

Evaluación energética de la formación de biogás obtenido de residuos sólidos urbanos del relleno sanitario mediante el modelo LandGEM

Energy evaluation of the formation of biogas obtained from solid urban waste from the sanitary landfill using the LandGEM model

Stiven Javier Sofán Germán 

Alejandro Ruiz Garcés 

Miguel Emigdio Doria Oviedo 

Universidad del Sinú – Elías Bechara Zainúm, Colombia

Jose David Arrieta Torres 

Universidad de Córdoba, Colombia

OPEN  ACCESS

Recibido: 12/04/2023

Aceptado: 14/06/2023

Publicado: 31/07/2023

Correspondencia de autores:
stivensofan@unisinu.edu.co



Copyright 2020
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Estimar la energía disponible para generar electricidad a partir de biogás de vertedero utilizando el modelo LandGEM adaptado a las condiciones locales de Montería, Colombia. **Metodología:** Para ello se obtiene de base de datos y estudios la información del relleno sanitario de residuos Loma Grande ubicado en la ciudad de Montería, volumen de residuos, clima y composición de residuos para el periodo 2016-2028, para aplicar el modelo LandGEM a la producción de energía de biogás. **Resultados:** se observó que solo para el año 2022 la cantidad de metano calculada es de 9.984.000 m³/año y con esto la energía estimada total es de 268.4968 MWh, que podría suministrar los requerimientos del relleno sanitario Loma grande. **Conclusión:** El estudio predice que estos modelos de evaluación se pueden utilizar para planificar la producción de energía a partir de gas de vertedero, y así, aprovechar la propiedad de terrenos improductivos que normalmente se utilizarían como vertedero y que se crearon previamente para materiales contaminantes no destructivos.

Palabras clave: Biogás, LandGEM, vertedero, residuos sólidos urbanos, metano.

Abstract

Objective: Estimate the energy available for electricity production from biogas obtained from landfill waste using the LandGEM model adapted to the local conditions of Montería, Colombia. **Methodology:** For this purpose, information on the loma grande landfill located in the city of Montería, waste volumes, climate, and waste composition from 2016 to 2028, obtained through databases and other studies, was used to apply the LandGEM model to power generation in biogas composition. **Results:** it was observed that only for the year 2022 the amount of methane calculated is 9,984,000 m³/year and with this the total estimated energy is 268,4968 MWh, which could supply the requirements of the Loma grande sanitary landfill. **Conclusion:** The study predicts that these assessment models can be used to plan landfill gas energy production, and thus, take advantage of unproductive land ownership that would normally be used as a landfill and that was previously created for non-destructive polluting materials.

Keywords: Biogas, LandGEM, landfill, municipal solid waste, methane.

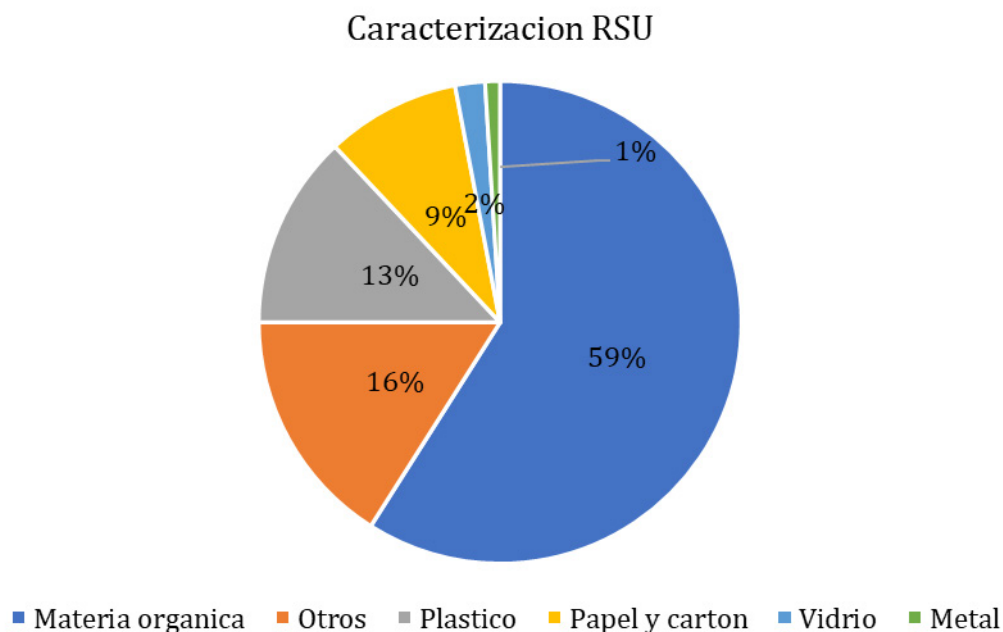
Introducción

Hoy en día, los vertederos son fuente de energía con gran potencial energético aprovechable de los residuos normalmente de manera eléctrica, ya que pueden ser utilizados para obtener energía en forma de la biomasa y en algunos casos del biogás. Para producir biogás en los vertederos, los residuos depositados deben contener sustancias orgánicas y tener condiciones de descomposición anaerobia. Además, cabe señalar que la producción de biogás de los vertederos no depende del tiempo, ya que aumenta durante el primer año (la primera fase de producción de biogás) y disminuye lentamente después del tercer año [1]. América Latina y el Caribe generó 541.000 toneladas de residuos por día en 2014 (de las cuales 145.000 toneladas por día fueron a vertederos), y se espera que estas cifras alcancen las 671.000 toneladas por día para 2050. Actualmente, el Caribe latinoamericano produce un promedio de 1,04 kg por día, aproximadamente 40 millones de personas no pueden recolectar sus residuos y más del 50% de los residuos sólidos urbanos (RSU) generados son orgánicos [2].

Para producir biogás en un vertedero, los residuos almacenados deben contener materia orgánica y tener las condiciones adecuadas para la descomposición anaeróbica [3]. Estos vertederos de residuos municipales finales son una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), a la atmósfera. Estas emisiones en los países desarrollados se han estabilizado en gran medida, pero las emisiones en los países en desarrollo siguen aumentando [4].

Los RSU en Colombia generalmente incluyen desechos orgánicos de alimentos y recortes. La caracterización de estos RSU se muestra en la figura 1.

Figura 1. Características de RSU en Colombia



Fuente: [5]

Aquí en Colombia existen políticas para el manejo de residuos las cuales faculta como debe constituirse un RSU [6, 7].

En Colombia se han realizado estudios para identificar y cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero de los rellenos sanitarios. Las condiciones en algunas partes del país (a menudo alta temperatura y humedad) favorecen la descomposición anaeróbica de los desechos, lo que resulta en grandes cantidades de CH_4 , la segunda más grande en las emisiones totales de Colombia [8].

Para poder evaluar y brindar más información sobre la generación de electricidad con gas de vertedero, es necesario identificar las variables individuales que pueden ocurrir en el proceso. Algunas de estas variables son: eficiencia de la planta, contenido de metano del biogás, temperatura de almacenamiento, etc. Con base a estas variables, es posible determinar la energía eléctrica producida por una determinada cantidad de biogás. La producción de gas se obtuvo a partir de los datos obtenidos en [9], que indica la cantidad de metano por volumen de gas de vertedero y utilizando la información de la tabla de propiedades termodinámicas del metano [10].

Como el metano es un gas natural con mejores características que las fuentes de energía convencionales a base de petróleo, se puede utilizar reemplazándolos, haciendo todas las actividades con necesidad energética en donde el metano aplica de manera mucho más amigable [11].

Ahora bien, [12] evaluaron tres sistemas integrados de gestión de agua y residuos sólidos urbanos (RSU) en cuanto a su uso de energía, producción y emisiones de CO_2eq : Primeramente, un tratamiento aeróbico a base de biogás de aguas residuales y eliminación de residuos sólidos mediante relleno sanitario en el que la codigestión de lodos con RSU y la captura de gas de relleno sanitario producen electricidad mediante una turbina y un generador. Luego, un tratamiento de aguas residuales a base de biogás con codigestión de lodos con sólidos biodegradables combinado con incineración de lodos combustibles y otros sólidos. Y por último, un sistema basado en hidrógeno que reemplaza el vertido por gasificación indirecta de sólidos orgánicos seguido de pilas de combustible de hidrógeno.

Existen grandes diferencias entre las emisiones de CO_2eq del biogás y los sistemas basados en hidrógeno. Los dos primeros sistemas son emisores positivos de CO_2 y metano. Lograr cero emisiones netas de carbono es poco probable. El sistema basado en H_2 está completamente descarbonizado y, además de agua limpia, energía y emisiones negativas de dióxido de carbono, produce productos valiosos como energía, hidrógeno concentrado, fertilizantes, oxígeno/ozono y dióxido de carbono concentrado.

Los autores [13] presentaron una breve revisión de la literatura reciente sobre tecnologías de Waste-to-Energy, proyectos en operación en Brasil y proponen un enfoque innovador para analizar la viabilidad financiera de la combinación de destinos consolidados para la gestión de Residuos Sólidos Municipales (RSU) (tecnología rutas), que utilizan residuos a energía, considerando la complementación de ingresos para pequeñas ciudades con poblaciones de 30.000 a 250.000 habitantes, a través de la implementación de un algoritmo de optimización de la contribución de los contribuyentes. Utilizaron un algoritmo estructurado con un enfoque en la estimación de los ingresos del valor mínimo de las contribuciones de los contribuyentes (RPC) para viabilizar estas rutas para la mayoría de las ciudades consideradas en el proyecto. Los indicadores económicos utilizados incluyen: Valor Actual Neto (NPV), Tasa Interna de Retorno (IRR), Período de Recuperación Descontado (DPP) y Costo Nivelado de Electricidad (LCOE). Realizaron un análisis de sensibilidad de las dos mejores rutas (dependiendo de los valores más bajos de RPC) con base al VPN. Los resultados confirmaron soluciones que pueden ser aprobadas no solo por el gobierno, sino también por el sector empresarial. Los mejores resultados son las rutas con vertedero y gas de vertedero, y con reciclaje y digestión anaeróbica, considerando la venta de digestato y vertedero. El análisis de sensibilidad indicó una mayor influencia en los costes de inversión del gas de vertedero para la primera vía y para la segunda vía, los servicios de recogida y limpieza urbana.

Así mismo, los autores [14] investigaron la descomposición abiótica de residuos sólidos municipales (RSM) simulados para determinar las reacciones térmicas que afectan a los componentes del gas de vertedero, como el metano, el dióxido de carbono y el hidrógeno. La composición del gas y la temperatura se controlaron en función de la velocidad y el tiempo de calentamiento. Las tendencias de la composición del gas muestran que, para entradas de calor superiores a 46 W, la relación CH_4/CO_2 diverge desde el valor inicial de 1,0 hasta 0,2, lo que se correlaciona con una disminución en la concentración de CH_4 . Los principales hallazgos del estudio incluyen que la relación de composición del gas primario (CH_4/CO_2) comienza a reducirse desde el valor de referencia de 1,0 a medida que la tasa de calentamiento aumenta de 30 W a 51 W y disminuye aún más a tasas significativamente más altas más allá de 51 W. El estudio proporcionó información sobre las condiciones operativas, como el calor y la humedad disponibles lo que lleva a cambios en las proporciones de gas de vertedero.

El impacto de residuos de todo tipo han sido un problema mundial preocupante. Y en estos últimos años los avances han propiciado un manejo inteligente de los mismos, vemos que en Australia una inteligencia artificial es una tecnología poderosa que está ganando cada vez más popularidad y aplicación en varios campos, sin ser esta la excepción [15].

La introducción de herramientas tecnológicas para la producción, clasificación, recolección, enrutamiento de vehículos, manipulación, eliminación y planificación de la gestión ha simplificado este proceso en Australia. Haciéndose uso de lo ya trabajado desde el 2005 a 2021 en temas de RSU de varias bases de datos. Lo cual nos ha permitido la implementación cada vez más certera de la inteligencia artificial al manejo de estos recursos, comparando el rendimiento de las aplicaciones de inteligencia, explorando los beneficios y eventualmente problemas, se proporcionan recomendaciones de para optimizar la eficiencia de este proceso ambiental y social [16].

Finalmente se encontró que la aplicación de estos modelos tiene mayor impacto positivo que el uso de sistemas habituales, pues el proceso de los datos de manera inteligente se traduce en mejoras en las predicciones que se necesitan para tomar decisiones tempranas, lo que a Australia ha beneficiado enormemente dándole un enfoque más saludable ambientalmente y transformando los problemas que ya hay en soluciones más amigables, siendo esta una opción aplicable a otros lugares en el mundo [16].

Metodología

Recolección de RSU en Montería

La empresa encargada de la recolección de residuos en los 250 barrios de la ciudad de Montería, pero de estos, solo el 83 % pertenecen al área urbana de la ciudad [6] por lo cual URBASER gestiona alrededor de **13.700 ton** de basuras al mes, los cuales son puestos a disposición del relleno sanitario Loma Grande.

Composición del biogás

La descomposición anaeróbica ocurre cuando no hay materia orgánica que contenga celulosa en el aire, como estiércol, excrementos de pájaros, podredumbre de algunas plantas, etc. Esto conduce a una falta de oxígeno en la producción de gas combustible.

Los gases que podemos obtener de los vertederos son amoníaco (NH_3), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), metano (CH_4), nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2) [1]. El metano y el dióxido de carbono son los dos principales gases producidos durante la digestión anaerobia de componentes de residuos orgánicos biodegradables en RSU.

Con una concentración de metano en el aire del 5 % al 15 %, es explosivo, por lo que este gas es el componente principal de esta evaluación. Dado que solo hay una cantidad limitada de oxígeno en los vertederos, cuando las concentraciones de metano alcanzan niveles críticos, el riesgo de explosiones en los vertederos es bajo. Sin embargo, si el gas de vertedero migra fuera del sitio y se mezcla con el aire, se puede formar una mezcla de metano en la zona de explosión.

Tabla 1. Constituyentes típicos de los gases RSU

Componente	Símbolo	Base volumen seco [%]
Metano	CH ₄	50-70
Dióxido de Carbono	CO ₂	35-55
Nitrógeno	N ₂	2-5
Sulfuros, Disulfuros, Mercaptanos, etc.	--	0-1.0
Oxígeno	O ₂	0.1-1
Amoniaco	NH ₃	0.1-1
Hidrogeno	H ₂	0-0.2
Monóxido de carbono	CO	0-0.2

Fuente: [1]

La Tabla 1 muestra la distribución porcentual de los gases típicos que se encuentran en los vertederos de RSU, donde la distribución varía con la edad del vertedero y las características de los residuos. Para ello, se deben realizar periódicamente estudios de residuos para saber cuánto biogás se puede utilizar en un determinado periodo de tiempo.

Modelo matemático

Landfill Gas Emissions Model (LandGEM), basado en ecuaciones de primer orden desarrolladas por la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. (EPA) [17], es una herramienta automatizada basada en Microsoft Excel que se puede utilizar para estimar los factores de emisión de biogás, metano, dióxido de carbono y otros compuestos. El modelo LandGEM [18] utiliza la ecuación de reducción de primer orden (1) para estimar las emisiones anuales durante un período de tiempo:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}} \quad (1)$$

Donde:

Q_{CH_4} : Producción anual de metano calculada en el año n $\left[\frac{m^3}{año}\right]$.

i : Incremento de tiempo de 1 año.

n : La diferencia entre el año de cálculo y el año en que comienza la recolección de basura.

j : Incremento de tiempo de 0.1 año.

k : Tasa de producción de metano $\left[\frac{1}{año}\right]$.

L_0 : Potencial de producción de metano $\left[\frac{m^3 CH_4}{año}\right]$.

M_i : Cantidad de basura recolectada anualmente i [ton].

t_{ij} : Año de la "j" sección de los residuos acumulados en el año "i".

Los valores de k y L_0 varían en función de la precipitación anual registrada en la ciudad donde se ubica el relleno sanitario como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Índices de generación de metano k y L_0

Precipitación anual (mm/año)	k (año ⁻¹)	L_0 (m ³ /ton)
0-249	0.040	60
250-499	0.050	80
500-999	0.065	84
≥ 1000	0.080	84

Fuente: [1]

El relleno sanitario Loma Grande está situado en las afueras del centro de Montería con un clima medio de 26°C y una precipitación media de 1262 mm/año. Esto crea un ambiente recomendable para el desarrollo de digestión anaeróbica y aumenta la obtención de biogás del vertedero.

La calidad de la salida del modelo depende de los datos de entrada, lo que requiere ciertas suposiciones para estimar la cantidad y composición de los residuos, parámetros que se pueden asignar fácilmente de acuerdo con las condiciones del campo.

Determinación del potencial de generación

El CH₄ procedente por los RSU se utilizó para establecer el potencial de generación de electricidad. La fórmula 2 muestra cómo prever la magnitud de generación de energía de un régimen de recuperación de biogás de vertedero.

$$EAG = \frac{Q_{CH_4} * 37.2 \frac{Mj}{m^3} * EGE * ER * 0.9 * C}{\emptyset} \quad (2)$$

Donde:

- Q_{CH_4} : el metano generado $\left(\frac{m^3}{año}\right)$.
- $37.2 \left(\frac{Mj}{m^3}\right)$ es el calentamiento mínimo para el metano [17, 18].
- EGE: es la eficiencia de producción de energía del dispositivo de conversión. Según [18] se puede considerar de 35%.
- ER: es la eficiencia de recuperación de metano y se supuso que era del 75% como se indica en [18, 19].
- 0.9 es el factor de oxidación del vertedero [17].
- C es el factor de capacidad se considera como 85% [18, 19].
- \emptyset es el factor de conversión de MJ a MWh.

Para evaluar esto, se realizó la recolección de datos brutos sobre los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario que administra Montería Loma Grande. Los datos específicos del relleno sanitario gestionado se muestran en la Tabla 3 como referencia del estudio de caso de Colombia.

Tabla 3. Composición Elemental RSU Colombia

Residuos	%H2O	%C	%H	%O	%N	%S	%ASH
Alimentos	70,0	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel	6,0	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Plástico	2,0	60,0	7,2	22,8	0,0	0,0	10,0
Textiles	10,0	55,0	6,6	31,2	4,6	0,2	2,5
Maderas	20,0	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
Podas	60,0	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5

Fuente: [20, 21].

Resultados

Los datos de residuos sólidos primarios y secundarios se recolectaron del Relleno Sanitario Loma Grande en el municipio de Montería. Según [22] los datos disponibles y las proyecciones de la cantidad de residuos sólidos que ingresan al relleno sanitario en este estudio, los residuos sólidos del relleno sanitario de Loma Grande en el municipio de Montería tienen las características que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Caracterización de residuos sólidos residenciales municipio de montería

Residuo	%
Papel	1,87
Cartón	3,34
Plástico	18,06
Textiles	5,35
Goma	0,33
Madera	0,2
Metales	0,33
Productos de Jardinería	0,6
Cerámica, escombros, Cenizas y rocas	0,33
Residuos Orgánicos	60,87
Higiénicos y Sanitarios	4,01
Otros	4,71

Fuente: [22]

Como se muestra en la Tabla 4, la composición de los RSU que ingresan al relleno sanitario de Loma Grande son los que más residuos orgánicos o alimentarios generan, seguidos de plásticos, textiles, saneamiento e higiene, cartón y papel.

La Tabla 5, por su parte, documenta el comportamiento actual de la generación y población del municipio, así como las previsiones para los próximos años, a partir de 2016 y finalizando en 2028 (vida útil del vertedero) [22]. Así mismo, los cálculos de la producción de residuos se utilizó la ppc (producción per cápita) de **0.91 kg/habitante – día**, la cual para el año 2028 dio como resultado un total de 360720 toneladas de residuos sólidos municipales y actualmente, existe una generación de residuos alrededor de 390198 toneladas de RSU.

Tabla 5. Proyección de la producción de residuos cabecera municipal de Montería

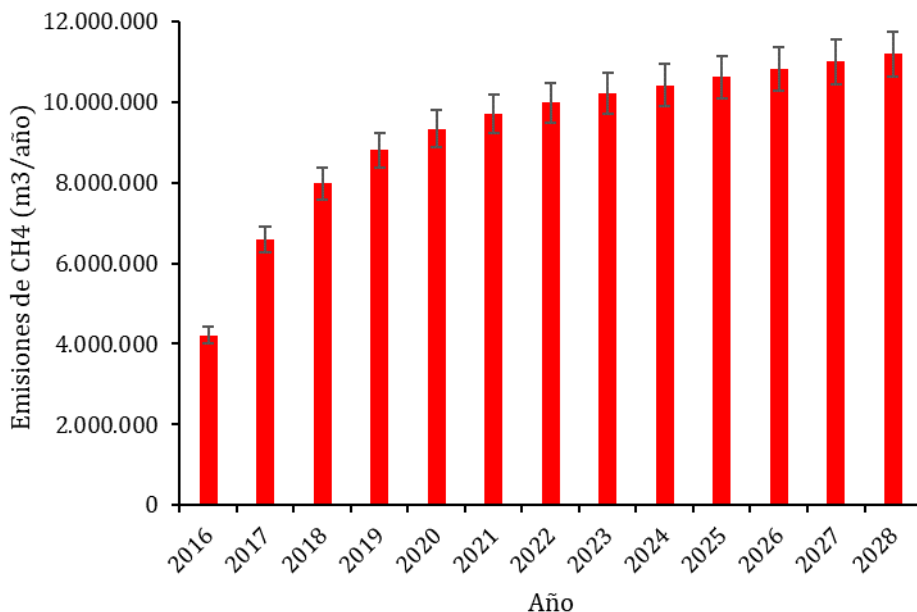
Año	Población cabecera municipal	RSU generados kg/día	RSU generados ton/día	RSU generados ton/año	RSU generados acumulados
2016	346.921	294.883	294,88	107.632,24	107.632,24
2017	352.796	299.877	299,88	109.455,05	217.087,29
2018	358.771	304.955	304,96	111.308,74	328.396,03
2019	364.847	310.120	310,12	113.193,81	441.589,84
2020	371.026	315.372	315,37	115.110,81	556.700,66
2021	377.310	320.713	320,71	117.060,28	673.760,94
2022	383.699	326.145	326,15	119.042,76	792.803,70
2023	390.198	331.668	331,67	121.058,82	913.862,52
2024	396.806	337.285	337,29	123.109,02	1.036.971,53
2025	403.526	342.997	342,99	125.193,94	1.162.165,47
2026	410.360	348.806	348,81	127.314,17	1.289.479,64
2027	417.310	354.713	354,71	129.470,31	1.418.949,95
2028	424.377	360.720	360,72	131.662,96	1.550.612,90

Fuente: [22]

Cálculo de la producción de CH₄ utilizando el modelo LandGem

Esto es la estimación de composición de RSU que llegan al relleno sanitario Loma Grande en Montería, tomando en consideración que el estudio se realizó para un intervalo comprendido entre el año 2016 hasta el año 2028. La empresa URBASER es la encargada de recolectar los residuos en la ciudad, reporta que gestionan al mes en solo la ciudad de montería **16500 ton** de basura en los 250 barrios que tiene la ciudad de Montería en la actualidad, pero en este estudio solo se analizaron los RSU del área urbana que tiene 207 barrios y correspondería un aproximado de **13700 ton** de basuras al mes. Se procedió a hacer el cálculo de producción de CH₄ en un año con el modelo LandGEM modificado para Colombia, según la figura 2 el volumen total de metano arrojado por el modelo en un promedio anual es de **9297923 m³/año**.

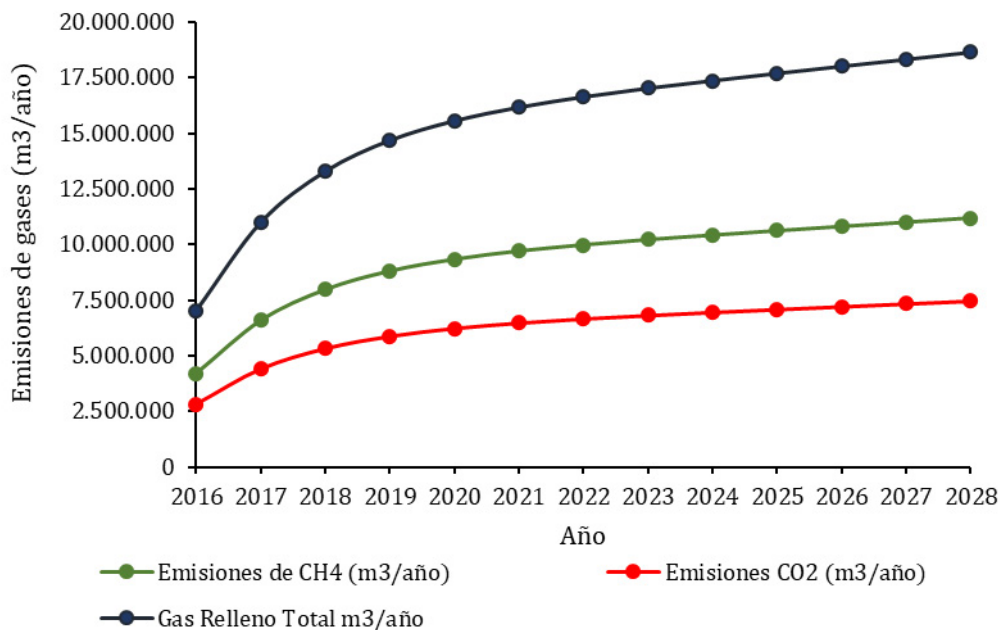
Figura 2. Producción anual de metano en el relleno sanitario Loma Grande, 2016-2028 (m³/año)



Fuente: Elaboración Propia

Sin embargo, la Figura 3 muestra las tendencias anuales de emisión de gases (m³/año) para todos los gases calculados (total de gas de vertedero, CH₄ y CO₂). Como se puede apreciar la producción anual va en aumento debido a que la cantidad de habitantes aumenta y por ende la cantidad de RSU generados también aumenta, lo que hace que la producción de gases aumente a medida que pasan los años.

Figura 3. Emisiones anuales de gases del relleno sanitario Loma Grande, 2016-2028, con base en el software LANDGEM (m³/año)

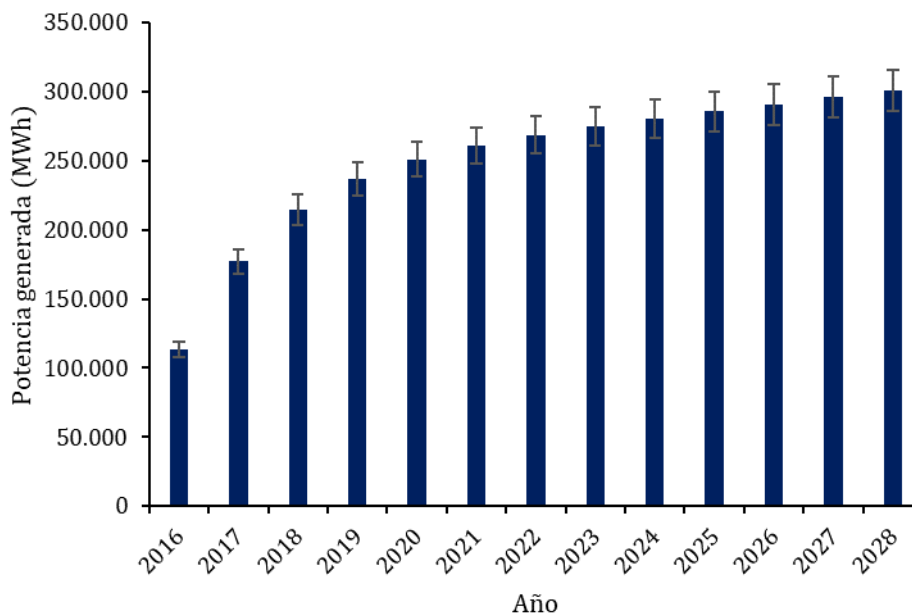


Fuente: Elaboración Propia

Cálculo de la potencia generada

La fracción de CH_4 generada por los RSU recolectados y dispuestos en el Relleno Sanitario Loma Grande se estimó para el potencial de generación eléctrica a partir de biogás utilizando la Ecuación 2, que es una estimación del potencial de generación de electricidad del relleno sanitario Loma Grande. Este, según los cálculos realizados, pudo haber entregado 17.152 MWh en 2022 en el municipio de Montería. Así mismo, se estimó para el intervalo de años, con una producción neta de 3250 GWh.

Figura 4. Producción de energía eléctrica (MWh) a partir de residuos dispuestos en el Relleno Sanitario Loma Grande de 2016 a 2028



Fuente: Elaboración Propia

Los modelos que generan estas estimaciones de metano de los vertederos son importantes para tener en cuenta sus impactos ambientales potenciales y ayudar a preparar y rastrear los inventarios de gases de efecto invernadero.

Conclusiones

Los antecedentes recopilados sobre los residuos sólidos que se depositan en el vertedero de Loma Grande permiten estimar las emisiones de gases de vertedero utilizando el modelo LandGEM para el vertedero de Montería. La cantidad promedio de metano que se muestra en los RSU es de **9297923 m³/año**. Se espera que el consumo total de electricidad para 2016-2028 esté entre 113.273 MWh y 300.931 MWh para satisfacer la demanda de los vertederos (sistema de tratamiento de agua y bombas), así como los pagos adicionales de los hogares y otros beneficios. Esta estimación depende en gran medida de la calidad de los datos disponibles y de la elección de los factores apropiados. El volumen de producción calculado por el modelo está fuertemente influenciado por la cantidad de residuos generados, por lo que una mayor tasa de generación de residuos también conducirá a un aumento en la producción de metano en el futuro [23].

Los resultados obtenidos son dependientes y de cualidades estrictamente relacionadas con cada región. Con respecto a esta investigación, fue bastante beneficioso en comparación a los encontrados en el resto de Colombia, así mismo alrededor del mundo, debido a que la naturaleza de los elementos necesarios

para el biogás es muy abundante en el entorno de Montería, la calidad del RSU es propia de una región vegetalmente variada. Así mismo, se logra mejorar el uso de los terrenos inactivos que circundan la zona, pues además de disminuir su impacto por la materia que en este caso se desvía para este proyecto, se logra organizar más, teniendo como resultado un aumento de la eficiencia en el reciclaje que en este tipo de lugares también se hace. Contribuyendo entonces a un aporte esencial para la mejora de nuestro entorno en Córdoba, dando un buen ejemplo de lo que se debería hacer con los RSU en toda la región.

Referencias

1. F. Andrés, A. Juan, J. Juan, and del C. María, "Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica," *Sci. Tech.*, vol. XVII, pp. 23–28, 2011, [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84921327006>.
2. Organización de las Naciones Unidas - Medio Ambiente (ONU Medio Ambiente), *Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe Perspectiva de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe*. 2018.
3. FAO, MINENERGIA, PNUD, and GEF, "Manual del Biogás," *Proy. CHI/00/G32*, p. 120, 2011, [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>.
4. I. Márquez, "Disposición Final de Residuos Sólidos," *Supt. Serv. Públicos Domic.*, vol. 2215, p. 97, 2019.
5. T. E. Pilar, E. M. Arce, D. Daza, M. S. Faure, and H. Terraza, "Evaluation on urban solid waste management in latin america and the caribbean - 2010 report," *Inter-American Dev. Bank*, vol. 4, no. 1, pp. 88–100, 2557.
6. Fabiana Meijon Fadul, "Estudios para la revisión del POT Montería-Córdoba," 2019.
7. K. M. Noguera and J. T. Olivero, "Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: Caso Colombiano," *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, vol. 34, no. 132, pp. 347–356, 2010.
8. M. de A. vivienda y desarrollo territorial Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM-, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo -PNUD-, "Módulo de residuos," *Inventar. Nac. Fuentes y Sumideros Gases Ef. Invernadero 2000-2004*, pp. 295–320, 2009.
9. C. G. B. PEREZ, "Biogás: una alternativa energética para los rellenos sanitarios urbanos y un beneficio mitigador de cambio climático," *Univ. Mil. NUEVA GRANADA*, vol. 7, no. 6, p. 14, 2016, [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26849997%0Ahttp://doi.wiley.com/10.1111/jne.12374>.
10. Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: an engineering approach*. Sixth edition. Boston : McGraw-Hill Higher Education, [2008] ©2008, 2008.
11. M. Markets, "La importancia del metano y las actividades de reducción de sus emisiones," *Methane to Mark.*, pp. 1–2, 2015, [Online]. Available: https://www.globalmethane.org/documents/methane_fs_spa.pdf.
12. V. Novotny, "From biogas-to hydrogen – Based integrated urban water, energy and waste solids system - Quest towards decarbonization," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 19, pp. 10508–10530, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.085>.
13. J. Luís Padilha and A. Luiz Amarante Mesquita, "Waste-to-energy effect in municipal solid waste treatment for small cities in Brazil," *Energy Convers. Manag.*, vol. 265, p. 115743, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115743>.
14. T. Moutushi, S. S. Tupsakhare, and M. J. Castaldi, "Abiotic decomposition of municipal solid waste under elevated temperature landfill conditions," *Sci. Total Environ.*, vol. 823, p. 153685, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153685>.

15. M. Regis, "Humans, not machines, create meaning: an interview of Miguel Benasayag by Regis Meyran," *UNESCO Cour.*, vol. 3, no. September, pp. 15–17, 2018.
16. L. Andeobu, S. Wibowo, and S. Grandhi, "Artificial intelligence applications for sustainable solid waste management practices in Australia: A systematic review.," *Sci. Total Environ.*, vol. 834, p. 155389, Aug. 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.155389.
17. T. R. Ayodele, A. S. O. Ogunjuyigbe, and M. A. Alao, "Economic and environmental assessment of electricity generation using biogas from organic fraction of municipal solid waste for the city of Ibadan, Nigeria," *J. Clean. Prod.*, vol. 203, pp. 718–735, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.282>.
18. D. Cudjoe, M. S. Han, and A. P. Nandiwardhana, "Electricity generation using biogas from organic fraction of municipal solid waste generated in provinces of China: Techno-economic and environmental impact analysis," *Fuel Process. Technol.*, vol. 203, p. 106381, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106381>.
19. A. Alexander, C. Burklin, and A. Singleton, "Landfill gas emissions model. United States Environmental Protection Agency, Version 3.02 user's guide.," *U.S. Environ. Prot. Agency Off. Res. Dev.*, no. May, p. 48, 2005, [Online]. Available: <http://www3.epa.gov/ttnecatc1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>.
20. A. Andrade, J. E. Tibaquirá, and A. Restrepo, "Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia," *Entre Cienc. e Ing.*, vol. 12, no. 23, p. 40, 2018, DOI: 10.31908/19098367.3701.
21. S. Garcia-Freites, A. Welfle, A. Lea-Langton, P. Gilbert, and P. Thornley, "The potential of coffee stems gasification to provide bioenergy for coffee farms: a case study in the Colombian coffee sector," *Biomass Convers. Biorefinery*, vol. 10, no. 4, pp. 1137–1152, 2020, DOI: 10.1007/s13399-019-00480-8.
22. A. de Montería, "Actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS) del municipio de montería dando cumplimiento a la resolución 0754 del 25 de noviembre del 2014," 2017.
23. D. D. López Juvinao, L. M. . Torres Ustate, y F. O. Moya Camacho, "Tecnologías, procesos y problemática ambiental en la Minería de arcilla", *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 8, n.º 2, pp. 20–43, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.8.2.385>