

Introducción de sistema de captura de biogás en el relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo

Introduction of a biogas capture system in the landfill of the city of Portoviejo

Gary Geovanny Quevedo Mendoza ^{1,*}, María Rodríguez Gámez ¹

¹Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador

*Autor de correspondencia: maria.rodriguez@utm.edu.ec

Recibido: 30 de abril de 2022

Aprobado: 4 de junio de 2022

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ABSTRACT

El objetivo del trabajo consiste en analizar la posible introducción de un sistema de captura de biogás en el relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo, con el fin de su utilización para la generación de energía eléctrica, de modo que se consiga reducir el impacto ambiental y se logre aportar energía al sistema eléctrico del territorio. Para el cálculo de la producción de biogás se empleó el Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0, desarrollado por SCS Engineers bajo acuerdo con el programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA). Se concluye que una inversión encaminada a lograr una gestión ambientalmente adecuada de los residuos sólidos, que se depositan en el relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo puede ser viable desde el punto de vista energético, ambiental, económico y socialmente útil para el territorio.

Palabras clave: rellenos sanitarios urbanos; biogás; aprovechamiento energético de residuos sólidos urbanos; gestión ambiental de los residuos sólidos urbanos.

The objective of the work is to analyze the possible introduction of a biogas capture system in the sanitary landfill of the city of Portoviejo, in order to use it to generate electricity, so as to reduce the environmental impact and it is possible to provide energy to the electrical system of the territory. For the calculation of biogas production, the Mexican Biogas Model version 2.0 was used, developed by SCS Engineers under agreement with the Landfill Methane Outreach program (LMOP) of the United States Environmental Protection Agency (USEPA). It is concluded that an investment aimed at achieving an environmentally adequate management of solid waste, which is deposited in the sanitary landfill of the city of Portoviejo, can be viable from the energetic, environmental, economic and socially useful point of view for the territory.

Key words: urban landfills; biogas; energy use of urban solid waste; environmental management of urban solid waste.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el tema vinculado con el tratamiento ambiental y energético de los rellenos sanitarios ha sido de gran interés debido a sus impactos. En el año 2015 en Madrid España, [1], se propuso un proyecto para la obtención de biogás a partir de residuos sólidos urbanos para su inyección a red mezclado con el gas natural. Entre sus objetivos se señala consigue reducir el volumen de residuos destinados a los vertederos, con la consecuente emisión de metano a la atmósfera y el aprovechamiento del biogás como fuente de energía sostenible. Como antecedentes se puede señalar que en el año 2008 el Parlamento Europeo estableció regulaciones vinculantes para establecer medidas destinadas a proteger el medio ambiente y la salud humana mediante la prevención y la reducción de los impactos adversos de la generación y gestión de los residuos, [2]. En el año 2013 la Unión Europea estableció la hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos. En su estrategia Horizonte 2020, fija como uno de sus objetivos principales: el cambio en el enfoque de la gestión de residuos en Europa.

Cómo citar este artículo:

Gary Geovanny Quevedo Mendoza y María Rodríguez Gámez. Fase inicial de proyecto para el aprovechamiento sostenible del relleno sanitario. Ciudad de Portoviejo. Ingeniería Energética, 2022, 43(2), mayo/agosto. ISSN:1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

Con este cambio, las políticas en materia de residuos se centran en la prevención y en el reciclado, convirtiendo a Europa en una sociedad eficiente que produce menos residuos y minimiza la extracción de recursos adicionales, [3]. En América Latina México se ubica entre los países líderes generadores de metano derivado de rellenos sanitarios, [4] y está localizado dentro de los diez países más productores de residuos sólidos urbanos (RSU) a nivel mundial, [5]. En el año 2016 en Ecuador se desarrolló un proyecto para evaluar el potencial energético de la producción de biogás en el relleno sanitario del cantón Salcedo, [6]. En el año 2020 se desarrolló otra investigación encaminada a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de una propuesta de generación y aprovechamiento del gas metano a partir de los residuos sólidos en el Cantón Mocache, Provincia de Los Ríos, [7].

Actualmente las ciudades ecuatorianas generan cantidades importantes de desechos sólidos diariamente, que se depositan y acumulan en rellenos sanitarios urbanos (RSU) convenientemente adecuados. De esa manera se convierten en un foco de preocupación ambiental debido a su impacto contaminante del aire, por la cantidad de gases que se emiten constantemente y que propician la aceleración del cambio climático, [8]. Del mismo modo que los rellenos sanitarios municipales surgen como respuesta a la problemática generada por la producción ascendente de residuos sólidos urbanos, se constituyen en un tema de preocupación ambiental por su impacto negativo en las condiciones ambientales, que resulta cada vez más preocupante por su incremento acelerado, especialmente por el crecimiento progresivo de los conglomerados humanos en las zonas urbanas, [9].

Los lugares de disposición de residuos sólidos se consideran fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos como material biológico, gases y otros productos que son el resultado de la degradación de los desechos orgánicos y constituyen fuente de origen antropogénico de generación de gases de efecto invernadero. Ello se debe a la descomposición de la materia orgánica que tiene lugar en dichos depósitos y que genera metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y trazas de compuestos orgánicos volátiles (COV). Dichos compuestos constituyen un potencial latente de afección de la calidad del aire y la salud, [10] y su generación varía en dependencia de la antigüedad del depósito de disposición, dado el progreso de los procesos de estabilización de los residuos y de las condiciones ambientales en las que tiene lugar dicho proceso, [11].

Para enfrentar el problema se recurre a distintos modos que permite minimizar las posibles afecciones, tales como: el confinamiento, el reciclado de materiales, la incineración, la composta o la construcción de rellenos sanitarios inertes. En el relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo en la provincia de Manabí, Ecuador sólo se realiza el reciclaje de algunos tipos de desechos sólidos y no se posee información oficial de que se lleve a cabo alguna de las otras prácticas ambientales señaladas anteriormente. La captura del biogás generado en el relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo puede contribuir a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, especialmente metano (CH_4), que resulta 21 veces más contaminante que el dióxido de carbono (CO_2). Al propio tiempo que se puede aprovechar el metano capturado para su utilización como portador energético con el objetivo de generar energía eléctrica, [12]. Por lo antes señalado el objetivo del trabajo consiste en analizar la posible introducción de un sistema de captura de biogás en el relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo, con el fin de su utilización para la generación de energía eléctrica, de modo que se consiga reducir el impacto ambiental y se logre aportar energía al sistema eléctrico del territorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El biogás de los rellenos sanitarios está integrado esencialmente por metano y dióxido de carbono, ambos gases son propiciadores del calentamiento global. El potencial de calentamiento global del metano es aproximadamente 21 veces superior al del dióxido de carbono. Es por ello que la recolección eficiente y la combustión del biogás emitido por los rellenos sanitario son procesos que contribuyen a la protección de la atmósfera y al ambiente, [13].

No obstante, para garantizar el uso del biogás capturado en los rellenos sanitarios se requiere aplicar determinados procesos según su destinación. Cuando el biogás se destina para su uso directo en calderas, hornos e industrias, así como para el funcionamiento de motores y turbinas se requiere una limpieza o filtrado inicial del biogás para eliminar partículas y vapor de agua. Para su utilización como gas natural sintético (GNS) se requiere además su acondicionamiento para eliminar el sulfuro de hidrógeno, separar el dióxido de carbono, remover los siloxanos y eliminar el amoníaco. El proceso de acondicionamiento se necesita para su incorporación a la red de gas natural y para la producción de gas natural comprimido (GNC), y gas natural licuado (GNL) que se pueden utilizar como combustible para los vehículos. En la figura 1, se muestra el tratamiento requerido para el uso del biogás según su destinación

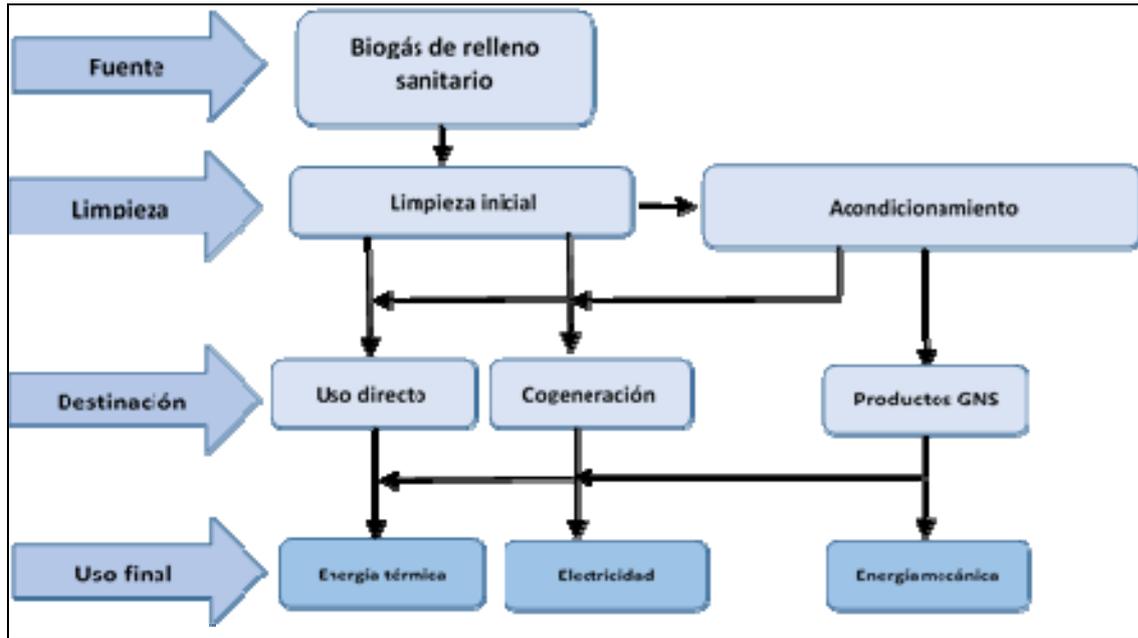


Fig. 1. Tratamiento requerido para el uso del biogás según su destino. Fuente: [13]

Micro localización del proyecto

Según una publicación del Instituto Nacional de Estadística y Censos del año 2013, la población del cantón Portoviejo es de 321.800 habitantes, pero los residentes en la ciudad que depositan en el RSU de Portoviejo son 206.682 habitantes, de acuerdo con la tasa de crecimiento poblacional de 1,5 %.

La investigación se contextualiza en el RSU de la ciudad de Portoviejo, que es un área a cielo abierto ubicada en el sector noreste de la ciudad a 2,5 kilómetros en la vía Portoviejo–El Rodeo y que se encuentra bajo la administración de la Dirección de Aseo e Higiene del Gobierno Autónomo Descentralizado (GADM) de Portoviejo. Diariamente se depositan 167,41 toneladas de residuos sólidos urbanos. En la figura 2, se muestra la ubicación del relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo.

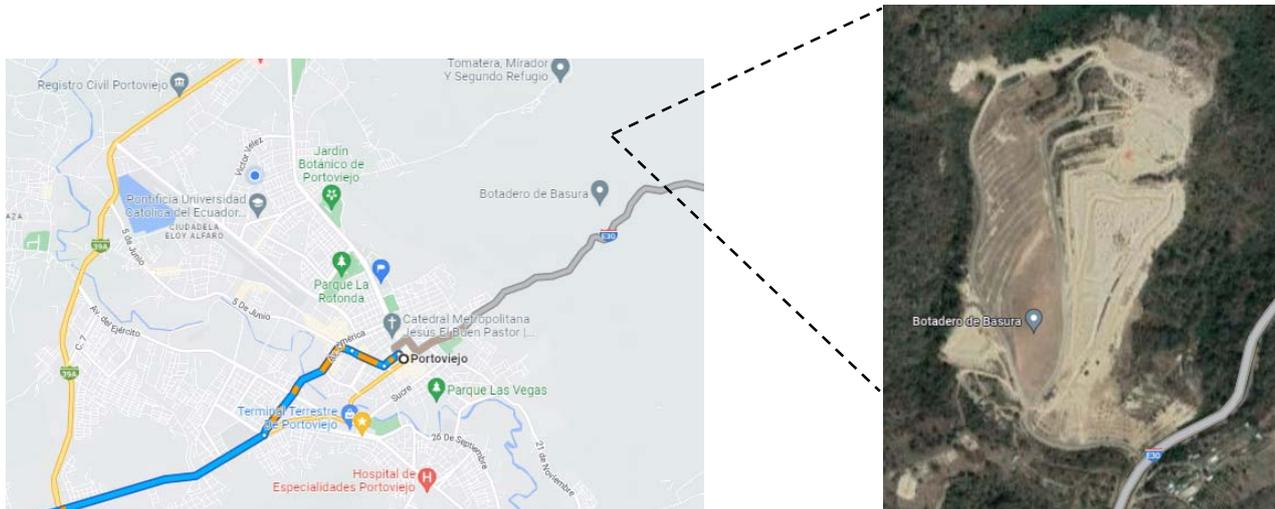


Fig. 2. Relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo. Fuente: Google Map

Cálculo y estimación de residuos que se depositan en el relleno sanitario

Para el cálculo de la captura de biogás se necesita conocer la cantidad porcentual de residuos sólidos urbanos por tipos, que se depositan diariamente y para ello se tomó el resultado obtenido en el trabajo de campo realizado, según la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización predefinida de los residuos sólidos urbanos. Fuente: [14]

| Categoría | Datos específicos (%) |
|-----------------------------|-----------------------|
| Comida | 34,5 |
| Papel y cartón | 8,1 |
| Poda de jardines | 10,6 |
| Madera | 4,6 |
| paja, caucho, piel y huesos | 2,3 |
| Textiles | 2,3 |
| Otros orgánicos | 10,5 |
| Metales | 27,0 |

Para determinar la cantidad de residuales sólidos urbano (Rsu) que es posible acumular en el tiempo de un año se utilizó la ecuación (1).

$$R_{sua} = \left(\frac{p \cdot pb}{t} \right) \cdot a \quad (1)$$

Donde:

Rsu_a → Cantidad de residuales sólidos urbano acumulado en un año (t/año).

p → *Per capita* de relleno sanitario urbano generado por persona (kg/día).

pb → Cantidad de habitantes que tributan Rsu.

t → Tonelada (1.000kg).

a → 365 días.

Estudio de escenarios posibles

Dentro de los elementos que se consideraron en el proyecto de generación de biogás se encuentran los siguientes: relleno sanitario tipo trinchera con una profundidad de 12m, que puede recibir residuales durante 11 años, con un incremento anual del 2% en la disposición final y un dispositivo de captura de 85% del total del sitio. Se prevé que el sistema pueda operar durante 20 años, según las previsiones realizadas por [15], con inicio en la recuperación de biogás en el año 2024, un año después de la apertura del sitio, prevista para el año 2023.

Para el estudio se establecieron cuatro escenarios posibles, a partir de operacionalizar teóricamente 4 modificaciones en las características específicas del relleno sanitario como son: el manejo del sitio, las características constructivas de la trinchera, disposición de los residuales y las condiciones meteorológicas relacionadas con las lluvias, que pueden influir en la cantidad y calidad de los lixiviados, lo que se puede apreciar en la tabla 2.

Tabla 2. Características y condiciones en los escenarios estudiados

| Escenarios | Manejo del sitio | Incendio | Control en cubierta de los Rsu | Compactación adecuada | Disposición adecuada de Rsu | Lixiviados | |
|---------------------------|------------------|----------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------|
| | | | | | | Época de invierno | Otra época del año |
| I Óptimo | SI | NO | SI | SI | SI | NO | NO |
| II Medianamente óptimo | SI | NO | SI | SI | SI | SI | NO |
| III Pesimistamente óptimo | SI | NO | SI | SI | SI | SI | SI |
| IV Muy pesimista | NO | SI | NO | NO | NO | SI | SI |

Cálculos para la producción de biogás

Para el cálculo de la producción de biogás se empleó el Modelo Mexicano de Biogás versión 2.0, desarrollado por *SCS Engineers* bajo acuerdo con el programa *Landfill Methane Outreach (LMOP)* de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA).

El modelo es capaz de generar proyecciones de producción y captura de biogás en dependencia del manejo de los residuales orgánicos y el arreglo del relleno sanitario, con el fin de realizar investigaciones de factibilidad a corto, mediano y largo plazo. Su aplicación permite definir un cálculo del potencial de beneficios que se puede obtener al introducir un sistema de captura y aprovechamiento del biogás como fuente de energía renovable. El Modelo Mexicano de Biogás v.2.0, se sustenta en una ecuación de decaimiento de primer orden, según se muestra en la ecuación (2), [14].

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

Donde:

Q_{LFG} → Flujo de biogás máximo esperado ($m^3/año$)

i → Incremento en tiempo de 1 año

n → (año del cálculo) – (año inicial de disposición de residuos)

j → Incremento de tiempo en 0.1 años

k → Índice de generación de metano ($1/año$)

L_o → Generación potencial de metano (m^3/Mg)

M_i → Masa de residuos dispuestos en el año i (Mg)

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

MCF → Factor de corrección de metano

F → Factor de ajuste por incendios

El beneficio ambiental derivado del aprovechamiento energético del relleno sanitario consiste en la cantidad de CO_2 equivalente evitado. El metano (CH_4) tiene un efecto 21 mayor que el CO_2 para el calentamiento global, cuando es emitido directamente a la atmósfera.

La captura y gestión energética del CH_4 que se emite en un RSU evita su emisión directa a la atmósfera de un modo económico, al aprovechar la energía contenida en el biogás y transformarla en energía eléctrica para beneficiar el servicio de electricidad en el territorio, lo que significa un ahorro de recursos naturales que se utilizan para la generación. Para ello se aplicó la ecuación (3).

$$X = Q_{LFG} \cdot 21 \quad (3)$$

Donde:

X → $CO_{2equivalente}$ evitado/año

Q_{LFG} → Flujo de biogás máximo esperado ($m^3/año$)

Para calcular la energía eléctrica producida en kWh, se realiza en base a conocer el flujo másico del biogás producido por año y su equivalencia en kWh a partir de la generación en una central eléctrica de biogás.

Para determinar la energía generada en kWh se requiere conocer el flujo másico del biogás producido por año, el poder calorífico y una eficiencia del equipo térmico, según el modelo Heat Rate de 10,800 BTU por kWh, con factor de planta de 90%. Según se expresa en la ecuación (4).

$$Rh = W_s \cdot c \cdot \Delta T \quad (4)$$

Donde:

Rh → tasa de calor en btu/h

W_s → flujo de vapor en lb/h

c → capacidad calorífica específica en btu/lb °F

ΔT → es la diferencia de temperatura en °F

La eficiencia se determinó aplicando la ecuación (5).

$$\eta = \frac{3412,14}{HR} \cdot 100\% \quad (5)$$

Donde:

η → eficiencia

HR → *Heat Rate* (btu/kWh)

Para el análisis económico a partir de la energía generada se consideró el costo real del kWh generado en una central eléctrica que utiliza combustible fósil, como las que existen en la provincia de Manabí que es de 0,18 USD/kWh, con una inflación calculada del 3% anual.

Para el análisis de la electricidad y los réditos económicos se consideró la potencia eléctrica que podría ofrecer el RSU de Portoviejo, a partir de los resultados de [14].

RESULTADOS y(o) DISCUSIÓN

En la tabla 3, se muestra el cálculo de la generación de residuales diariamente y al año.

Tabla 3. Cálculo de la generación de residuales diario y al año. Fuente: [14]

| Concepto | Generación per capita de residuales urbanos (kg/día) | Población | Generación total de residuales (kg/día) | Generación total de residuales (t/día) | Generación total de residuales (t/año) |
|-----------------------|--|-----------|---|--|--|
| Generación per capita | 0,69 | 206.682 | 142.610,58 | 142,61 | 52.052,86 |

Los beneficios derivados del proyecto se pueden traducir en impactos ambientales, energéticos económicos y sociales, según se exponen en la tabla 4.

Tabla 4. Beneficios derivados del proyecto. Fuente: [8]; [16]

| Escenarios | η captura de biogás (porcentaje) | Reducción de emisiones de CH ₄ (t/año) | Reducción de emisiones de CO ₂ equivalente (t/año) | Posible generación de energía eléctrica (kWh/año) | Petróleo evitado (t/año) | Ahorro por el costo de la energía eléctrica (USD/año) |
|------------------------|---------------------------------------|---|---|---|--------------------------|---|
| I Óptimo | 71 | 16.136 | 338.857 | 48.408.120 | 43.567 | 8.713.462 |
| II Medianamente optimo | 61 | 13.863 | 291.126 | 41.589.360 | 37.430 | 7.486.085 |
| III Pesimista | 48 | 10.909 | 229.083 | 32.726.100 | 29.453 | 5.890.698 |
| IV Muy pesimista | 40 | 7.152 | 150.182 | 21.454.560 | 19.309 | 3.861.821 |

En relación con la cantidad de población que depositan Rsu en el relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo, se puede apreciar que en 1 año se pueden acumular 52.053 toneladas de residuales, con un promedio por habitantes de 252 kg/año y un promedio de 0,69 kg/día. El biogás que se obtiene de los rellenos sanitarios se puede aprovechar para la generación de electricidad y su uso constituye una de las formas más beneficiosas, aunque el resultado del proyecto estará en dependencia de un grupo de factores, entre los que se deben considerar aspectos económicos, técnicos y de gestión, así como del sistema eléctrico del lugar donde se instala la aplicación.

En algunos casos se requiere aplicar tratamientos primarios que incluyen la remoción de vapor de agua, condensados, material particulado y espuma, o secundarios para eliminar el sulfuro de hidrógeno, siloxanos y otros contaminantes como amoníaco, halógenos e hidrocarburos aromáticos [13]. En la mayoría de los casos que se encuentran operando se usan motores de combustión interna, turbinas y microturbinas. Estas últimas se aplican en rellenos sanitarios pequeños o aplicaciones en nicho. Las tecnologías basadas en motores Stirling o motores de Ciclo Orgánico Rankine y celdas de combustible, se encuentran en fase de desarrollo y demostración [16]. Los sistemas de cogeneración experimentan una tendencia al incremento a escala global. Estos garantizan una mayor eficiencia energética, pues además de generar energía eléctrica aprovechan el calor recuperado. Esta tecnología requiere de motores de combustión interna, turbinas de gas o microturbinas. Resultan de una menor aplicación los sistemas de generación de electricidad basados en caldera-turbina de vapor, ya que son más eficientes cuando se trata de proyectos de producción de electricidad de mayor escala.

Los sistemas basados en motores recíprocos de combustión interna (MRCI) resultan los que tienen una mayor aplicación ya que exhiben una alta eficiencia en comparación con las turbinas de gas y microturbinas. Los MRCI presentan un bajo costo por kW de potencia en comparación con las turbinas de gas y microturbinas. Existen varios tamaños que pueden adecuarse a los flujos del biogás en dependencia del tamaño del sistema de captura. La eficiencia de esta tecnología se comporta entre 25% y 35%, aunque los rendimientos pueden ser mayores en aplicaciones de cogeneración, debido a que se recupera el calor residual que se puede utilizar para otras aplicaciones. Presentan la ventaja de poder añadir o quitar motores según la disponibilidad en la producción de biogás.

El rango de tamaño para proyectos típicos asumiendo 50% de metano en el biogás es entre 8 y 30 m³/min de Global Recycled Standard (GRS), con capacidades entre 800 kW y 3 MW. Para los proyectos de mayor escala se pueden combinar varios motores, siempre que existe disponibilidad de producción de biogás. Considerando un escenario intermedio para el aprovechamiento del RSU del municipio de Portoviejo, se puede estimar desde el punto de vista ambiental que en un año se dejan de emitir a la atmósfera 291.126 t de CO₂equivalente/año. Desde el punto de vista energético se estima que es posible generar durante el segundo año de operación 41,6 MWh/año, con un ahorro de 10,4 t de petróleo/año.

La contribución de los sistemas de captura del biogás generado en los rellenos sanitarios y su relación con el efecto invernadero puede cuantificarse en referencia a su contribución relativa al potencial de calentamiento global (PCG), por las propiedades radiactivas del gas y de su vida media atmosférica, que puede ser definido como el cambio de tiempo integrado que usualmente es de 100 años, en las propiedades radiactivas de la atmósfera debido a la conversión instantánea de 1 kg de gas metano en 21 kg de CO₂equivalente.

La generación de electricidad a partir de biogás obtenido de rellenos sanitarios, desde el punto de vista ambiental representa un doble aporte. Se puede considerar como un proyecto multipropósito, pues además de generar energía eléctrica a partir de recursos renovables, contribuye a mitigar la generación de gases de efecto invernadero a la atmósfera, una a través de la captura de metano para sustituir los combustibles fósiles que se utilizan en la generación de electricidad. Desde el punto de vista económico la generación de electricidad derivada del RSU puede ahorrar 7.486.085 USD/año. Se puede calcular un costo aproximado para la inversión, operación, mantenimiento y clausura del sistema de aprovechamiento energético en 107,65 USD/t residuales sólidos [14]. Ello permite calcular una inversión de 5.603.847,06 USD, que se logra recuperar a partir del ahorro por la generación convencional de energía en un año, con un valor actualizado neto equivalente a 1.882.237,94 USD.

A escala mundial existen varios proyectos que utilizan los sistemas de generación de electricidad basados en motores de combustión interna, entre ellos se pueden mencionar: el de Ox Mountain Estados Unidos de América con una potencia de 11 MW; el proyecto Dairyland en el propio País con una capacidad de 4 MW; el sistema del relleno sanitario de Monterrey México con capacidad de 12 MW; en Belo Horizonte Brasil con una potencia de 4.3 MW (USEPA, 2006). Este tipo de sistema resulta una opción que puede ser viable para el relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo.

CONCLUSIONES

A partir del método deductivo y el análisis de las teorías más generales asociadas con la gestión de los residuales urbanos se estableció la premisa donde se plantea que, el aprovechamiento energético de los residuales sólidos urbanos que se depositan en el relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo puede generar un grupo de ventajas energéticas, ambientales, económicas y sociales. El desarrollo del objetivo del trabajo permitió diseñar cuatro escenarios que, en todos los casos resultan factibles para realizar una inversión encaminada a lograr una gestión ambientalmente adecuada de los residuales sólidos, que al propio tiempo es capaz de ser viable desde el punto de vista económico y socialmente útil para el territorio.

Considerando un escenario de eficiencia medio en cuanto a la captura de biogás, en el primer año de haberse introducido la inversión para el sistema energético se logra evitar las emisiones de 291.126 t CO₂equivalente/año. Con una generación probable de energía de 41,6 MWh/año, que permite ahorrar 10,4 t de petróleo/año.

El ahorro económico que puede generar el RSU de Portoviejo en un año está calculado en 7.486.085 USD/año. Se estima que para la inversión del sistema de aprovechamiento energético de los Rsu se requiera un monto equivalente a 5.603.847,06 USD. Ello permite apreciar que en el primer año de operación del sistema se logre recuperar el monto invertido, con un valor actualizado neto de 1.882.237,94 USD.

La metodología de trabajo aplicada es capaz de proveer una visión general para ser aplicada durante la fase inicial de proyectos para el aprovechamiento sostenible de los residuales sólidos urbanos, en otros territorios con características e intereses similares. Ello permitirá desplegar los estudios de ciclo de vida enmarcando los aspectos más prominentes para tener en cuenta en la selección del diseño o de la operación del sitio de disposición.

REFERENCIAS

- [1]. CUESTA-López, J. ``Obtención de biogás a partir de Residuos Sólidos Urbanos para su inyección a Red``. Trabajo de fin de grado. Universidad Carlos III de Madrid. 2015. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23542/TFG_Jorge_Cuesta_Lopez.pdf
- [2]. Parlamento Europeo. (2008). Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2008-82319>
- [3]. CDTI. (2014). Horizonte 2020. División de Programas de la Unión Europea del CDTI. Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.horizonteeuropa.es/sites/default/files/inline-files/guia-del-participante-h2020-g-rapida.pdf>
- [4]. JOHARI A., *et al.* ``Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia``. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, n. 5, p. 2907-2912. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.005>
- [5]. RAWAT M., Ramanathan A. L. ``Assessment of methane flux from municipal solid waste (MSW) landfill areas of Delhi, India``. *Journal of Environmental Protection*, 2011, vol. 2, p. 399-407. DOI: 10.4236/jep.2011.24045. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=5410>
- [6]. ALBÁN-Castellanos, E. D. ``Evaluación del potencial energético de la producción de biogás en el relleno sanitario del cantón salcedo durante el año 2015. Propuestas para un aprovechamiento sostenible``. Tesis de Maestría. Universidad Técnica de Cotopaxi. Ecuador. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/6197/1/MUTC-000400.pdf>
- [7]. POSLIGUA-Solis, J. G. ``Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de una propuesta de generación y aprovechamiento del gas metano a partir de los residuos sólidos en el Cantón Mocache, Provincia de Los Ríos``. Tesis de grado. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, FLACSO Ecuador. 2020. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/bitstream/10469/16796/2/TFLACSO-2020JGPS.pdf>
- [8]. CAMARGO, Y. y Vélez, A. ``Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios``. II Simposio Iberoamericano. I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Barranquilla, 24 y 25 de septiembre de 2009. Colombia. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: <http://www.redisa.net/doc/artSim2009/TratamientoYValorizacion/Emisiones%20de%20biog%C3%A1s%20producidas%20en%20rellenos%20sanitarios.pdf>
- [9]. RODRÍGUEZ, G. S. Sauri, R.M., y Peniche, A.I. ``Aerotransportables viables en el área de tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales de Mérida, Yucatán``. *Ingeniería Revista Académica*, vol. 9, n. 3, p. 19-29. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46790302.pdf>
- [10]. HINCAPIÉ, I., Estévez, S., y Giraldo E. ``Análisis y comportamiento de compuestos orgánicos volátiles en las emisiones de biogás del proveniente del relleno sanitario de Doña Juana``. 2009. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: http://columbus.uniandes.edu.co:5050/dspace/bitstream/1992/5171/mi_937.pdf
- [11]. GÓMEZ, R. S., Filigrana, P.A. ``Descripción de la calidad del aire en el área de influencia del Botadero de Navarro, Cali, Colombia``. *Colombia Médica*. 2008, vol 39, n. 3, p. 245-252. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/cm/v39n3/v39n3a6.pdf>
- [12]. VÁZQUEZ-Pérez, A. Un modelo para el desarrollo energético sostenible. La universidad, la geografía y los recursos endógenos. Tesis doctoral. 2022. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/123348>
- [13]. BLANCO, Gabriel. *et al.* ``Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico``. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Energía. Marzo 2017. Nota técnica IDB-TN-1260. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/publicacion/13967/generacion-de-electricidad-partir-de-biogas-capturado-de-residuos-solidos-urbanos>
- [14]. VERA-Romero, Iván. *et al.* ``Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos``. *Ing. invest. y tecnol. Ciudad de México jul./sep.* 2015.vol. 16, n. 3. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432015000300013

- [15]. FLORES R., *et al.* ``Estimación de la generación de energía a partir de biomasa para proyectos del programa de mecanismo de desarrollo limpio``. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 2008, vol. 7, p. 35-39. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382008000100005
- [16]. GOLDSTEIN, R. ``2006 Update: The State of U. S. Landfill Gas Utilization Projects``. Diario de Cogeneración y Generación Distribuida. 2007, vol. 22, n. 1. [Consultado el 13 de mayo de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15453660709509104>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Gary Geovanny Quevedo Mendoza: <https://orcid.org/0000-0001-7684-1007>

Diseño de la investigación, recopilación de los datos necesarios, simulaciones, diseños y redacción del artículo. Participación de los análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.

María Rodríguez Gámez: <https://orcid.org/0000-0003-3178-0946>

Diseño de la investigación, recopilación de los datos necesarios, simulaciones, diseños y redacción del artículo. Participación de los análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido y aprobación final.