428=0.0843 \text{ USD/kWh}$$

## DISCUSIÓN

El análisis comparativo de los costos de generación eléctrica evidencia diferencias significativas entre las distintas tecnologías evaluadas.

La Tabla 6. contiene el precio de cada una de las alternativas analizadas de fuentes convencionales, comparadas con el caso de

estudio, donde la generación hidroeléctrica presenta el menor costo unitario en condiciones hidrológicas normales, con valores que oscilan entre 0,03 y 0,05 USD/kWh, consolidándose como la fuente más competitiva del sistema eléctrico ecuatoriano.

**Tabla 6**

*Comparación precio de la energía*

Fuente de energía	Costo de generación (USD/kWh)	Condición de operación	Observaciones técnicas
Biogás (relleno sanitario)	0,06 – 0,10	Generación continua	Depende del caudal de CH <sub>4</sub> y costos de operación/mantenimiento
Hidroeléctrica (época normal)	0,03 – 0,05	Alta disponibilidad hídrica	Fuente más barata cuando hay régimen hidrológico favorable
Hidroeléctrica (época de estiaje)	0,10 – 0,20	Bajo caudal	Se requiere respaldo térmico; costos aumentan significativamente
Diésel (generación térmica)	0,25 – 0,35	Generación de respaldo	Altos costos de combustible y alta emisión de CO <sub>2</sub>
Diésel (emergencia / estiaje severo)	0,35 – 0,45	Operación forzada	Escenario crítico para el sistema eléctrico

*Nota.* Tomado de ARCONEL, 2025

La energía producida por las hidroeléctricas es la más barata y de mayor existencia en el país, no obstante, durante períodos de estiaje, la reducción del caudal disponible provoca un incremento sustancial del costo marginal del sistema, llegando a valores del orden de 0,10 a 0,20 USD/kWh, debido a la necesidad de incorporar generación térmica de respaldo (Naranjo et al., 2022).

En este contexto, la generación eléctrica a partir de biogás proveniente de residuos sólidos urbanos se posiciona como una alternativa económicamente viable y estratégica. Con costos estimados entre 0,08 y 0,10 USD/kWh, el biogás presenta una ventaja competitiva frente a la generación diésel, especialmente en escenarios de escasez hídrica, donde los costos del diésel pueden superar los 0,30 USD/kWh.

Cálculo del TIR y VAN para definir la viabilidad del proyecto

El cálculo del VAN a 10% con una potencia de 300kW, con un precio de venta de 0,15 USD/kWh con un aproximado de 10 años de operación adicionalmente con un coste de operación anual de 55,000 USD se obtiene.

$$E_{\text{anual}} = 300 \times 8760 \times 0,60 = 1,576,800 \text{ kWh}$$

$$\text{Ingresos} = 1,576,800 \times 0,15 = 236,520 \text{ USD}$$

$$\text{Flujo} = 236,520 - 55,000 = 181,520 \text{ USD/año}$$

VAN (10%)

$$\text{VAN} = -1,100,000 + 181,520 \times 6,1446$$

$$\text{VAN} = 15,339$$

TIR

$$0 = -1,100,000 + 181,520 \times ( \frac{1 - (1 + \text{TIR})^{-10}}{\text{TIR}} )$$

$$\text{TIR} = 10,28\%$$

$$\text{TIR} = 10,28\%$$

$$\text{IR} = 1,100,000 / 1,115,339 = 1.014$$

El VAN es ligeramente positivo (+15.339 USD) y TIR (10,28%) apenas supera la tasa de descuento, con un  $\text{IR} \approx 1,014$ . Esto indica que la viabilidad económica es muy propensa a variaciones en disponibilidad del biogás, precio efectivo de venta y costos de operación. Es conveniente su inversión siempre y cuando se alargue el plazo de vida de la celda emergente, pues a más años mayor cantidad de residuos.

Desde una perspectiva técnico-económica, la implementación de sistemas de generación eléctrica con biogás resulta particularmente atractiva como complemento al parque hidroeléctrico nacional, permitiendo reducir la dependencia de combustibles fósiles importados durante períodos de estiaje y mejorar la resiliencia del sistema eléctrico. Sin embargo, es necesario mencionar que si la factibilidad económica fuera no favorable, el hecho de la reducción del impacto ambiental que el proyecto generaría a la ciudad, puede justificar la inversión del proyecto.

Emisiones evitadas

El cálculo de las emisiones evitadas con el funcionamiento de la planta de Inchapo y su conexión a la red se calcula con la ecuación (3) donde:

$$[ER]_{\text{red}} = E_{\text{gen}} \times [FE]_{\text{red}}$$

Planta biogás operando al 85%

$$E_{\text{gen}} = 0.683 \times 8760 \times 0.85$$

$$E_{\text{gen}} = 4750.55 \text{ MWh/año}$$

Emisiones evitadas

$$[FE]_{\text{red}} = 0.1616 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

$$ER = 4750.55 \times 0.1616$$

$$ER = 767.7 \text{ tCO}_2\text{e/año}$$

La planta de Inchapo evitaría que 767.7 toneladas métricas de dióxido de carbono al año lleguen a la atmósfera, constituyendo así una reducción considerable para la calidad del aire en la ciudad de Latacunga donde estaría ubicada la planta de generación.

Como línea futura de investigación, se recomienda complementar la estimación teórica del biogás mediante análisis experimentales de composición, particularmente a través de técnicas como la cromatografía de gases, que permitirían determinar con mayor precisión la concentración real de metano ( $\text{CH}_4$ ),

## CONCLUSIÓN

Los resultados muestran que la celda emergente de Inchapo dispone de un potencial suficiente para sostener un esquema de aprovechamiento energético del biogás en el horizonte de análisis, alcanzando un punto representativo en el año 2037 con una energía anual estimada de 5 101,6 MWh/año y una potencia equivalente de aproximadamente 0,638 MW.

Desde la perspectiva técnico-económica, el proyecto resulta competitivo frente a la generación térmica con diésel, especialmente en escenarios donde el sistema eléctrico enfrenta condiciones de estiaje y se incrementa el costo marginal de abastecimiento. En el estudio, el costo estimado de generación con biogás (0,08–0,10 USD/kWh) se mantiene por debajo de los rangos típicos de generación con diésel

dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y otros compuestos traza presentes en la celda emergente. Si bien este tipo de análisis no fue realizado en el presente estudio debido a sus costos asociados y requerimientos técnicos especializados, su aplicación futura permitiría reducir incertidumbres en la estimación del poder calorífico y del potencial energético del biogás. Asimismo, podrían incorporarse métodos alternativos de caracterización in situ, como sensores portátiles de metano o campañas de muestreo periódico, con el fin de validar y ajustar los modelos cinéticos utilizados en la proyección de generación.

( $\geq 0,25$  USD/kWh y superiores en emergencia), lo que posiciona al biogás como alternativa económicamente atractiva para reducir dependencia de combustibles fósiles y mejorar resiliencia energética local.

El aprovechamiento del biogás tiene un doble beneficio ambiental, evita la liberación directa de metano ( $\text{CH}_4$ ) producido por la degradación anaerobia y reduce emisiones asociadas a la generación eléctrica convencional al desplazar energía de la red cerca de 717.7 toneladas de dióxido de carbono que no afectarían a la atmósfera.

En cuanto a la viabilidad del proyecto después de analizado TIR y VAN es susceptible a la estabilidad del caudal de gas y a los costos de operación-mantenimiento, por ello, una estrategia

técnicamente prudente es implementar el sistema por fases: iniciar con captación más antorcha (mitigación y control de seguridad) y evolucionar hacia generación eléctrica conforme se confirme la estabilidad del recurso. Este enfoque reduce el riesgo financiero, permite ajustar diseño de pozos/red de captación y mejora la confiabilidad operativa antes de

comprometer toda la inversión en generación. Sería importante analizar otros escenarios y otros métodos como los cálculos del biogás además de una cromatografía de gases en el sector de Inchapo, así como considerar los posibles cambios en los escenarios de operación como sería el estiaje o la eliminación de subsidios.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agudelo, A., & Carmona, A. (2020). Metodología para el diseño de un sistema de captación y aprovechamiento de biogás proveniente de residuos sólidos urbanos. 23.
- Alcaldía de Cuenca. (2025). Visita Técnica – Planta de Biogás – Relleno Sanitario de Pichacay | GAD Municipal de Cuenca. <https://www.cuenca.gob.ec/content/visita-t%C3%A9cnica-planta-de-biog%C3%A1s-relleno-sanitario-de-pichacay>
- Alzate, S. (2017). Evaluación de la prefactibilidad de generación de energía eléctrica a partir de residuos sólidos urbanos en tres escenarios poblacionales de Colombia. <https://repositorio.itm.edu.co/server/api/core/bitstreams/a42ea061-05d0-4b00-a423-3a772c6bca82/content>
- Amorós, M. (2024). Estudio Experimental y Viabilidad Económica de la Digestión Anaerobia de Residuos Agropecuarios [Escuela Superior Politécnica de Alicante]. <https://rua.ua.es/server/api/core/bitstreams/3b41285a-044d-40fd-8115-6bac0c275b06/content>
- Anaya, A. (2025). Análisis de la integración de tecnologías de fermentación y gasificación de biomasa que articula perspectivas académicas, enfoques sostenibles y tendencias emergentes. 16.
- ARCONEL. (2024). RESOLUCIÓN Nro. ARCONEL – 030/2024. <https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/01/Regulacion-Nro.-ARCONEL-00424-CODIFICADA.pdf>
- ARCONEL. (2025). Pliego tarifario del servicio público de energía eléctrica. <https://www.bing.com/ck/a?!&p=657140914296fb9f3c39ed367e03c5b7d22fff9a20ba424fa1ac389eaa63b8f3JmItdHM9MTc2OTY0NDgwMA&ptn=3&ver=2&hsh=4&fclid=1ff35674-bd66-6eda-3ee0-467abcc96f90&u=a1aHR0cHM6Ly93d3cuY25lbGVwLmdvYi5lYy93cC1jb250ZW50L3VwbG9hZHMvMjAyNS8wMS8yLi1>

- QbGII228tVGFyaWZhcmlvLWRlbc1TZXJ2aWNpby1QdWJsaWNvLWRILUVuZXJnaWEtRWxIY3RyY2IhLWFuby0yMDI1LnBkZg&ntb=1
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., & Levy, A. (2017). Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico. 8. <https://doi.org/10.18235/0009630>
- Carpio Freddy, & Tepán, J. (2014). Influencia de la generación distribuida en la red de distribución eléctrica, caso práctico central de biogás Pichacay [Universidad de Cuenca]. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/f4d49761-d194-4963-b959-a244b6e9727e>
- Criollo, C. (n.d.). Factor de emisión de CO2 Sistema Nacional Interconectado del Ecuador. Retrieved February 12, 2026, from [https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/09/Factor-de-emision-de-CO2-del-Sistema-Nacional-Interconectado-de-Ecuador-Informe-2024\\_compressed.pdf](https://arconel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2025/09/Factor-de-emision-de-CO2-del-Sistema-Nacional-Interconectado-de-Ecuador-Informe-2024_compressed.pdf)
- Cuadros, H. (2017). Estimación de las emisiones difusoras de gases efecto invernadero en centrales hidroeléctricas colombianas: dióxido de carbono (CO2) y metano (CH4).
- Erdoğdu, S. (2025). Landfill gas to energy beyond an age of waste: A review of research trends. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 53, 101019. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2025.101019>
- Escamilla, P. (2019). Eficiencia y confiabilidad de modelos de estimación de biogás en rellenos sanitarios. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de La Vida*, 29(1), 32-44. <https://doi.org/10.17163/LGR.N29.2019.03>
- Espinosa, K. (2021). Biogás de residuos orgánicos como fuente de energía renovable: análisis del potencial de la ciudad de Quito. <http://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/8410>
- Jiménez, M. (2023). Desarrollo de un modelo de economía circular para la industria de plásticos reciclables en el cantón Latacunga. <https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/f0ab6af1-7b00-48ee-ba19-226cbe7d49da/content>
- López, A. (2020). Desarrollo de un motor de combustión interna de 2065 kW de potencia trabajando con biogás. [https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/50592/Tesis\\_Angel\\_Lopez\\_%20Martinez.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/50592/Tesis_Angel_Lopez_%20Martinez.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Moran, M., & Shapiro, H. (2018). *Fundamentos de termodinámica técnica*. <https://books.google.com/cu/books?id=lJjcF1oqP5wC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Naranjo, S., Punina, D., & Castillo, J. (2022). Comparative cost per kilowatt of the latest hydropower projects in Ecuador.

- InGenio Journal, 5(1), 22-34.  
<https://doi.org/10.18779/ingenio.v5i1.473>
- Parra, W., & Zambrano, R. (2021). Evaluación del potencial de producción de biogás de las aguas residuales de una planta porcina mediante digestión anaeróbica. 58-72.  
<https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/SALTOS%20MACIAS%20FABIAN%20GUSTAVO.pdf>
- Pico, S. (2024). Informe de gestión 2024 empresa pública de aseo y gestión ambiental del Cantón Latacunga-EPAGAL mayo 2025 informe de gestión 2024.  
<https://www.bing.com/ck/a?!&p=a3abac6a4b8814da145799615ace382a6fc9660ad7736a8af36d60dff1bb44caJmItdHM9MTc3MTQ1OTlwMA&ptn=3&ver=2&hsh=4&fclid=1ff35674-bd66-6eda-3ee0-467abcc96f90&psq=Informe+de+gesti%c3%b3n+2024+empresa+p%c3%b3lica+de+aseo+y+gesti%c3%b3n+ambiental+del+Cant%c3%b3n+Latacunga-EPAGAL+mayo+2025+informe+de+gesti%c3%b3n+2024.&u=a1aHR0cHM6Ly9lcGFnYWwuZ29iLmVjL3dwLWNvbnRlb nQvdXBsb2Fkcy8yMDI1LzA3L0lORk9STUUtREUtROVTVElPTi1FUEFHQUwtMjAyN C1zaWduZWQucGRm>
- Ramirez, T. (2024). Análisis de la gestión de residuos sólidos en el distrito metropolitano de Quito, un enfoque a la situación social de los recicladores.  
<https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/server/api/core/bitstreams/e01f4e09-177a-4037-83a0-17645ad97b46/content>
- Rosero, A. (2018). Evaluación del impacto ambiental de la celda emergente en la mancomunidad Pujili-Saquisili en el sector de Inchapo.
- Sánchez, F. (2024). Emisión de gases de efecto invernadero.  
[https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=zif-DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=Lo+preocupante+es+que+el+metano+es+m%C3%A1s+potente+que+el+di%C3%B3xido+de+carbono:+en+un+plazo+de+100+a%C3%B1os,+calienta+la+atm%C3%B3sfera+unas+28+veces+m%C3%A1s.+Por+eso,+si+no+se+controlan+y+no+se+captura+ese+gas+de+forma+adecuada,+estos+lugares+pueden+tener+un+impacto+ambiental+muy+serio&ots=JI8K3Zk7cA&sig=cDri3NOw3pY0xCUD6bUqyJ8L5VE&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=zif-DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=Lo+preocupante+es+que+el+metano+es+m%C3%A1s+potente+que+el+di%C3%B3xido+de+carbono:+en+un+plazo+de+100+a%C3%B1os,+calienta+la+atm%C3%B3sfera+unas+28+veces+m%C3%A1s.+Por+eso,+si+no+se+controlan+y+no+se+captura+ese+gas+de+forma+adecuada,+estos+lugares+pueden+tener+un+impacto+ambiental+muy+serio&ots=JI8K3Zk7cA&sig=cDri3NOw3pY0xCUD6bUqyJ8L5VE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Sanipatín, C. (2022). Estimación de la producción de biogás en el relleno sanitario del Cantón Pastaza, a través de modelos matemáticos, para su uso y aprovechamiento como fuente de energía eléctrica.  
<https://repositorio.uea.edu.ec/handle/123456789/1138>
- Zamonsky, P., & Bajsa, S. (2020). Captura y quema de biogás en rellenos sanitarios y su utilización para la generación de energía eléctrica. La experiencia del relleno sanitario de Las Rosas. AIDIS, 4-7.  
<https://aidis.org.uy/wp->

content/uploads/2020/10/T\_018\_Zam  
onsky-Bajsa.pdf