

Artículo Original

Calculo de la generación de biogás para el relleno sanitario de la ciudad de Juliaca, utilizando el modelo LandGEM Versión 3.02 de la USEPA y estimación del potencial de producción eléctrica

CALCULATION OF GENERATION OF BIOGAS FOR THE SANITARY FILLING OF JULIACA CITY, USING THE LandGEM MODEL VERSION 3.02 OF THE USEPA AND ESTIMATION OF THE POTENTIAL OF ELECTRIC PRODUCTION

GLEN BRYAN MADRIGAL PÉREZ§, JUAN JOSE QUISPE SAAVEDRA§, YOEL MODESTO VARGAS HUAMAN§*

Recibido: 15 septiembre de 2018 / Aceptado: 07 noviembre de 2018

§EP. Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión, Perú.

Resumen

Los vertederos y rellenos sanitarios constituyen una fuente importante de biogás resultado de la descomposición del proceso biológico de residuos sólidos orgánicos, conformado principalmente por CH₄ y CO₂. Existen modelos matemáticos que permiten estimar la producción de biogás en la fuente final de los residuos sólidos municipales (RSM). Por ello, el objetivo de esta investigación fue estimar la producción de biogás en fuente del relleno sanitario que se construirá para la ciudad de Juliaca considerando los residuos sólidos orgánicos que se encuentran en él, para ello se aplicó el modelo "Landfill Gas Emissions Model" (LandGEM, version 3.02). Según nuestros resultados se podrían generar 1.226.945.217 m³ de biogás con una media de 29.925.493,10 m³ de biogás/año llegando a su producción máxima en el año 2044 con 58.285.801,66 m³ biogás/año. En cuanto a la energía total de cogeneración, se estima que podrían llegar a una capacidad máxima de 284.113 MWh/año en el año 2044, además de que la media de producción es de 145.871 MWh/año de los cuales 82.721 MWh/año corresponden a energía térmica y 63.151 MWh/año a energía eléctrica.

Palabras claves: metano, energía, vertedero, relleno sanitario, residuos

Abstract

Landfills and landfills are an important source of biogas resulting from the decomposition of the biological process of organic solid waste, consisting mainly of CH₄ and CO₂. There are mathematical models that allow estimating the production of biogas in the final source of municipal solid waste (MSW). Therefore, the objective of this research was to estimate the production of biogas at the source of the sanitary landfill that will be built for the Juliaca city with organic solid waste that is in it, for it was applied the model "Landfill Gas Emissions Model" (LandGEM, version 3.02). According to our results, 1,226,945,217 m³ of biogas could be generated with an average of 29,925,493.10 m³ of biogas/year, reaching its maximum production in 2044 with 58,285,801.66 m³ biogas / year. In terms of total cogeneration energy, it is estimated that they could reach a maximum capacity of 284,113 MWh/year in the year 2044, in addition to the average production of 145,871 MWh/year of which 82,721 MWh/year correspond to thermal energy and 63,151 MWh / year to electric power.

Keyword: methane, energy, landfill, landfill, waste

INTRODUCCIÓN

La gran necesidad actual de preservar y mantener el medio ambiente y la urgencia de ser cada día menos dependientes de los combustibles fósiles, nos dirige hacia el objetivo de buscar nuevas alternativas energéticas que sean menos contaminantes el cual sean explotadas produciendo un impacto ambiental mínimo (Pérez, 2006). Este cambio a nuevas fuentes energéticas que sean renovables y sostenibles es motivado por la problemática del cambio climático y principalmente del calentamiento global ocasionado por el uso indiscriminado de los combustibles fósiles (Quintero y Quintero, 2015). Al utilizar combustibles fósiles ocurre un incremento considerable de gases de invernadero (ver tabla 1) y algunos pronósticos establecen que para el año 2100, la temperatura sufrirá un incremento que va de 1.5°C, en un escenario conservador, hasta 4.5 °C en el escenario extremo (Aguirre, Camacho y Solorzano).

Los residuos sólidos municipales experimentan un crecimiento progresivo como consecuencia del aumento poblacional dado a que existe una relación directa entre la generación y caracterización de residuos con la cantidad de habitantes (Jaramillo y Zapata, 2008) producen cantidades significativas de metano (CH₄), dióxido de carbono biogénico (CO₂) y compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM), así como también cantidades pequeñas de óxido nitroso (N₂O), óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono (CO) (IPCC, 2006). El conjunto de todos estos compuestos es el llamado “biogás”, el metano es de suma importancia por sus efectos en la regulación térmica de la tierra, pues posee un poder 21 veces mayor de retención de radiación solar comparado con el dióxido de carbono (Armenta-rivas, Sierra-Camargo y Vélez-Pereira, 2017; Batool y Chuadhry, 2008) y que el metano en los sitios de eliminación de desechos sólidos contribuye aproximadamente un 3 a un 4 por ciento de las emisiones de gases de efecto invernadero antropogénicas mundiales anuales (IPCC, 2006).

En definitiva, el biogás es una mezcla de metano de 40 a 70 %, dióxido de carbono y otros gases (hidrogeno, sulfuros, etc.) generado por la acción de microorganismos especializados para descomponer la materia orgánica dentro del relleno sanitario. La cantidad de biogás producido en los lugares de disposición final, es función de la cantidad de residuos el tipo y edad, contenido de humedad, la temperatura y las prácticas de manejo (Martínez y Rodríguez, 2016).

La estimación de las emisiones de biogás en los sitios de disposición final ha sido analizada por diversos investigadores, principalmente para conocer su potencial como fuente renovable de energía y mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (Aguilar, Ojeda, Taboada y Quintero, 2012). Como resultado de estas investigaciones se han generado diversos modelos para estimar y/o predecir la generación de biogás, tales como; el modelo de la EPA modelo de degradación de primer orden, modelo LandGEM, método IPCC y el modelo mexicano de Biogás.

Es ampliamente reconocido que el biogás es una fuente potencialmente significativa de energía (Aguilar, Taboada y Ojeda, 2011), así mismo, muchas veces se encuentran en las plantas que generan energía eléctrica a partir del biogás es una buena solución ya que es muy eficiente, similar a la de las plantas térmicas a gas que se utilizan en la actualidad (Panesso, Cadena, Mora y Ordoñez, 2011).

Por tanto, en nuestro se estima la generación de biogás del relleno sanitario proyectado para la ciudad de Juliaca-San Roman - Puno, para ello se utilizará el modelo matemático “Landfill Gas Emissions Model” (LandGEM, versión 3.02). Además, se calcula la producción de energía eléctrica teniendo en cuenta su potencial.

En un relleno sanitario o en su defecto en un botadero, el agua y los residuos son principalmente los insumos, mientras que el lixiviado y el gas son el producto de la descomposición de todos los desechos (Machado, Carvalho, Gourc, Vilar y Nascimento, 2009). El biogás producido en un relleno sanitario está constituido por un conjunto de gases resultado de la descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos en condiciones anaeróbicas (fermentación en ausencia de oxígeno) (Pérez, 2006; Aguilar, Taboada, y Ojeda, 2011). Si este gas no se aprovecha puede ser una fuente muy importante de generación de gases de efecto invernadero y en consecuencia uno de los principales responsables del cambio climático.

El metano, por su alto contenido energético puede ser capturado y utilizado para la generación de energía eléctrica o combustible para el transporte. El uso de este recurso para generar calor y electricidad es cada vez más usado en los países desarrollados (Córdoba, Santalla, y Blanco, 2009), especialmente en el continente Europeo. El que se hayan desarrollado varias aplicaciones en el área de la combustión, calefacción, iluminación y motores que accionan generadores eléctricos es debido a que el biogás tiene un poder calorífico aproximado de 4.700 a 5.500 kcal/m³ (Valladares y Villegas, 2013).

MATERIALES Y MÉTODOS

LUGAR DE ESTUDIO

La investigación se realizó en la ciudad de Juliaca ubicada en la provincia de San Román en el departamento de Puno, en sureste de Perú. Esta ciudad se encuentra a una altitud de 3824 m.s.n.m. ocupa parte de la meseta altiplánica de Toropampa, en la cuenca del río Coata, sección Ayabaca, desarrollándose entre los cerros Zapatiana, de la Cruz y Huaynaroque. Se encuentra asimismo atravesada de este a oeste por el río Torococha, que desemboca en el río Coata y continua su curso hasta desembocar en el lago Titicaca. Juliaca cuenta con una población de 225.146 habitantes (2007).

Actualmente el botadero de Chilla se ubica en las coordenadas mostradas en la tabla 1 y próximamente se construirá un relleno sanitario en el mismo lugar, en este sentido la estimación de la generación de biogás será proyectado para el tiempo de vida del relleno sanitario que son 25 años, que se prevé que empezará a funcionar en el 2018, en caso de que no empiece a funcionar el relleno sanitario no afectan los cálculos, simplemente se desplazan los años, de acuerdo a la fecha de operación del relleno sanitario (siempre tener en cuenta que los datos hallados en el presente artículo son referenciales).

La estimación de biogás generado se llevó a cabo siguiendo dos puntos: se realizó una investigación sobre las cantidades y características de los residuos y se siguieron los lineamientos propuestos en el modelo matemático “Landfill Gas Emissions Model” (LandGEM, versión 3.02).

Tabla 1. Coordenadas de ubicación del botadero Chilla

Puntos	Coordenadas UTM “Zona 19”	
	Este X	Norte Y
Punto 1	381566	1713688
Punto 2	381563	1713959
Punto 3	381860	1713970
Punto 4	381865	1713806

CONSIDERACIONES TÉCNICAS

Cantidad y composición de residuos en el relleno

La información de las cantidades, composición de los residuos sólidos generados en la ciudad de Juliaca provienen del informe presentado por la municipalidad provincial de San Román en su PIGARS. El estudio de caracterización de los residuos sólidos se realizó en el año 2015. En este sentido, la generación per-cápita total de los residuos sólidos municipales en el distrito de Juliaca (Área urbana) es de: 0,72 kg/hab/dí y 198,26 t/día (Tabla 2).

Tabla 2. Generación per-cápita y cantidad de residuos sólidos municipales en Juliaca

tipo	Generación	Población	Generación total kg/día	Generación total t/día	Generación total t/año
GPC de RS municipales (kg/hab/día)	0,72	275.361	198.259,92	198,26	71.897,79

Estimación de la generación de residuos sólidos municipales. En tal sentido a continuación se presenta la proyección de la generación total de residuos sólidos municipales al 2043 como fecha estipulada con el fin de alimentar el modelo.

Tabla 1. Proyección de la generación de residuos sólidos municipales en la ciudad de Juliaca

Generación Per cápita de RSM	=	0.72	kg/hab/día			
Tasa de crecimiento poblacional	=	3.04	%			
tasa de crecimiento de RSM	=	3.04	%			
población del ámbito de estudio (2015)	=	275361	hab.			
Nro	AÑO	Población	GPC kg/hab/día	Generación de RSM Ton/día	Generación RSM Ton/mes	Generación RSM Ton/año
0	2015	275.361	0,72	198,26	5.947,80	72.364,87
1	2016	283.732	0,742	210,50	6.314,92	76.831,53
2	2017	292.357	0,764	223,49	6.704,70	8.1573,89
3	2018	301.245	0,788	237,28	7.118,55	86.608,97
4	2019	310.403	0,812	251,93	7.557,93	91.954,84
5	2020	319.839	0,836	267,48	8.024,44	97.630,67
6	2021	329.562	0,862	283,99	8.519,74	103.656,85
7	2022	339.581	0,888	301,52	9.045,61	110.054,98
8	2023	349.904	0,915	320,13	9.603,95	116.848,03
9	2024	360.541	0,943	339,89	10.196,74	124.060,38
10	2025	371.502	0,971	360,87	10.826,13	131.717,90
11	2026	382.795	1,001	383,15	11.494,36	139.848,07
12	2027	394.432	1,031	406,79	12.203,84	148.480,08
13	2028	406.423	1,063	431,90	12.957,11	157.644,89

14	2029	418.778	1,095	458,56	13.756,88	167.375,39
<i>Continuación de tabla</i>						
15	2030	431.509	1,128	486,87	14.606,01	177.706,49
16	2031	444.627	1,163	516,92	15.507,56	188.675,27
17	2032	458.144	1,198	548,82	16.464,75	200.321,10
18	2033	472.071	1,234	582,70	17.481,02	212.685,75
19	2034	486.422	1,272	618,67	18.560,02	225.813,60
20	2035	501.21	1,311	656,85	19.705,62	239.751,75
21	2036	516.446	1,350	697,40	20.921,94	254.550,23
22	2037	532.146	1,391	740,44	22.213,33	270.262,13
23	2038	548.324	1,434	786,15	23.584,42	286.943,83
24	2039	564.993	1,477	834,67	25.040,15	304.655,20
25	2040	582.168	1,522	886,19	26.585,74	323.459,78
26	2041	599.866	1,569	940,89	28.226,72	343.425,07
27	2042	618.102	1,616	998,97	29.968,99	364.622,69
28	2043	636.893	1,665	1060,63	31.818,80	387.128,72

También es importante el conocer la composición de los residuos sólidos municipales que en el caso de la ciudad de Juliaca (Figura 1).

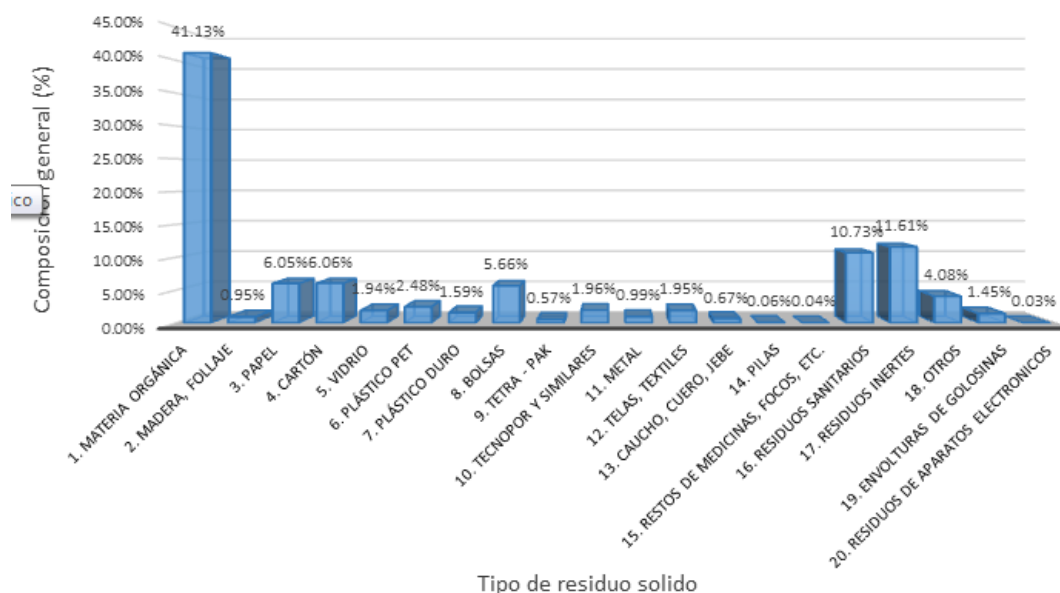


Figura 1. Composición de Residuos Sólidos Municipales generados en la ciudad de Juliaca

Como se puede ver en la figura precedente, la composición de materia orgánica es del 41 % y si consideramos la composición de madera, follaje, papel y cartón (que también son considerados materiales orgánicos) el porcentaje total de material orgánico es de 54.19% un poco más de la mitad del total de residuos sólidos que se produce en la ciudad de Juliaca. Esta composición de materia orgánica es común en muchas partes del mundo.

Estimación de la generación de biogás por el modelo matemático "Landfill Gas Emissions Model" (LandGEM, version 3.02).

La estimación del biogás emitido desde sitios de disposición final de residuos sólidos es uno de los objetivos previstos en el protocolo de Kioto; de hecho, resulta fundamental evaluar la contribución de los rellenos sanitarios, botaderos y plantas de compostaje a lo largo del tiempo por la producción de biogás, así como establecer medidas que puedan

adoptarse para la reducción de los gases emitidos (Pignato, Aronica, Bonanno, Piazza, & Trapani, 2008)

Para la cuantificación del biogás se aplicará el modelo matemático “Landfill Gas Emissions Model” (landGEM) versión 3.02. las particularidades de aplicación para el modelo se describen a continuación.

Modelo landGEM version 3.02

El modelo Landfill Gas Emission Model (LandGEM) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), se utiliza para estimar las emisiones de sitios de disposición de residuos sólidos municipales, como también es una herramienta de estimación automatizada, encuadrada en el programa de cálculo “Microsoft Excel”. Las emisiones estimadas producidas en un vertedero son tanto el biogás, como de cada uno de los gases componentes del mismo como el metano, el dióxido de carbono, los componentes orgánicos que no sean metano y otros tipos de contaminantes atmosféricos que se podrían producir en el mismo.

LandGEM es uno de los modelos que se basa en una ecuación de descomposición con cinética de primer orden para estimar la generación de biogás con el tiempo. La ecuación se expresa así:

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

Donde,

- Q_{CH_4} = generación anual de metano en el año de cálculo ($m^3/año$)
- i = incremento de 1 año
- n = (año de cálculo)-(año de inicio de disposición de residuos)
- j = incrementos de 0,1 año
- k = tasa de generación de metano ($año^{-1}$)
- L_0 = potencial de generación de metano (m^3/Mg)
- M_i = cantidad de residuos aceptados en el año “i”
- t_{ij} = edad de la sección “j” de residuos “Mi” aceptados en el año “i”

El modelo utiliza dos tipos de factores de emisión por defecto para la k (constante de generación de biogás) y la L_0 (potencial de generación de biogás). La primera está influida por la temperatura, humedad, disponibilidad de nutrientes y el pH y la segunda por el tipo y la composición de los RSM. Los valores por defecto son los de la CAA (Clean Air ACT) basados en normativa de EEUU y los de inventario.

Los valores de la constante de degradación y el potencial de generación de metano se han elegido según los valores por defecto que proporciona el modelo, los valores de k y L_0 se pueden observar en la tabla 4.

Tabla 2. Parámetros para k y L_0 para rellenos convencionales, modelo EPA

Parámetros del modelo	Valor
k	0,050 por año
L_0	170 m^3/ton

Fuente: EPA. Landfill Gas Emissions Model. 2006

Los datos que requiere el LandGEM para estimar las emisiones que se van a producir en un vertedero de RSM, son básicamente el año de apertura, el de clausura y la cantidad anual de RSM depositados, así como los parámetros k y L_0 por defecto o calculándolas con los datos característicos de cada instalación y los gases contaminantes que se desee estimar.

Estimación del potencial de producción eléctrica

Para estimar la producción eléctrica se considerará la utilización de una planta de cogeneración, esto debido a que la utilización de la cogeneración en el sector ambientalista se ha situado en los vertederos y en las estaciones depuradoras de aguas residuales (Pérez, 2006) en función a la experiencia acumulada en diferentes países. Para evaluar la energía cogenerada a partir del biogás se tomará en consideración el motor de combustión interna (Chamy & Vivanco, 2007), ya que representa las mejores condiciones para las necesidades energéticas que nos interesan, tanto en potencia, tamaño e inversión.

Un parámetro característico importante en las centrales eléctricas de cogeneración, en nuestro caso particular de biogás, es el rendimiento, tanto el rendimiento de energía térmica y de energía eléctrica, así como también los rendimientos de los equipos de recuperación de calor de los equipos de transferencia de calor que captan la energía disipada del motor en forma de calor (Chamy & Vivanco, 2007).

El biogás puede ser utilizado como una fuente potencial de energía debido a su alto poder calorífico, para efectos de cálculo, el valor del poder calorífico será el que menciona Camargo y Vélez (2009), Eurostat y la Agencia Internacional de la Energía (AIE) como 20 MJ/m^3 . Es así como el biogás puede utilizarse de forma directa como energía térmica o generando energía eléctrica.

En resumen, para determinar la producción de energía por medio de una planta de cogeneración usando biogás se requiere el poder calorífico del biogás, el rendimiento de energía eléctrica y de energía térmica, así como también los rendimientos de los equipos de recuperación de calor de los equipos de transferencia de calor.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los siguientes apartados se muestran los resultados de las proyecciones de generación de biogás en el relleno sanitario proyectado así como también el potencial de producción eléctrica en una planta de cogeneración. En cuanto a la proyección (como se mencionó con anterioridad) se utilizó el "Landfill Gas Emissions Model" (LandGEM) que es una herramienta de estimación automatizada, encuadrada en el programa de cálculo Microsoft Excel".

Es muy importante considerar que en este estudio, para estimar el potencial energético se supondrá un mínimo de 15 años después del cierre del relleno sanitario, tiempo esperado para concentrar un alto volumen de biogás y la estabilización del CH_4 . Esto quiere decir que para realizar los cálculos de biogás y especialmente del potencial eléctrico producido se tomarán datos desde el año 2018 al año 2058.

Estimación del biogás producido

Para calcular el potencial de producción de biogás en el relleno sanitario de Juliaca, se utilizó el modelo LandGEM, con los siguientes datos: Cantidad de RSM depositados (ver tabla 4), año de apertura del relleno: 2018, año de clausura: 2043, contenido de metano 50%, $k = 0,05 \text{ año}^{-1}$ y $L_0 = 170 \text{ m}^3_{\text{CH}_4}/\text{megagramos}$.

En base a los supuestos citados y a la cantidad de RSM depositados, se logró determinar el volumen generado de biogás, CH_4 , CO_2 y NMOC. Los valores respectivos se encuentran tabulados a continuación.

Tabla 3. Volumen generado de biogás, CH_4 , CO_2 y NMOC

Año	Total Landfill gas ($\text{m}^3/\text{año}$)	Metano ($\text{m}^3/\text{año}$)	Dióxido de carbono ($\text{m}^3/\text{año}$)	NMOC ($\text{m}^3/\text{año}$)
2018	0,00	0,00	0,00	0,00
2019	1.439.742,99	719.871,49	719.871,49	5.758,97
2020	2.898.135,81	1.449.067,91	1.449.067,91	11.592,54
2021	4.379.754,14	2.189.877,07	2.189.877,07	17.519,02
2022	5.889.289,06	2.944.644,53	2.944.644,53	23.557,16
2023	7.431.562,34	3.715.781,17	3.715.781,17	29.726,25
2024	9.011.542,25	4.505.771,12	4.505.771,12	36.046,17
2025	10.634.359,96	5.317.179,98	5.317.179,98	42.537,44
2026	12.305.326,64	6.152.663,32	6.152.663,32	49.221,31
2027	14.029.951,17	7.014.975,59	7.014.975,59	56.119,80
2028	15.813.958,79	7.906.979,39	7.906.979,39	63.255,84
2029	17.663.310,37	8.831.655,19	8.831.655,19	70.653,24
2030	19.584.222,81	9.792.111,41	9.792.111,41	78.336,89
2031	21.583.190,22	10.791.595,11	10.791.595,11	86.332,76
2032	23.667.006,25	11.833.503,13	11.833.503,13	94.668,03
2033	25.842.787,54	12.921.393,77	12.921.393,77	103.371,15
2034	28.117.998,33	14.058.999,17	14.058.999,17	112.471,99
2035	30.500.476,38	15.250.238,19	15.250.238,19	122.001,91
2036	32.998.460,32	16.499.230,16	16.499.230,16	131.993,84
2037	35.620.618,38	17.810.309,19	17.810.309,19	142.482,47
2038	38.376.078,81	19.188.039,40	19.188.039,40	153.504,32
2039	41.274.461,88	20.637.230,94	20.637.230,94	165.097,85
2040	44.325.913,79	22.162.956,90	22.162.956,90	177.303,66
2041	47.541.142,40	23.770.571,20	23.770.571,20	190.164,57
2042	50.931.455,05	25.465.727,52	25.465.727,52	203.725,8202
2043	54.508.798,58	27.254.399,29	27.254.399,29	218.035,1943
2044	58.285.801,66	29.142.900,83	29.142.900,83	233.143,2066
2045	55443169,57	27.721.584,78	27.721.584,78	221.772,6783
2046	52739174,28	26.369.587,14	26.369.587,14	210.956,6971
2047	50167054,4	25.083.527,2	25.083.527,2	200.668,2176
2048	47720378,28	23.860.189,14	23.860.189,14	190.881,5131
2049	45393027,97	22.696.513,99	22.696.513,99	181.572,1119
2050	43179183,88	21.589.591,94	21.589.591,94	172.716,7355
2051	41073310,23	20.536.655,11	20.536.655,11	164.293,2409
2052	39070141,25	19.535.070,63	19.535.070,63	156.280,565
2053	37164667,98	18.582.333,99	18.582.333,99	148.658,6719
2054	35352125,73	17.676.062,87	17.676.062,87	141.408,5029
2055	33627982,21	16.813.991,11	16.813.991,11	134.511,9289
2056	31987926,17	15.993.963,08	15.993.963,08	127.951,7047
2057	30427856,6	15.213.928,3	15.213.928,3	121.711,4264
2058	28943872,52	14.471.936,26	14.471.936,26	115.775,4901
TOTAL	1226945217,00	613.472.608,50	613.472.608,50	4.907.780,87

En la Figura 2 se muestra las curvas de generación de biogás, CH₄, CO₂ y NMOC en metros cúbicos por año y megagramos por año.

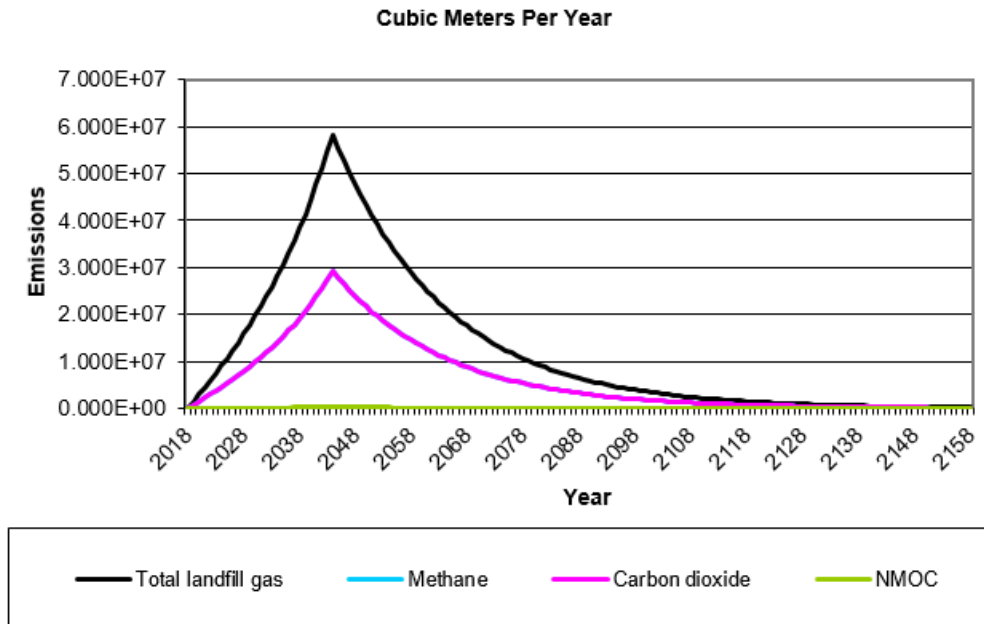


Figura 1. Variación de biogás estimado por el modelo en m³/año

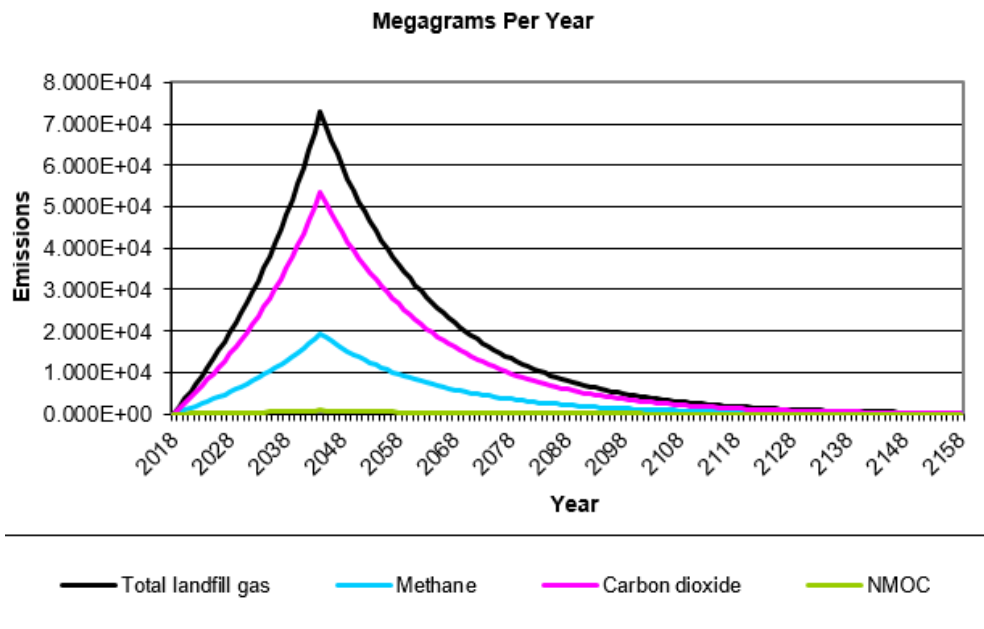


Figura 2. Variación de biogás estimado por el modelo en Mg/año

Los resultados que arroja el programa comprende el periodo de 2018 hasta el año 2158, periodo en el cual se producirá biogás. Es de aclarar que los datos de estudio planteado asumen un inicio en el año 2018, con una productividad proyectada hasta el año 2043.

Según este modelo, y considerando una composición media del biogás de 50 % de CH₄ y 50 % de CO₂, y que comience la captura de biogás en el 2018 según los valores de k y L₀ descritos el potencial de recuperación de biogás estimado llegara a su punto más alto un año después del año de clausura, es decir, en el año 2044 con 58.285.801,66 m³/año. Posteriormente disminuirá, año tras año. Esto se presenta porque el modelo asume que la generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o al año siguiente, y la generación de biogás desciende exponencialmente en la medida en que la fracción orgánica de los residuos es consumida (SCS Engineers, 2009).

El promedio de biogás generado para los años de 2018 a 2058 corresponde a 29.925.493,1 m³/año, es una cantidad importante considerando el aprovechamiento energético que se le puede dar.

Cálculo de la energía cogenerada a partir de biogás

Se calculará la energía generada para los años 2018 al 2058. Para efectos de cálculo se considera la cantidad anual de biogás generado a partir de los RSM y un poder calorífico de 20 MJ/m³ = 4775 kcal/m³ de biogás (1000 kcal = 1,163 kWh).

A continuación, para ilustrar el procedimiento seguido se mostrará como ejemplo la secuencia de cálculo utilizada para calcular la energía generada a partir de los RSM, como dato se utilizará la producción pico o máxima de biogás que es de 58.285.801,66 m³/año.

Energía térmica recuperada de los gases del motor de combustión

De los 58.285.801,66 m³/año. de biogás, la energía disponible disipada en los gases de combustión es de un 31.8% de la energía aportada por el combustible, la que a su vez pasara por la caldera de recuperación que tiene un rendimiento del 65% entonces:

$$E_{disponible} = 58.285.801,66 \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{año}} \cdot 4.775 \frac{kcal}{m^3} \cdot 0,318 \cdot 0,65 = 5,75 \cdot 10^{10} \frac{kcal}{\text{año}}$$

$$5,75 \cdot 10^{10} \frac{kcal}{\text{año}} = 66.873 \frac{MWh}{\text{año}}$$

$$E_{disponible} = 66.905 \frac{MWh}{\text{año}}$$

Agua de enfriamiento

De los 58.285.801,66 m³/año. de biogás, la energía disponible en el agua de alta temperatura (90 a 99°C) es de un 19,7% que pasara por un intercambiador de calor de un rendimiento del 98%, entonces:

$$E_{disponible} = 58.285.801,66 \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{año}} \cdot 4.775 \frac{kcal}{m^3} \cdot 0,197 \cdot 0,98 = 62.490 \frac{MWh}{\text{año}}$$

$$E_{disponible} = 62.490 \frac{MWh}{\text{año}}$$

De los 58.285.801,66 m³/año de biogás, la energía disponible en el agua de baja temperatura, inferior a 50°C es de un 10% que también pasara por un intercambiador de

calor de rendimiento del 98% entonces:

$$E_{disponible} = 58.285.801,66 \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{año}} \cdot 4.775 \frac{kcal}{m^3} \cdot 0,1 \cdot 0,98 = 31.721 \frac{MWh}{\text{año}}$$

$$E_{disponible} = 31.721 \frac{MWh}{\text{año}}$$

Esta energía de baja temperatura se intentará utilizarla para calentar los reactores de producción de biogás que deben estar a unos 35°C. la energía térmica total cogenerada a partir de los sistemas de enfriamiento, será la suma de ambos sistemas tanto de baja como de alta temperatura.

$$E_{disponible} = 62.490 + 31.721 = 94.211 \frac{MWh}{\text{año}}$$

La energía térmica total cogenerada será la suma de la energía de gases y la energía de agua de enfriamiento de alta temperatura.

$$E_{disponible} = 66.905 + 62.490 + 31.721 = 161.115 \frac{MWh}{\text{año}}$$

Energía eléctrica recuperada a partir del biogás

La energía eléctrica recuperada del biogás corresponde a un 38% de esta, por tanto:

$$E_{disponible} = 58.285.801,66 \frac{m^3 \text{ biogas}}{\text{año}} \cdot 4.775 \frac{kcal}{m^3} \cdot 0,38 = 122.998 \frac{MWh}{\text{año}}$$

$$E_{disponible} = 122.998 \frac{MWh}{\text{año}}$$

De acuerdo a los valores mostrados, la energía generada a partir de biogás en el año de mayor producción (2044) en este caso es de 122.998 MWh/año. Finalmente, la energía total cogenerada a partir de biogás correspondiente a los residuos sólidos municipales es de 284.113 MWh/año (122.998 MWh/año como energía eléctrica y 161.115 MWh/año como energía térmica).

En la siguiente Tabla 6 y Figura 4 se detallan la energía cogenerada a partir de biogás en MWh/año, según los m³ de biogás calculados.

Tabla 4. Cantidad de energía producida por el proceso de cogeneración

Año	Total Landfill gas (m3/año)	Energía térmica (MWh/año)	Energía eléctrica (MWh/año)	Energía total de cogeneración (MWh/año)
2018	0,00	0	0	0
2019	1.439.742,99	3.980	3.038	7.018
2020	2.898.135,81	8.011	6.116	14.127
2021	4.379.754,14	12.107	9.242	21.349
2022	5.889.289,06	16.279	12.428	28.707
2023	7.431.562,34	20.542	15.683	36.225
2024	9.011.542,25	24.910	19.017	43.927
2025	10.634.359,96	29.396	22.441	51.837
2026	12.305.326,64	34.015	25.967	59.982
2027	14.029.951,17	38.782	29.607	68.389
2028	15.813.958,79	43.713	33.372	77.085
2029	17.663.310,37	48.825	37.274	86.100
2030	19.584.222,81	54.135	41.328	95.463
2031	21.583.190,22	59.661	45.546	105.207
2032	23.667.006,25	65.421	49.944	115.365
2033	25.842.787,54	71.435	54.535	125.970
2034	28.117.998,33	77.724	59.336	137.061
2035	30.500.476,38	84.310	64.364	148.674
2036	32.998.460,32	91.215	69.635	160.851
2037	35.620.618,38	98.463	75.169	173.632
2038	38.376.078,81	106.080	80.984	187.064
2039	41.274.461,88	114.092	87.100	201.192
2040	44.325.913,79	122.527	93.539	216.066
2041	47.541.142,40	131.414	100.324	231.739
2042	50.931.455,05	140.786	107.479	248.265
2043	54.508.798,58	150.674	115.028	265.702
2044	58.285.801,66	161.115	122.998	284.113
2045	55.443.169,57	153.257	117.000	270.257
2046	52.739.174,28	145.783	111.294	257.076
2047	50.167.054,4	138.673	105.866	244.539
2048	47.720.378,28	131.910	100.703	232.612
2049	45.393.027,97	125.476	95.791	221.268
2050	43.179.183,88	119.357	91.119	210.476
2051	41.073.310,23	113.536	86.676	200.211
<i>Continuación de la Tabla 6</i>				
2052	39.070.141,25	107.999	82.448	190.447
2053	37.164.667,98	102.731	78.427	181.159
2054	35.352.125,73	97.721	74.602	172.323
2055	33.627.982,21	92.955	70.964	163.919
2056	31.987.926,17	88.422	67.503	155.925
2057	30.427.856,6	84.109	64.211	148.320
2058	28.943.872,52	80.007	61.079	141.087
TOTAL	1.226.945.217,00	3.391.550	2.589.178	5.980.728
Promedio	29.925.493,10	82.721	63.151	145.871

En la figura 4 se observa la capacidad de generación de la central de cogeneración, obteniendo una capacidad máxima de generación de energía eléctrica de 122.998 MWh/año y de generación térmica de 161.115 MWh/año en el 2044, luego de esta capacidad la generación de energía empieza a descender hasta llegar a una capacidad de generación de energía eléctrica y térmica de 61.079 MWh/año y 80.007 MWh/año respectivamente. Cabe notar que la generación de energía eléctrica y térmica está muy relacionada con la producción de biogás.

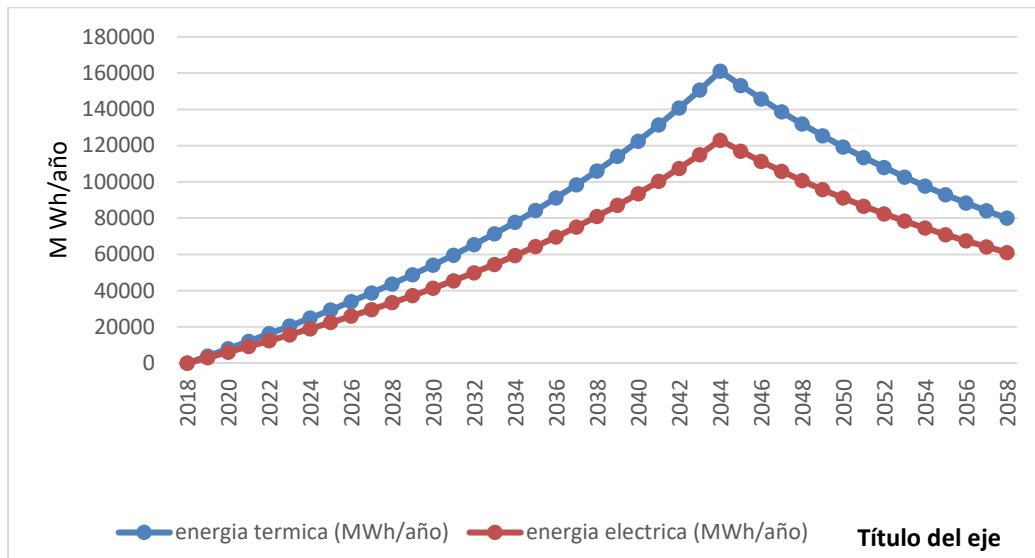


Figura 3. Energía cogenerada a partir de biogás y su variación temporal

Además, el total de la energía producida a partir del biogás del relleno sanitario de Juliaca desde el año 2018 hasta el año 2058 es de 5.980.728 MWh (3.391.550 MWh correspondientes a energía térmica y 2.589.178 MWh a energía eléctrica), con un promedio de 145871 MWh/año de los cuales el promedio de energía térmica y eléctrica son 82.721 MWh/año y 63.151 MWh/año respectivamente.

A partir de la información obtenida, se puede tener una visión general de la cantidad de biogás que puede producir el futuro relleno sanitario y el potencial que tiene para su aprovechamiento energético.

CONCLUSIONES

La estimación del biogás por medio del modelo matemático LandGEM resulto ser de mucha ayuda para poder calcular la cantidad de biogás que se puede producir en el relleno sanitario que se prevé se construirá en la ciudad de Juliaca.

Los resultados que arroja el programa comprende el periodo de 2018 hasta el año 2158, periodo en el cual se producirá biogás Según este modelo, y considerando una composición media del biogás de 50 % de CH₄ y 50 % de CO₂, y que comience la captura de biogás en el 2018 según los valores de k y L₀ descritos, el potencial de recuperación de biogás estimado llegara a su punto más alto un año después del año de clausura, es decir, en el año 2044 con 58.285.801,66 m³/año. Posteriormente disminuirá, año tras año. El promedio de biogás generado para los años de 2018 a 2058 corresponde a 29.925.493,1 m³/año.

La capacidad máxima de generación de la central de cogeneración, para la energía eléctrica es de 122.998 MWh/año y de generación térmica de 161.115 MWh/año en el 2044, luego de esta capacidad la generación, la energía empieza a descender hasta llegar a una capacidad de generación de energía eléctrica y térmica de 61.079 MWh/año y 80.007

MWh/año respectivamente. Además, el total de la energía producida a partir del biogás del relleno sanitario de Juliaca desde el año 2018 hasta el año 2058 es de 5.980.728 MWh (3.391.550 MWh correspondientes a energía térmica y 2.589.178 MWh a energía eléctrica), con un promedio de 145.871 MWh/año de los cuales el promedio de energía térmica y eléctrica son 82.721 MWh/año y 63.151 MWh/año respectivamente.

Referencias

- Aguilar, Q., Ojeda, S., Taboada, P., y Quintero, M. (2012). Estimación de las constantes k y Lo de la tasa de generación de biogás en sitios de disposición final en baja California, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 43-49.
- Aguilar, Q., Taboada, P., y Ojeda, S. (2011). Potencial de producción eléctrica del biogás generado en un relleno sanitario. *Ingeniería e Investigación*, 56-65.
- Aguirre, R., Camacho, I., y Solorzano, G. (s.f.). Metodología para la determinación de la emisión de gases invernadero de sitios de disposición final de residuos sólidos municipales. *ABES Asociación Brasileña de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*.
- Armenta-rivas, M., Sierra-Camargo, L., y Vélez-Pereira, A. (2017). Modelación de la producción de metano en el Relleno Sanitario Parque Ambiental Palangana. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 183-192.
- Batool, S., y Chuadhry, M. (2008). el impacto de los métodos de tratamiento de los residuos sólidos municipales en las emisiones de gases de invernadero en Lahore, Pakistan. *Waste Management*, 63-69.
- Camargo, Y., y Vélez, A. (2009). Emisiones de biogás producidas en rellenos sanitarios. *REDISA*.
- Chamy, R., y Vivanco, E. (2007). *Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás*. Santiago de Chile: Proyecto de energías renovables no convencionales en Chile (CNE/GTZ).
- Córdoba, V., Santalla, E., y Blanco, G. (2009). Modelado de la generación de biogás en rellenos sanitarios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*.
- IPCC. (2006). *2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Japon: IGES.
- Jaramillo, G., y Zapata, L. (2008). *Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia*. Antioquia: Universidad de Antioquia.
- Machado, S., Carvalho, M., Gourc, J., Vilar, O., y Nascimento, J. (2009). Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. *Waste Management*, 153-161.
- Martínez, E., y Rodríguez, J. (2016). Aplicación de las metodologías EPA, mexicano e IPCC para la estimación de biogás, caso de estudio relleno sanitario Doña Juana, Bogotá. *Universidad y Salud*, 338-344.
- Panesso, A., Cadena, J., Mora, J., y Ordoñez, M. (2011). Análisis del biogás captado en un relleno sanitario como combustible primario para la generación de energía eléctrica. *Scientia et Technica*, 23-28.
- Pérez, M. (2006). *producción de energía eléctrica a partir de biogás procedente de vertederos de residuos sólidos urbanos*. Guatemala: Universidad de San Carlos.
- Pignato, T., Aronica, S., Bonanno, A., Piazza, V., y Trapani, S. (2008). estimación del biogás producido en el vertedero de Palermo, aplicando un modelo Gaussian. *Waste Management*, 233-239.
- Quintero, G., y Quintero, L. (2015). Perspectivas del potencial energético de la biomasa en el marco global y latinoamericano. *Gestión y Ambiente*, 179-188.
- SCS Engineers. (2009). *Manual de usuario Modelo Mexicano de Biogás Version 2.0*. Obtenido de http://www.epa.gov/lmop/int/user_manual_mexico_lfg_model_v2_2009.pdf
- Valladares, E., y Villegas, M. (2013). *Potencial energético del biogás generado por los residuos Sólidos domiciliarios (RSD) en la provincia de Concepción*. Concepción - Chile: Universidad del Bío - Bío.