

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

DECANATO DE POSGRADO



**MAESTRÍA DE INGENIERÍA AMBIENTAL, MENCIÓN
SANEAMIENTO AMBIENTAL**

**PROYECTO DE TITULACIÓN CON COMPONENTES DE
INVESTIGACIÓN Y/O DESARROLLO, PREVIO A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA AMBIENTAL, MENCIÓN SANEAMIENTO
AMBIENTAL.**

Título:

**Cálculo de generación de biogás del relleno sanitario mediante el
Modelo LANDGEM versión 3.02 para el aprovechamiento sostenible
del cantón Pastaza.**

Autor:

Laura Esthela Cruz Samaniego

Director:

Ing. Edison Roberto Suntasig Negrete MSc.

Puyo - Pastaza - Ecuador

2022

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradecer a Dios por sus bendiciones, sabiduría y por la finalización de un logro más en mi vida.

A la Unidad de Posgrado de la Universidad Estatal Amazónica que me ha brindado el fortalecimiento de nuevos conocimientos, a los docentes que impartieron positivamente su aprendizaje.

A mis padres, hermanos (a) y esposo que siempre me acompañaron y apoyaron en esta etapa importante de cursar esta meta de estudio y me impulsaron a seguir a delante.

Al director del proyecto Ing. Edison Suntasig MSc que tuvo el tiempo y dedicación en orientarme en la culminación exitosa de este trabajo final.

Y finalmente a todos mil gracias.

Laura Esthela Cruz Samaniego

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado primeramente a Dios por brindarme salud y comprensión para desarrollar este trabajo final.

A mis padres: Livia Samaniego y Wilson Cruz por ser el pilar fundamental, y guiarme en cada camino que doy este éxito es para ellos.

A mis hermanos (a) por darme ánimos y fortaleza en cada proyecto de mi vida.

A mi esposo Henry Duran que me apoyado incondicionalmente para finalizar esta meta lograda.

A la Ing. Nelly Duran MSc que me oriento para la culminación de este trabajo.

A mi hija Mikaela Duran que es el pilar fundamental para lograr este sueño y muchos más.

Y finalmente a cada uno de mi familia y amigos que me apoyaron con sus ánimos.

Laura Esthela Cruz Samaniego

RESUMEN EJECUTIVO

Los rellenos sanitarios son una importante fuente de biogás debido al poder calorífico que generan los elementos que lo componen. El objetivo de esta investigación es calcular la producción de biogás que se genera en el relleno sanitario del cantón Pastaza. Se seleccionó la cantidad y se caracterizó los residuos sólidos municipales utilizando la información del plan de manejo integral de residuos y residuos no peligrosos municipales del gobierno autónomo descentralizado del cantón Pastaza, provincia de Pastaza en el año 2021. Una vez caracterizados y seleccionados los datos, se pudo proceder al cálculo de los parámetros de k y L_0 , para determinar el volumen de biogás que se aprovechó según el modelo matemático LandGEM, para determinar el potencial de generación de electricidad se tomó como base la fracción metano. Los resultados de la selección para el modelo determinaron un total de 42,50 ton/día, la población 64.633 habitantes, GPC 0,65 kg/habitante/día, la tasa de crecimiento poblacional 3,40%, la composición de los residuos es: materia orgánica aprovechable 46,1%, papel 4,6 %, cartón 1,8 %, textil 1 % y material no aprovechable que se dividió en alimentos 16,8 %, dando una composición total de 70,3 %. el cálculo de biogás de los 30 años de vida útil del relleno sanitario del cantón, dando una producción total de $4,99E+10$ m³/año y el potencial de generación de energía eléctrica con un total de 51.797.813,88 MWh, estos valores son importantes para el aprovechamiento.

Palabras claves: Biogás, Generación, Producción, Poder calorífico, Composición de los residuos sólidos.

ABBSTRACT

Sanitary landfills are an important source of biogas due to the calorific power generated by the elements that compose it. The objective of this research is to calculate the production of biogas that is generated in the landfill of the Pastaza canton. The amount was selected and the municipal solid waste was characterized using the information from the municipal comprehensive waste and non-hazardous waste management plan of the decentralized autonomous government of the Pastaza canton, Pastaza province in the year 2021. Once the data was characterized and selected, it was possible to proceed with the calculation of the parameters of K and L0, to determine the volume of biogas that was used according to the LandGEM mathematical model, to determine the potential for electricity generation was based on the methane fraction. The results of the selection for the model determined a total of 42.50 ton/day, the population 64,633 inhabitants, GPC 0.65 kg/inhabitant/day, the population growth rate 3.40%, the composition of the waste is: usable organic material 46.1%, paper 4.6%, cardboard 1.8%, textile 1% and non- usable material that was divided into food 16.8%, giving a total composition of 70.3 %. the calculation of biogas of the 30 years of useful life of the sanitary landfill of the canton, giving a total production of 4.99E+10 m³/year and the potential for electricity generation with a total of 51,797,813.88 MWh, these values are important for use.

Keywords: Biogas, Generation, Production, Calorific value, Composition of solid waste.

ÍNDICE

Capítulo I.....	1
Introducción.....	1
Justificación.....	3
El Problema	4
Hipótesis de la investigación	5
Objetivos	6
Objetivo general.....	6
Objetivos Específicos	6
Capítulo II.....	7
Fundamentación Teórica de la investigación	7
Antecedentes.....	7
Relleno sanitario	8
Tipos de rellenos.....	9
Relleno sanitario de Pastaza	9
Producción de biogás del relleno sanitario	9
Composición del biogás.....	10
Fases de la generación de biogás	11
Extracción de biogás.....	13
Modelo matemático Landfill Gas Emissions Model (LandGEM)	14
Usos y aprovechamiento del biogás	15
Capítulo III	18
Materiales y Métodos	18
Localización del Área de Estudio	18
Tipo de investigación.....	19
Método investigación.....	19
Tratamientos de datos	19

Selección de la cantidad y característica de los residuos sólidos urbanos.....	19
Cálculo de generación de biogás con el método de LandGEM	20
Parámetros del modelo	20
Determinación potencial de generación de electricidad.....	21
Recursos humanos y materiales.....	22
Capitulo IV	23
Resultados y discusión	23
Cantidad y Caracterización de los residuos sólidos municipales (RSM)	23
Cálculo de biogás producido en el relleno sanitario del Cantón Pastaza.....	24
Determinación potencial de generación de electricidad	28
Conclusiones y recomendaciones.....	29
Conclusiones.....	29
Recomendaciones	30
Bibliografía.....	31
Anexos.....	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos en el Ecuador.....	8
Tabla 2. Composición del biogás derivado del relleno sanitario.....	10
Tabla 3. Rango de composición del biogás.....	11
Tabla 4. Estimación de eficiencia según el tipo estimado de relleno sanitario.....	15
Tabla 5. Listado de tecnologías más utilizadas en la recuperación de energía proveniente del biogás.....	15
Tabla 6. Cantidad de residuos sólidos municipales generados en el cantón Pastaza.	21
Tabla 7. Parámetros para el cálculo del modelo LandGEM (valor k y L0).....	22
Tabla 8. Volumen de generación de biogás, Metano, CO ₂ y NMO.....	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fases de transformación óptima para la obtención de biogás de una celda de un relleno sanitario.	12
Figura 2. Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	18
Figura 3. Composición total de residuos sólidos del cantón Pastaza	24
Figura 4. Proyección de generación de biogás, CH ₄ , CO ₂ y NMOC	27
Figura 5. Proyección de Potencial de generación de electricidad a partir de la fracción de los residuos sólidos municipales de Pastaza.....	28

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Estimación de generación de RSM del cantón Pastaza.....	34
Anexo 2. Tabla de tasa de generación de metano k mediante la categorización de residuos biodegradables.....	35

Capítulo I

Introducción

Los rellenos sanitarios municipales constituyen una fuente importante de biogás resultado de la fase de descomposición de los residuos sólidos municipales (RSM), constituyen una composición que en su gran mayoría es metano (CH₄) de 40 a 70%, dióxido de carbono (CO₂) entre otros compuestos (Camargo & Vélez, 2009).

Los RSM, se compone de residuos orgánicos e inorgánicos generados por las actividades humanas en los hogares, municipios, comercio e industria. El manejo y disposición inadecuados del manejo de estos residuos es uno de los problemas más serios en el mundo (Cisneros, 2010).

Ecuador produce aproximadamente un promedio de 11,341 ton/día de residuos, es decir un promedio de 4139,512 ton/año. Se carece de la tecnología para reciclar o tratar y disponer adecuadamente el máximo porcentaje de estos residuos sólidos, no obstante, la salud ambiental ha mejorado significativamente en los últimos 13 años (INEC 2010). Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), el 78% de los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM) administran de forma directa los desechos sólidos, por el contrario del 11,4% de municipios que lo tramitan por medio de algún tipo de mancomunidad, según datos declarados por los GADM, una persona que habita la zona urbana, genera en promedio un 0,84 Kg de residuos sólidos al día (INEC, AME, & BDE, 2021).

Los rellenos sanitarios el biogás generado son quemados a través de chimeneas, siendo estos compuestos de fácil combustión se puede aprovechar en diversas formas de energía, además vertederos de basura municipales conforman un posible suministro importante de biogás que es proveniente del proceso resultado de la descomposición de los (RSM), que son considerados potencial emisores de contaminantes a la atmosfera impactando negativamente al ambiente.

La cantidad de biogás que se genera en la disposición final va a depender en virtud del total de desechos la clase y tiempo, nivel de humedad, como también la temperatura y los métodos de manejo (Camargo & Vélez, 2009).

El uso de biogás es ampliamente reconocido como fuente potencial de aprovechamiento de energía, en Ecuador carece del aprovechamiento de este recurso energético (Crisanto, 2013). Los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM) tienen la tarea que es gestionar adecuadamente el termino de resolución, emanada sobre los residuos sólidos urbanos que son los rellenos sanitarios, en virtud de menguar las consecuencias ambientales dentro de estos sitios, la mayor problemática son los contaminantes atmosféricos que al producirse en el procesos de degradación anaerobia que sufre los RSM generan una mezcla de gases llamados biogás entre el principal y mayor poder calorífico es el metano (CH₄) que puede ser aprovechado previo a un tratamiento, minimizando el problema ambiental, como las que son producidas por los gases de efecto invernadero y los malos olores que se producen en estos sitios (Crisanto, 2013).

Pastaza es una comunidad que corresponde de 62.016 habitantes (INEC 2010) genera en promedio un total de 49,83 ton/día de residuos sólidos comunes y 0,187 ton/día de desechos provenientes del área hospitalarias (GADM de Pastaza), lo que se traduce en una producción per cápita es de 0,69 Kg/día, estas dimensiones de residuos se consignan en el único relleno sanitario que posee este cantón (Gaibor, 2017).

El cantón Pastaza posee un relleno sanitario que tiene una extensión de 7 hectáreas, no obstante, este relleno evidencia problemáticas que acortan su vida útil, ya que la celda diaria está mal manejada en su compactación y material de cobertura, el talud está mal diseñado y provoca la erosión del suelo que representa un peligro para el medio ambiente y los trabajadores de la zona.

Justificación

El aumento significativo de residuos sólidos municipales (RSM) es consecuente de la sociedad de consumo que ha contribuido a un problema ambiental, la preocupación por el cuidado de los recursos naturales ha surgido la necesidad de implementar tecnologías amigables y sostenibles con el ambiente (Olmedo & Currillo, 2019).

En las últimas décadas ha surgido cambios en el tratamiento de RSM con el surgimiento de rellenos sanitarios que son considerados como biorreactores por la generación sustancias gaseosas (biogás) y elementos líquidos lixiviado por la degradación que sufren estos residuos, esto depende de varios factores ambientales (González & Resource, 2016).

El biogás generado en un relleno sanitario es de vital importancia por su poder calorífica que puede presentar, en Ecuador el aprovechamiento y estudio de cuantificación es nuevo, es por ello la importancia del cálculo del biogás para aprovechar y ser una alternativa de remplazo de los combustibles fósiles que suma a la producción de gases de efecto invernadero (Crisanto, 2013).

El biogás es convertido en energía potencial la cual estimada por diferentes parámetros y para su aprovechamiento depende del valor calorífico del biogás, este valor se incrementará o minimizará en virtud del volumen de metano y el procedimiento que se le da al biogás, y así aprovechar para proyectos de generación y cogeneración de electricidad entre otros (Olmedo & Currillo, 2019).

En relleno sanitario del cantón Pastaza son depositados 49.83 ton/ día de RSM que se degradan por diversos factores en biogás que a la vez este producto no es aprovechado es por ello la importancia de realizar estudios e investigaciones que permitan obtener datos y desarrollar las posibles soluciones, de ahí la importancia de calcular el potencial de generación de biogás a través del modelo matemático LandGEM versión 3.02 que produce el relleno sanitario del cantón Pastaza con la finalidad de aprovechar este recurso (Gaibor, 2017).

El Problema

En referencia al informe del Instituto Nacional de Estadística y Censo en el 2020 (INEC) presentado con el Asociación Municipales del Ecuador (AME), referente Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales Gestión de Residuos Sólidos, es importante darnos cuenta que los residuos sólidos urbanos (RSU) en la actualidad se ha suscitado un importante crecimiento por el aumento demográfico, la disposición final en rellenos sanitarios ha facilitado su gestión, pero dicho proceso genera productos como producción de biogás y lixiviados, de los cuales varios han sido la solución para el beneficio energético del biogás como: conversión de energía eléctrica, térmica, gas natural y carburante para automóviles, reduciendo así el uso de combustibles fósiles, gases e impactos negativos al ambiente y con ello generando ingresos económicos para el manejo y operación del relleno sanitario (Guevara, 2021).

La mayor problemática son los contaminantes atmosféricos que al producirse en el proceso de degradación anaerobia que sufre los RSU generan una mezcla de gases llamados biogás entre el principal y mayor poder calorífico es el metano (CH_4) que puede ser aprovechado previo a un tratamiento, minimizando el problema ambiental como la dispersión de gases de efecto invernadero y los malos olores que se producen en estos sitios (García & Tenorio, 2020).

En la Amazonia ecuatoriana según el INEC y el AME se disponen de un 73% relleno sanitario, el 14,64% de celdas emergentes y tan solo un 12,2% de botaderos, éstos datos obtenidos con la información del año 2019 y publicados a diciembre del 2020, muestran las falencias de los GAD en soluciones oportunas a sus competencias, y que actualmente estas prácticas no se ejecutan de manera técnica, sabemos también que la búsqueda de alternativas de remplazar la dependencia de la fuentes energéticas que surgen de los combustibles fósiles y la obligación de cumplir con políticas internacionales y nacionales del cuidado del ambiente, ha generado la necesidad de producir tecnologías alternativas que ayuden a minimizar la propagación de los gases de efecto invernadero (INEC, AME, & BDE, 2021).

A través de los RSU en su fase de disposición final que se realiza en los rellenos sanitarios del cantón Pastaza, que comprende factores de descomposición microbiana y ambientales, se obtiene el biogás que es conocido como energía sostenible aprovechable que se utiliza como energía eléctrica, térmica y en automóviles (Cisneros, 2010).

Para aprovechar esta energía producida por el relleno sanitario del cantón Pastaza, es de vital importancia calcular cuánto biogás se está generando en dicho lugar, los procesos, las

realidades que motiva en gran parte a conocer la situación real del relleno y también contar con la herramienta con datos que demuestren como se realizó la investigación un informe del resultado de la investigación, es así que la presente tiene como propósito calcular la generación de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza a través del modelo matemático LandGEM versión 3.02 los resultados obtenidos contribuirán como base para estudios afines, demostrando la técnica de este modelo y el aporte profesional para la institución competente

Siendo interés del GAD Cantonal de Pastaza y de la unidad de Gestión Ambiental y Servicios Municipales y Sociales el contar con estudios que permitan plantear proyectos bianuales de trabajos direccionados a este tipo de problemática y con ello ir aportando a un mejor desempeño de sus competencias, es ahí que el ciudadano, más la entidad municipal debe ser parte de la solución y de la implementación, con una visión de una política pública que vaya en beneficio de las futuras generaciones, propuestas que vayan enmarcadas a los apoyos gubernamentales y ONGs que tienen interés en la conservación y protección Ambiental

Teniendo en cuenta esta problemática se plantea la pregunta de investigación:

¿Cómo el cálculo de generación biogás mediante el Modelo matemático LandGEM versión 3.02 podrá generar importante información para el uso sostenible de esta energía en el relleno sanitario del Cantón Pastaza.?

Hipótesis de la investigación

Aplicando el Modelo matemático LandGEM versión 3.02 se podrá calcular el potencial de energía a partir de la conversión de biogás en electricidad para el uso sostenible en el relleno sanitario del cantón Pastaza.

Objetivos

Objetivo general

- Calcular la generación de biogás del relleno sanitario, mediante el Modelo matemático LandGEM versión 3.02 para el aprovechamiento sostenible del cantón Pastaza.

Objetivos Específicos

- Seleccionar la cantidad y característica de los residuos sólidos urbanos siguiendo los lineamientos del modelo LandGEM del relleno sanitario del cantón Pastaza.
- Cuantificar la producción de biogás mediante el modelo matemático LandGEM versión 3.02 del relleno sanitario del cantón Pastaza.
- Determinar el potencial de generación de electricidad para una alternativa de aprovechamiento energético mediante el biogás generado en el relleno sanitario del cantón Pastaza.

Capítulo II

Fundamentación Teórica de la investigación

Antecedentes

Los rellenos sanitarios constituyen la tercera fuente de emisiones de metano, resultado de la degradación de los residuos sólidos urbanos (RSU), durante la fase anaerobio se produce procesos bioquímicos generando biogás (García & Tenorio, 2020). En varios países de Latinoamérica y el Ecuador sea han aplicado diferentes trabajos referentes a el biogás generados en los rellenos sanitarios enmarcados en la utilización como energía sostenible para el ambiente. Debido a lo expuesto surge la necesidad de recopilar información bibliográfica de diferentes estudios del tema como: tesis, proyectos, documentos web, revistas científicas etc. con la finalidad que validen los resultados.

Madrigal, et al., (2018) realizó un estudio centrado en determinar la producción de biogás, aplicando el método LandGEM Versión 3.02. “Con el objetivo de estimar la producción del 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, versión 3.02)”.

Mena (2017), en su estudio en el relleno sanitario Doña Juana de la ciudad de Bogotá donde se estudió el promedio del volumen de biogás que se podría obtener por medio de la degradación anaeróbica de residuos provenientes del relleno sanitario reuniéndola para la producción de energía eléctrica, utilizado los modelos de LandGEM y el modelo IPCC esta técnicas tiene la capacidad de orientar la producción de gases generados a partir de la degradación de los residuos, todos ellos diferentes al metano, asociados a los procesos llevados a cabo en el RSDJ.

Crisanto (2013), en su estudio realizo un análisis y determino el volumen y validez de biogás que se genera en relleno sanitario el Inga de la ciudad de Quito, contempló el beneficio posible de los recursos biomédicos provenientes del de biogás, su purificación y posterior y sus aprovechamientos para la energía eléctrica.

Ambuludi, et al., (2021), en sus estudios centrado en determinar la producción gas metano utilizado la tenía LandGEM, en virtud de los datos constituidos desde inicio del relleno, vida útil, clima, cantidad de residuos, composición de los residuos. Se puede concluir que existe un gran desaprovechamiento de este recurso.

Estos estudios muestran el interés de conocer la cantidad de biogás que se generan en

los rellenos sanitarios brindando interés en su aplicación como energía sostenible con la finalidad de minimizar el impacto de emisión del efecto invernadero a la atmosfera.

Relleno sanitario

La definición de relleno sanitario por parte AM061 RO316 04-05-15, se refiere a un proceso técnico para la adecuada contención de desechos y/o residuos sólidos; Consiste en colocarlos en celdas dotadas de geomembranas y en el menor espacio posible, principalmente para proteger de la contaminación del agua, suelo y atmósfera y proteger la salud y seguridad de la población. Consiste en esparcir, colocar y compactar los desechos y/o residuos, reducir su volumen al mínimo y luego cubrirlos con una capa de tierra u otro material inerte, al menos en un día soleado, y controlar los gases, lixiviados y distribución. vectores (MAE, 2015).

el vertedero gestionado es visto por algunos expertos como un reactor bioquímico donde las principales entradas son residuos sólidos y agua y los productos o salidas son biogás y lixiviados (Guevara, 2021).

Según el AME-INEC-BDE. 2020 en su Registro de Gestión de Residuos Sólidos, actualmente en Ecuador de los 221 GADM, el 50,5% disponen sus residuos en rellenos sanitarios y/o celdas emergentes el 31,4%, mientras que el 18% de los GADM disponen sus residuos en botaderos de cielo abierto, como se puede evidenciar en la Tabla 1.

Tabla 1. Disposición final de los Residuos Sólidos Urbanos en el Ecuador

Disposición	Porcentaje
Rellenos sanitarios	50,5%
Botaderos	18,2%
Celdas Emergentes	31,4%

Fuente: Fuente: AME-INEC-BDE. 2020 registro de Gestión de Residuos Sólidos

En un relleno sanitario con las condiciones técnicas adecuadas genera como insumo agua y residuos, mientras que la descomposición de todos los desechos produce productos como lixiviados y gas, que sin un tratamiento adicional y aprovechamiento de estos pueden ser una fuente importante de contaminación ambiental (Madrigal, et al., 2018).

Tipos de rellenos

Un relleno sanitario puede existir varios tipos, dependiendo del diseño y elegidos dependiendo de la comunidad, el presupuesto, los espacios y equipos con los que cuenta los gobiernos municipales, entre otros. En virtud de la cantidad de personas de la zona los más

aplicados son: relleno sanitario manual, las operaciones de compactación y confinamiento son ejecutados a través de personal humano y herramientas; los semimecánicos con el fin de realizar una buena compactación, para poblaciones de 40.000 habitantes que generan 40 ton/día de RSU, se emplea en apoyo de máquinas al trabajo manual; relleno sanitario mecanizado comprende para grandes ciudades de más de 40 ton/ día para operar se requiere de maquinaria pesada que compacte los RSU y remueva tierra (Gersonn, 2017).

En ciudades pequeñas y grandes la mejor tecnología a utilizar es el mecanizado por consecuencia al exceso de residuos que se produce a diario por su mejor compactación y uso de maquinaria pesada (Madrigal, et al., 2018).

Relleno sanitario de Pastaza

En Ecuador de los 77 rellenos sanitarios, uno de ellos se encuentra ubicado en el cantón Pastaza que inicio como botadero a cielo abierto en el año 1995 generando gran impacto al ambiente, a partir del año 2000 bajo la nueva normativa ambiental opto la manera de disponer los residuos a relleno sanitario, produciendo cerca del 49830 kg/día de basura con una creación per capital de 0,69 kg/hab/día que es el único sitio de disposición final que cuenta el cantón (Gaibor, 2017).

El área ocupada por el relleno contempla una porción de tierra de 45 ha, el lapso de la vida útil promedio para el pleno funcionamiento del relleno sanitario es de 30 años, el sitio puede considerarse como un relleno semicontrolado (Gaibor, 2017). El manejo final de los residuos sólidos en celdas al descomponerse emite al ambiente gases que actualmente en el cantón no se recuperan ni se aprovechan en otras actividades, por lo que son recubiertas con material pétreo y otros productos que disminuye la carga microbiana reduciendo los malos olores que generan estos gases (GADM Pastaza, 2021).

Producción de biogás del relleno sanitario

Un biogás es un derivado producido en un vertedero como resultado de la descomposición de residuos sólidos en fase anaerobia debido a procesos físicos y químicos. El tiempo necesario para descomponer los residuos sólidos y producir biogás depende de varias variables: número de organismos presentes en los residuos, nutrientes, temperatura, acidez. (pH), contenido de humedad, cobertura y densidad de compactación (Camargo & Vélez, 2009).

El biogás es mucho más liviano que el aire y es muy inflamable de 700°C, mientras más largo tiempo de retención más alto es el metano y su poder calorífico, si el contenido de metano es menor a 50% el biogás pierde su propiedad de inflamable. En la Tabla 2 se resume el valor

calorífico promedio de un biogás que varía entre 17 MJ/m³ a 34 MJ/m³ (Mayanga & Bonilla, 2007).

Tabla 2. Composición del biogás derivado del relleno sanitario

Gases	Composición en el relleno sanitario	Propiedades
Metano	45% a 65%	Combustible
CO ₂	34% a 55%	Acido, asfixiante
Vapor de agua	Saturación	Corrosivo
H ₂ S	0% a 1%	Corrosivo, olor, toxico
Amoniaco	0,5ppm a 100ppm	Corrosivo
CO	Trazas	Toxico
Nitrógeno	Trazas	Inerte
Oxigeno	0% a 20%	Corrosivo
Orgánicos	5ppm	Corrosivo, olores
Hidrogeno	0% a 1%	Combustible

Fuente: (Mayanga & Bonilla, 2007).

En un relleno sanitario recién construido la producción de biogás depende del tiempo en que se descompone los desechos, en varios estudios se ha demostrado que el biogás se genera en periodos largos de tiempo inclusive posterior a su cierre técnico (García Escamilla, 2019)

Composición del biogás

El biogás se trata de una mezcla gaseosa con mayor proporción de metano y dióxido de carbono en el punto más alto de su formación, mostrando la relación y composición aproximada como se indica en la Tabla 3 (Mayanga & Bonilla, 2007).

Tabla 3. Rango de composición del biogás

Parámetros	Unidad	Rango de variación
Metano	% CH ₄	30 a 65
Dióxido de carbono	% CO ₂	20 a 40
Nitrógeno	%N ₂	5 a 40
Hidrogeno	%H ₂	1 a 3
Oxigeno	%O ₂	0 a 5
Argón	% Ar	0,04
Sulfuro de hidrogeno	% H ₂ O	0 a 0,01
Sulfuro total	% S	0 a 0,01
Cloruro total	% Cl	0,005
Temperatura	°C	10 a 40
Contenido de humedad	% Humedad relativa	0 a 100
Masa	Kg/m ³	1,1 a 1,28
Nivel de energía mínima	MJ/Nm ³	10,8 a 23,3

Fuente: (Mayanga & Bonilla, 2007).

La composición depende de varias variables como propiedades, cantidad de residuos, contenido de humedad, compactación y antigüedad del vertedero (Camargo & Vélez, 2009).

Fases de la generación de biogás

En el proceso de tratamiento finales de los residuos en el relleno sanitario comprende diversos y complejos etapas dependiendo de varios aspectos o condiciones del medio, temperatura, el oxígeno, las características físicas de los residuos y la edad del relleno. Se identifica cinco fases de este periodo se pueden observar en la Figura 1 (Borda, 2016).

Fase I o Inicio del proceso aeróbica: inicia con la deposición de los desechos en el relleno sanitario y la descomposición de sustancias que se degradan con gran facilidad, el oxígeno es el catalizador de este proceso dando como resultado CO₂, agua y elementos parcialmente degradados a temperatura de 35°C a 40°C (Camargo & Vélez, 2009).

Fase II o Fermentación: con la presencia del desarrollo anaerobio junto con el aeróbico actúan organismos facultativos produciendo ácidos orgánicos reduciendo el pH, dando como resultado la liberación de metales en agua y CO₂ (Camargo & Vélez, 2009)

Fases III Anaeróbica: se forman las bacterias generadoras de metano que en condiciones adecuadas actúan lentamente, reduciendo el CO₂ (Camargo & Vélez, 2009).

Fase IV o Metanogénica: en esta etapa se produce la mayor parte del metano entre 40% a 60% por acción de microorganismos transforman el ácido acético y el hidrogeno en CH₄ y

CO₂, estos microorganismos son estrictamente anaeróbico y se llaman Metanogénicos (Borda, 2016).

Fase V o Maduración: en esta fase la generación de gas disminuye significativamente por el agotamiento de nutrientes que son separados con el lixiviado y los sustratos que quedan sufren una degradación lenta, los principales gases que predominan es el CH₄ y CO₂, en pequeñas cantidades se puede encontrar el nitrógeno y el oxígeno, según las medidas de sellado que utilice el relleno sanitario (Borda, 2016).

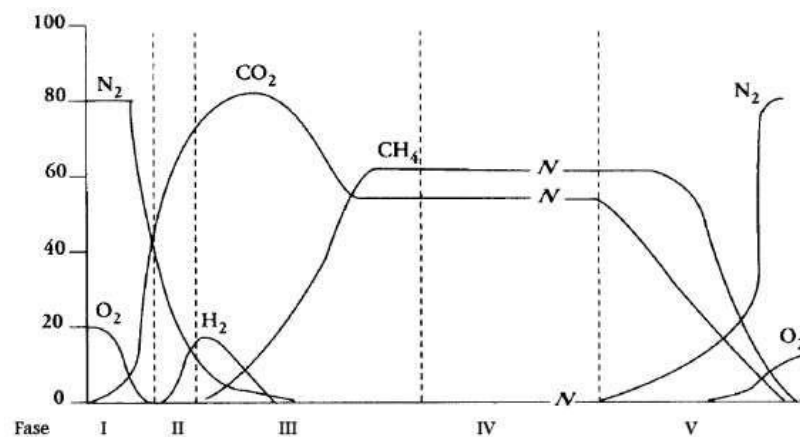


Figura 1. Fases de transformación óptima para la obtención de biogás de una celda de un relleno sanitario.

Fuente: (Camargo & Vélez, 2009).

La duración en cada fase va a depender de variables climáticas y la operación del relleno sanitario, este periodo de producción puede tener décadas o siglos para que los desechos puedan estabilizarse (Camargo & Vélez, 2009).

Extracción de biogás

La producción de biogás en el vertedero se produce a través de dos métodos de drenaje: drenaje activo y drenaje pasivo. La diferencia es que el drenaje pasivo es el más rentable, mientras que el drenaje activo es más eficiente (Mayanga & Bonilla, 2007).

La deshidratación activa utiliza sopladores conectados a una buena recolección de biogás por tuberías, el sistema de recolección se coloca en el vertedero y el soplador crea un vacío en el pozo, expulsando el biogás. Se componen de varios elementos, entre los que tenemos: colectores, puntos de recogida, separadores de agua, tubos de humo, ventiladores de tubo de transporte, quemadores e incineradores (Crisanto, 2013).

La eficiencia depende de la instalación del soplador, debe actuar sobre todo el cuerpo de residuos, la potencia de succión debe corresponder al número de chorros generados

(Mayanga & Bonilla, 2007).

En el drenaje pasivo en un relleno sanitario, el biogás se mueve horizontalmente a través de diferentes capas de residuos, por lo tanto, consta de capas superiores que actúan como filtro biológico, por lo que todos los días se cubre con una capa de tierra para evitar que el gas penetre al entorno (Crisanto, 2013).

Dentro de este sistema de drenaje pasivo, podemos clasificarlos de dos formas: El drenaje pasivo sin pozo de recolección es un método que no se recomienda, se utiliza en los siguientes casos por falta de recursos económicos para instalar una chimenea sin evacuar ningún drenaje. Llenadoras de sistema y de tipo manual (Mayanga & Bonilla, 2007).

El drenaje pasivo con pozo de recolección Este método aprovecha la difusión horizontal de los gases dentro del relleno sanitario, construyendo y colocando pozos de forma vertical a lo largo del relleno. Los gases se difunden hacia los pozos de recolección y salen a través de ellos de forma controlada al exterior del relleno (Crisanto, 2013).

Hay dos formas de construcción: una boca de acceso con celosía o tirantes de madera y una boca de acceso hecha de tubería perforada. En el caso del drenaje pasivo con pozos prefabricados, el biogás proveniente del pozo se quema, ya que la alta concentración de gas puede provocar incendios descontrolados y peligros para los operadores del vertedero, dolores de cabeza, náuseas y daños en los nervios (Crisanto, 2013).

Modelo matemático Landfill Gas Emissions Model (LandGEM)

El modelo LandGEM de emisión de gases de relleno sanitario fue elaborado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA), esta técnica es una herramienta programada en el programa de cálculo Microsoft Excel para estimar la producción de biogás, metano, dióxido de carbono y otros. Conjuntamente LandGEM se supone que la producción máxima de biogás alcanzará el equilibrio anaeróbico dentro de RSU (Guevara, 2021).

Es una herramienta de fácil acceso se le puede descargar en la USEPA, es un modelo basado en ecuaciones de estimación automatizada del primer orden y los datos requeridos: el año de apertura y cierre del vertedero y dos parámetros principales K y L0, calculados en función de las características del vertedero (EPA, 2005).

Los datos y directrices empleadas en la medición de LandGEM se detallan a continuación:

- Potencial de generación de metano (L0). [m³ de CH₄/ton de RSU].

Este parámetro varía en virtud del tipo y estructura de los RSU, mientras más cantidad de celulosa mayor valor tendrá L0, estos valores se pueden medir si se encuentra información del sitio o al igual contiene sus particulares valores pre establecidos por protocolo de la U.S. EPA, CAA (Madrigal, et al., 2018).

- Tasa de generación de metano (k). [1/año]

Determina la producción de metano para el volumen de RSU, mientras mayor es k más rápido se degradan los RSU para generar CH₄, al igual que L0 proporciona datos ya establecidos por la U.S. EPA y CAA (Madrigal, et al., 2018).

El valor de k en Ecuador Debido a que los RSU no están regulados por la ley de EE. UU, debe calcularse, en función de la precipitación anual promedio, el pH, la temperatura, el tipo de descomposición y la composición de los RSU (Guevara, 2021).

Este modelo estima la producción de biogás, como cada uno de los gases que lo componen, el metano, CO₂, sustancias orgánicas distintas del metano y otros tipos de contaminantes atmosféricos (Guevara, 2021).

Usos y aprovechamiento del biogás

El proceso de uso y operación comienza con la producción de biogás, puede ser utilizado como sustituto del combustible, incluso en calderas de vapor, en motores de combustión interna, generadores o en automóviles, en turbinas para generar electricidad. Un combustible versátil, requiere un proceso de refinación antes de que pueda ser utilizado (Madrigal, et al., 2018).

Un factor importante para emplear como sustituto de combustibles es el porcentaje de CH₄ determinando del producto energético, como, por ejemplo, si el CH₄ es inferior a 25% se incinera o se emite a la atmósfera sin restauración alguna, si los valores están entre el 25% a 40% se quema en antorchas y si el valor supera el 40% se considera una fuente de combustible aprovechable (Guevara, 2021).

Según (Guevara, 2021) un proceso de generación de energía está equipado con diferentes tecnologías y sus características se usarán en la producción de biogás. El porcentaje de eficiencia estará fundamentado en el protocolo del sistema de extracción y especificaciones del relleno sanitario, para una eficiencia de captura se toma en cuenta características técnicas de operación que se asumen tres posibles circunstancias como se ilustra en la Tabla 4.

Tabla 4. Estimación de eficiencia según el tipo estimado de relleno sanitario

Eficiencia de recuperación	Estimación del % de eficiencia
Baja	30% a 50%
Media	60% a 80%
Alta	80% a 95%

Fuente: (Guevara, 2021).

El poder calorífico del biogás está basado en los procedimientos aplicados en primera instancia, que será entre 5kWh/m³ y 8 kWh/m³ a 10 kWh/m³. Existen diferentes equipos para generar energía, la mayoría de ellos se ejecutan según el nivel de tratamiento que se le dé al biogás y el potencial característicos disponible a continuación en la Tabla 5 se resume las tecnologías más utilizadas en la recuperación de energía a partir del biogás (Mayanga & Bonilla, 2007).

Tabla 5. Listado de tecnologías más utilizadas en la recuperación de energía proveniente del biogás.

Tecnologías	Características
Motor a combustión interna (MCI)	<p>Genera energía mecánica Utiliza biogás con una pureza media Trabajo con sistemas mixtos gas y diésel Rellenos sanitarios que producen 800 kW a 3 MW. Se puede fusionar varios MCI. Su eficacia esta entre 30% a 40%.</p>
Turbina de gas	<p>Costos más elevados Resisten a la corrosión Emiten menos NOx y CO₂ Alto grado de tratamiento del biogás Se emplea en grandes proyectos Genera energía 3 MW Eficientes de 20% a 28% En ciclos combinados la eficiencia aumenta a 40%.</p>
Microturbinas	<p>Generan menos ruido Emiten menos gases de efecto invernadero Nivel medio de tratamiento Se combina con varias Microturbinas Su potencia esta entre 30kW a 200 kW Tamaño entre 30kW,70kW y 250 kW Operan con tasa de metano de hasta 35% Se emplea en proyectos pequeños y medianos.</p>

Generador de electricidad	Transforma energía mecánica a energía eléctrica Son de alto costo Se emplea en proyectos grandes.
Calderas, secadores y hornas	Son más rentables de biogás de BTU. Se emplea en procesos industriales Los equipos se modifican para el manejo de biogás Sus costos van desde \$200 000 a \$400 000
Calentadores infrarrojos	Se emplean en oficinas, departamentos y salas de máquina. Son económicos y fácil de instalar Flujo de entrada entre 0,28 a 4,25 m ³ /min Área que ocupan 46m ² a 74 m ²
Evaporador de lixiviados	Permite el tratamiento de lixiviados El tamaño axila entre 10 000 a 30 000 galones /día de lixiviados Sus costos son variados.
Gas natural comprimido	Se separa por medio de membranas y tamices moleculares a gas natural. Sus costos son cotizados entre 1.64 y 2.82 dólares
Gas natural licuado	CO ₂ , Oxígeno y Nitrógeno tienen que ser bajos El gas natural pasa por un proceso de licuefacción.

Fuente: (Guevara, 2021).

La generación de energía a partir del biogás trae grandes ventajas para el medio ambiente y la población, ya que la energía se obtiene a partir de la descomposición de los residuos.

Capítulo III

Materiales y Métodos

Localización del Área de Estudio

El relleno sanitario se ubica al noreste del cantón Pastaza a 7 km de la vía principal de la parroquia Puyo y 10 de agosto como se muestra en el Figura 2, geopolíticamente siendo el cantón más grande del Ecuador, con las siguientes características meteorológicas con un clima cálido húmedo con temperaturas de 21,3°C, precipitación de 4403mm (Guzmán, 2017).



Figura 2. Mapa de ubica de la zona de estudio

Fuente: Autor 2022

El estudio está ubicado en la zona NE de la ciudad de Puyo con las coordenadas geográficas UTM: N: 838418; E: 9836889.

Tipo de investigación

El tipo de estudio de carácter cuantitativo descriptivo, basada en fuentes de literatura de carácter públicos e investigativos donde se recopiló los datos que permitan emplear el modelo LandGEM versión 3.02 propuesta por la EPA para el cálculo de biogás que genera el relleno

sanitario del cantón Pastaza (Narváez & Villegas, 2014).

Método investigación

Entre los métodos de investigación que se empleó implementar para el plenodesarrollo de esta investigación el de Herrera & Saladrigas, (2019) que se basa en ecuaciones matemáticas planteadas como es el caso del modelo LandGEMversión 3.02 que permite calcular la cantidad de biogás del relleno sanitario del cantón Pastaza teniendo en cuenta los parámetros de L_0 y k y a las circunstancias actuales del relleno sanitario.

Tratamientos de datos

Selección de la cantidad y característica de los residuos sólidos urbanos

Para la selección de los datos para la aplicación del modelo de LandGEM se empleó el método de caracterización y cantidad de los residuos propuesto de Ambuludi, et al., (2021) en la cual selecciona parámetros de acuerdo al modelo y a las condiciones del relleno sanitario, con las variables como: clima, temperatura, humedad, precipitación, composición de los residuos sólidos y algunas características entre ellas: la producción per capital (PPC) el número de habitantes a futuro, el inicio y final del estado de utilidad del relleno. Toda esta información se obtuvo de bases de datos, reportes y estadísticas específicas del plan de gestión integral municipal de residuos y desechos no peligros del Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Pastaza, año 2021.

Para el cálculo de la estimación de la población futura y la tasa de crecimiento poblacional, se utilizó la ecuación planteada por Ambuludi, et al., (2021), y se toma las fuentes de datos del Instituto Nacional de Censo del Ecuador (INEC 2010). Ecuación 1:

$$P_f = P_i * (1 + r)^t \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

P_f = Población futura

P_i = Población inicial

r = tasa de crecimiento

t = tiempo en años a los que se va a proyectar

Cálculo de generación de biogás con el método de LandGEM Parámetros del modelo.

El modelo utiliza dos parámetros el factor de emisión por defecto para la k (constante de

generación de biogás) y la L_0 (potencial de generación de biogás). La primera se encuentra estrechamente relacionada por el nivel de temperatura, humedad, y la segunda por el tipo y la composición de los RSU. Para el estudio y computo de estas variables se aplicó la siguiente ecuación: (Madrigal, et al., 2018).

Para constante de la generación de biogás k .

$$k_{ponderado} = \sum_{i=1}^9 (\%r_i \times vp) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

$\%r_i$ = porcentaje de residuos en cada categoría

vp = valor de k

Para potencial de generación de biogás L_0

$$L_0 = MCF * DOC * DOC_F * F \frac{16}{12} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

MCF= factor de corrección para el metano

DOC= carbono orgánico degradable (fracción)

DOCF= fracción de carbono orgánico degradable asimilado

F= fracción de CH_4 en el biogás

16/12= constante estequiométrica.

La cantidad de biogás en los rellenos sanitario se llevó a cabo mediante la metodología propuesta por Madrigal, et al., (2018), que propone el modelo matemático “Landfill Gas Emissions Model” (LandGEM) versión 3.02 de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) donde se utiliza para estimar las emisiones de los vertederos municipales, así como una herramienta de evaluación automatizada formalizada en el programa de cálculo “Microsoft Excel”. Las emisiones estimadas del vertedero incluyen tanto el biogás del vertedero como todos sus componentes gaseosos, como metano, dióxido de carbono, componentes orgánicos distintos del metano y otros tipos de contaminantes del aire que pueden generarse en el vertedero ambas cosas. En base a la ecuación 4 expresada a continuación:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^{10} k L_0 (M_i / 10) e^{-kt} \quad (\text{Ecuación 4})$$

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)

L₀= potencial de generación de metano (m³/Mg)

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

t_{ij}= edad de la sección “j” de residuos “M_i” aceptados en el año “i”

Determinación potencial de generación de electricidad

Del metano producido en el relleno del cantón Pastaza, se empleó para la determinar el potencial de generación de electricidad como menciona Ambuludi, et al., (2021), mediante esto proponer el aprovechamiento del biogás que se genera en la zona de estudio. En la ecuación 5 muestra el cálculo potencial de generación de electricidad.

$$EAG = \frac{QCH_4 * 37.2 * EGe * ER * 0.9 * C}{\emptyset} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Dónde:

EAG= Potencial de generación de electricidad (MWh).

QCH₄ = Metano generado (m³/año).

37.2= Valor de calentamiento más bajo de CH₄ (MJ/m³).

EGe= Eficiencia de generación de electricidad, se considera 35%.

ER= Eficiencia de recolección de metano, se considera 75%

0.9 = Factor de oxidación del relleno sanitario.

C= Factor de capacidad, se considera 85%

∅= Factor de conversión de MJ a MWh.

Recursos humanos y materiales

Para llevar a cabo el estudio se tuvo la colaboración de los técnicos del Municipio del cantón Pastaza del departamento de Servicios Municipales y Sociales para la recopilación de datos, y para el desarrollo del documento la autora del estudio y tutor. Entre los materiales se utilizó una portátil para la aplicación del modelo matemático.

Capítulo IV

Resultados y discusión

Cantidad y Caracterización de los residuos sólidos municipales (RSM)

Los datos de la cantidad y caracterización de los residuos sólidos municipales producidos en el cantón Pastaza se obtuvo del informe de plan de gestión integral municipal de residuos y desechos no peligros del gobierno autónomo descentralizado del cantón Pastaza, provincia Pastaza del año 2021, por medio del estudio aplicado se pudo caracterizar y se determinó un total de residuos sólidos municipales del cantón es de 0,713 ton/m³ y 42,50 ton/día (Tabla 6).

Tabla 6. Cantidad de residuos sólidos municipales generados en el cantón Pastaza

Densidad(ton/m ³)	Generación total(ton/día)	Volumen (m ³)
0,713	42,50	57,6

La estimación de la cantidad de residuos sólidos municipales se presenta en el Anexo 1 desde el año 2009 al 2038 como fecha estimada con el propósito principal de alimentar al modelo. Tomando en cuenta que el lapso útil del relleno sanitario son 30 años, que empezó su actividad de funcionamiento desde el año 2009.

El cantón presenta un crecimiento población de 3,40% uno de los índices más altos del Ecuador, entre los habitantes presentes es de 64633 estos datos se recolectaron de la proyección del INEC del 2010. Según el informe que realizó el INEC, AME, & BDE, 2021 en su Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales la generación Per capital (GPC) es de 0,65 kg/hab/día (Anexo1).

Para el presente estudio fue importante conocer la composición de Residuos Sólidos Municipales que presenta el cantón (Figura 3). De los cuales se seleccionaron para el modelo los residuos biodegradables como el porcentaje de material orgánico aprovechable que es de 46,1%, papel 4,6%, cartón 1,8% textil 1% y el material no aprovechable que lo fraccionan en alimentos con un 16,8%, dando un porcentaje total de 70,3% que es más del 50% de los residuos sólidos totales los cuales son producidos en el cantón Pastaza.

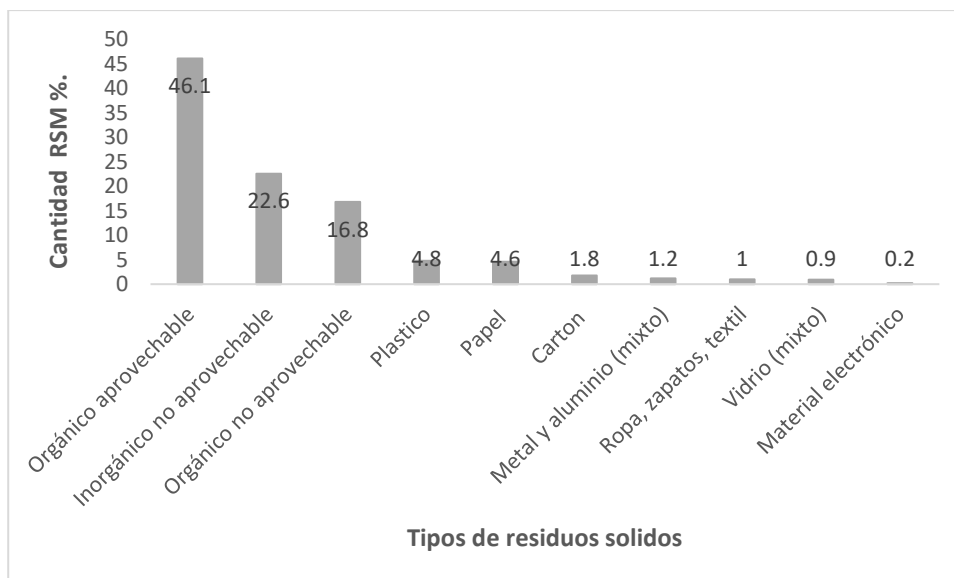


Figura 3. Composición total de residuos sólidos del cantón Pastaza

Tomando en cuenta lo descrito por Madrigal et al., (2018) en su estudio en el que menciona que la composición de materia orgánica se produce más del 50% y que es más común que lo que se podría determinar para muchas locaciones o territorios a nivel mundial, por lo que el modelo es muy funcional para aplicar con un porcentaje superior al mencionado.

De los resultados del diagnóstico de los Residuos Sólidos Municipales del cantón en la investigación previa de Gaibor (2017) quien determinó la composición para material compostable 51.48%, material residual (tierra, ceniza, huesos, poli laminados) 37,16%, papel 2,55%, plásticos 1,18% metales 0,76% y residuos especiales 0,43% y otros 4,6%, también se define un valor mayor al 50%, las investigaciones van demostrando que el modelo es aplicable.

Cálculo de biogás producido en el relleno sanitario del Cantón Pastaza

Los resultados de la constante de generación (L_0) y el potencial de generación de metano (k) son presentados en la Tabla 7.

Tabla 7. Parámetros para el cálculo del modelo LandGEM (valor k y L_0)

Parámetros del modelo	Valor
K	0,120 por/año
L_0	36 m ³ /ton

Para Ferrando (2019) los valores del coeficiente k modifican el lapso de tiempo en que se producen el biogás, en virtud de aumento de k, hay un aumento en la velocidad de producción de biogás, por consiguiente, en los primeros años se produce más biogás que en los años finales de funcionamiento de la planta. También señala que cambiar el parámetro L_0 , interfiere

principalmente al pico que se abarca la producción de biogás, a mayor cantidad presentada por el valor de L_0 , mayor es el nivel de producción alcanzado. Esta estimación depende en gran medida de la calidad de los datos disponibles y de la elección de los coeficientes correctos. La producción estimada utilizando este modelo depende en gran medida de la cantidad de desechos generados, por lo que los aumentos futuros en la producción de desechos también aumentarán la producción de metano.

En la Tabla 8 se proyecta los valores tabulados del volumen de generación del relleno sanitario del cantón Pastaza con resultados de $4.99E+10$ m³/año de biogás total, $2,50 E+10$ m³/año CH₄ y CO₂, $2,00E+08$ m³/año NMOC (compuestos orgánicos volátiles) estos valores son el total de emisiones generadas en los 30 años de vida útil del relleno en base a los datos recolectados.

Mena (2017) en su estudio menciona que el modelo LandGEM es capaz de simular la producción de muchos más gases resultantes de la descomposición de residuos, todos distintos del metano asociado a procesos llevados a cabo en un vertedero, además el LandGEM permite un inventario anual de la producción de gas y, por lo tanto, de biogás con este modelo se puede estimar a una producción de 66,135,403 m³ al año, de esta forma se puede demostrar que los residuos de los vertederos, cuando se utilizan de forma óptima el método de LandGEM, contribuyen al proceso de genera una mayor cantidad de biogás que se convierte en energía eléctrica, la cual puede ser consumida.

Tabla 8. Volumen de generación de biogás, Metano, CO₂ y NMO

Año	Total landfill gas (m³/año)	Metano (m³/año)	CO₂ (m³/año)	NMOC (m³/año)
2009	0	0	0	0
2010	1,73E+08	8,66E+07	8,66E+07	6,92E+05
2011	3,33E+08	1,66E+08	1,66E+08	1,33E+06
2012	4,80E+08	2,40E+08	2,40E+08	1,92E+06
2013	6,18E+08	3,09E+08	3,09E+08	2,47E+06
2014	7,46E+08	3,73E+08	3,73E+08	2,98E+06
2015	8,67E+08	4,33E+08	4,33E+08	3,47E+06
2016	9,81E+08	4,91E+08	4,91E+08	3,92E+06
2017	1,09E+09	5,45E+08	5,45E+08	4,36E+06
2018	1,19E+09	5,97E+08	5,97E+08	4,77E+06
2019	1,29E+09	6,47E+08	6,47E+08	5,17E+06

2020	1,39E+09	6,95E+08	6,95E+08	5,56E+06
2021	1,48E+09	7,42E+08	7,42E+08	5,94E+06
2022	1,58E+09	7,88E+08	7,88E+08	6,31E+06
2023	1,67E+09	8,34E+08	8,34E+08	6,67E+06
2024	1,76E+09	8,78E+08	8,78E+08	7,03E+06
2025	1,85E+09	9,23E+08	9,23E+08	7,38E+06
2026	1,94E+09	9,67E+08	9,67E+08	7,74E+06
2027	2,02E+09	1,01E+09	1,01E+09	8,09E+06
2028	2,11E+09	1,06E+09	1,06E+09	8,45E+06
2029	2,20E+09	1,10E+09	1,10E+09	8,81E+06
2030	2,30E+09	1,15E+09	1,15E+09	9,18E+06
2031	2,39E+09	1,19E+09	1,19E+09	9,55E+06
2032	2,48E+09	1,24E+09	1,24E+09	9,93E+06
2033	2,58E+09	1,29E+09	1,29E+09	1,03E+07
2034	2,68E+09	1,34E+09	1,34E+09	1,07E+07
2035	2,78E+09	1,39E+09	1,39E+09	1,11E+07
2036	2,88E+09	1,44E+09	1,44E+09	1,15E+07
2037	2,99E+09	1,49E+09	1,49E+09	1,19E+07
2038	3,09E+09	1,55E+09	1,55E+09	1,24E+07
Total	4,99E+10	2,50E+10	2,50E+10	2,00E+08

En la Figura 4 según el modelo muestra las curvas de generación de biogás, CH₄, CO₂ y NMOC en metros cúbicos al año (m³/año).

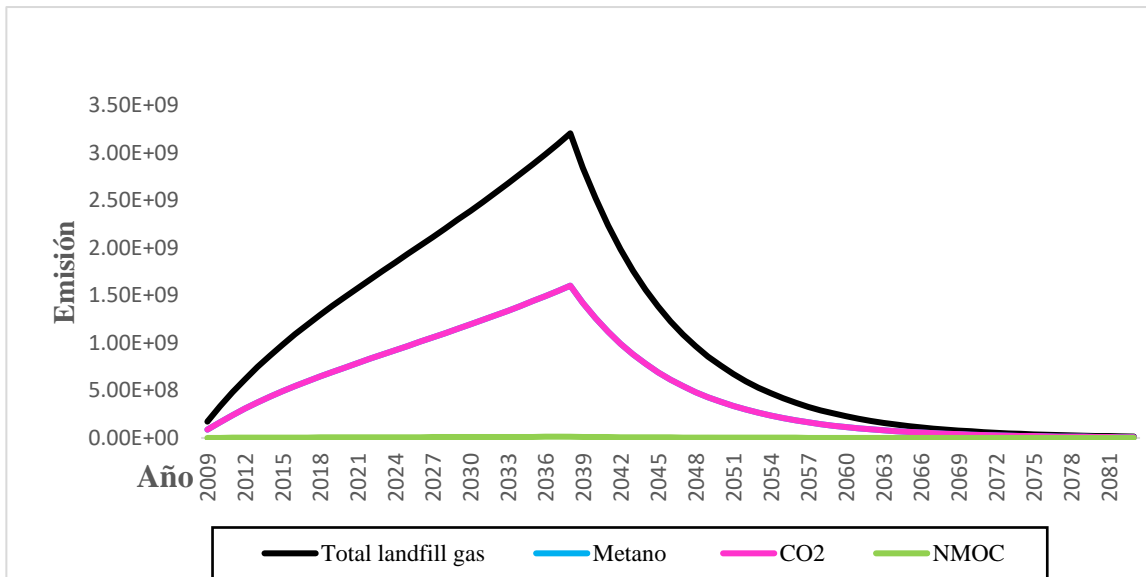


Figura 1. Proyección de generación de biogás, CH₄, CO₂ y NMOC.

En esta Figura 4 se puede evidenciar de manera gráfica que los resultados que arroja el modelo la producción de biogás desde el periodo 2009 hasta el año 2081. Cabe mencionar que los datos proyectados desde el inicio de actividades del relleno sanitario en el año 2009 y con una proyección hasta el año 2038. En concordancia con Chirinos (2022) quien señala que la estimación de los periodos de vida útil permite solventar la demanda por venir y prevenir cambios repentinos en el sistema, esta proyección se relaciona particularmente con la generación de residuos sólidos por persona y la cantidad de biogás obtenida.

Para el modelo se considera una composición de CH₄ y CO₂ al 50%, y comienza la producción de biogás un año después del inicio de actividades que es desde el 2010. Según el modelo con los datos de k y L_0 , el potencial de recuperación de biogás alcanzará a un punto máximo en el 2039 un año posterior a la clausura del relleno sanitario es decir de $3,21E+09$ m³/años, y paulatinamente disminuirá año tras año, esto se debe a que el modelo asume el valor máximo hasta el año de clausura, y la producción de biogás disminuirá exponencialmente debido a que la fracción orgánica es degradada.

Comportamiento similar al estudio realizado por Ambuludi et al., (2021) donde el pico más alto de producción es un año posterior de la vida útil del relleno sanitario, dichos investigadores hacen mención que, es debido a que es el año siguiente el mayor ingreso de residuos proyectada, toda la materia orgánica se procesaría luego de la fecha de clausura, también menciona que el crecimiento exponencial es por consecuencia del volumen de materia orgánica que ingresa al relleno sanitario.

El promedio de biogás generado es de $1.66E+09$ m³/años desde el año 2009 a 2038 es

un valor muy importante para el aprovechamiento que se le puede dar, este modelo por lo tanto y con los resultados expuestos permite a toma de decisiones oportunas, considerando también las proyecciones según los parámetros aplicados.

Determinación potencial de generación de electricidad

Se determinó la capacidad energética de producción electricidad sobre la base de la fracción de los residuos sólidos que se incorporan al relleno sanitario del cantón Pastaza, en la Figura 5 como se puede evidenciar en los resultados expuestos, la electricidad total apreciada que se crea de 2009 a 2038 es de 51.797.813,88 MWh. Ambuludi et al., (2021) en su investigación pudo concluir que existe un correcto potencial adecuado en la generación de electricidad proveniente del relleno sanitario que puede ser aprovechado, sin embargo, el producto de la electricidad total es inferior a esta investigación con un promedio de 2011 a 2032 oscila entre 17693 MWh y 53385 MWh, respectivamente. De la misma forma se señala que la generación de electricidad está relacionada intrínsecamente con el volumen de desechos sólidos municipales, que se vincula al aumento de la población y el desarrollo económico de cada región.

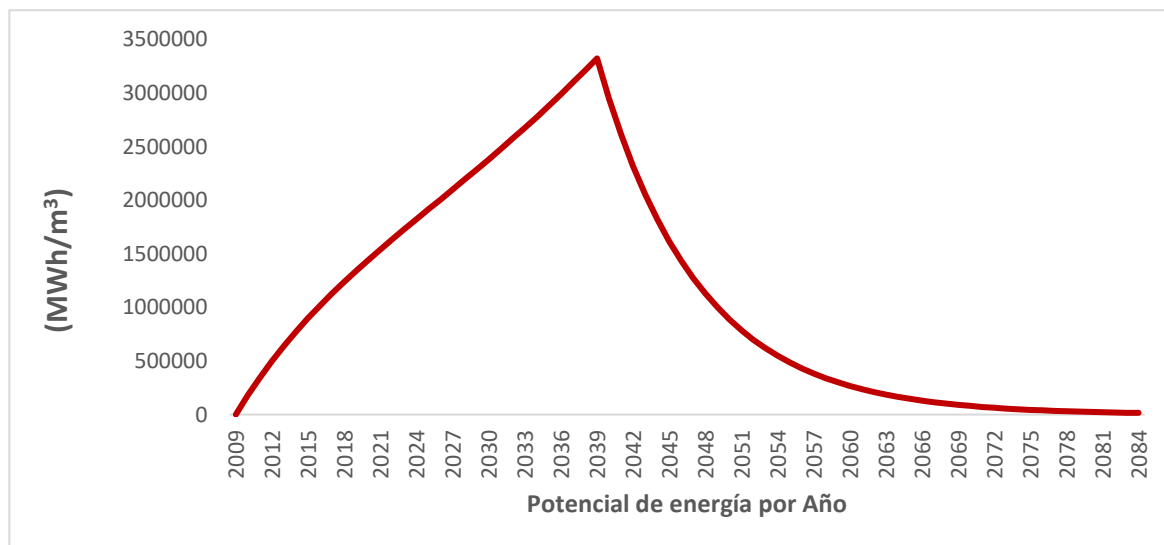


Figura 5. Proyección de Potencial de generación de electricidad a partir de la fracción de los residuos sólidos municipales del cantón Pastaza.

En la Figura 5 se puede constatar que los resultados de la proyección del potencial de generación de electricidad del 2009 a 2084 en base a lo que arroja el modelo el pico más alto de producción es el año 2039 con 3.324.250,13 MWh y desciende exponencialmente la producción debido a que el relleno sanitario ya no es alimentado, es ahí donde se debe considerar las futuras soluciones que permitan con la data existente generar nuevas estrategias de manejo de estos residuos y nuevos tratamientos que optimicen el uso del biogás .

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

De la caracterización y cantidad de residuos sólidos del cantón Pastaza que se seleccionaron para el modelo, el crecimiento poblacional corresponde al 3,40% el cantón más alto de crecimiento del Ecuador, se obtuvo la composición de los Residuos Sólidos Municipales como material orgánico aprovechable 46,1%, papel 4,6%, cartón 1,8% textil 1% y alimentos 16,8%, la vida útil del relleno sanitario de 30 años con un GPC 0,65 kg/hab/ día y una población dotada de 64633, con estos datos obtenidos se puede tener una visión general de la cantidad de los Residuos Sólidos Municipales que son depositados en el relleno sanitario, además de que los mismos están basados en datos comparativos de autores referidos en el presente estudio.

La proyección del biogás por medio del modelo matemático LandGEM es de mucha ayuda para el cálculo de la generación de biogás la cual arrojó el resultado de $1.66E+09 \text{ m}^3/\text{años}$ desde el año 2009 a 2038 para el aprovechamiento que se puede producir en el relleno sanitario del cantón Pastaza.

El potencial de generación eléctrica en el relleno sanitario es viable para el aprovechamiento sostenible dando un valor alto en los 30 años y un año después de la vida útil con 51.797.813,88 MWh.

Recomendaciones

Realizar estudios periódicos aplicando los modelos para la estimación de metano de los rellenos sanitarios ya que estos son fundamentales para considerar el posible impacto que puedan generar al aire, así como también ayudan a mantener un inventario de los gases de efecto invernadero y a llevar un control sobre los mismos

Realizar un estudio de factibilidad económica para la utilización y explotación del biogás que se producen en el relleno sanitario del cantón Pastaza.

Dar a conocer los resultados de esta investigación a las autoridades municipales para la aplicación de un sistema de generación de energía.

Bibliografía

- Ambuludi, R. R., Carvajal, V. P., & Diéguez, K. S. (2021). Estimación de gas metano mediante el modelo LandGEM del relleno sanitario municipal de residuos sólidos de Patate-Pelileo, Tungurahua, Ecuador. *Tecnología en Marcha*, 35-1(1), 67-78. Obtenido de <https://doi.org/10.18845/tm.v35i1.5413>.
- Borda, C. G. (2016). Biogás: Una alternativa energética para los rellenos sanitarios urbanos y un beneficio mitigador de Cambio Climático.
- Camargo, Y., & Vélez, A. (2009). Emisiones de Biogás Producidas en Rellenos Sanitarios. REDISA. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Andres-Velez-Pereira/publication/276062721_EMISIONES_DE_BIOGAS_PRODUCIDAS_EN_RELLENOS_SANITARIOS/links/5606714a08aeb5718ff2a9a2/EMISIONES-DE-BIOGAS-PRODUCIDAS-EN-RELLENOS-SANITARIOS.pdf
- Chirinos, G. R. (2022). Diseño de un sistema generador de energía eléctrica que emplea biogás a través de residuos sólidos urbanos en la ciudad de Chiclayo. Pimental - Perú: Universidad Señor de Sipan, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo; Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
- Cisneros, R. (2010). Estudio de Impacto Ambiental para la Construcción del Relleno Sanitario del Cantón Pastaza. Puyo.
- Collazos, H. (2008). Diseño y Operación de relleno sanitario. E.C. de Ingeniería.
- Crisanto, L. (2013). Estudio de factibilidad para implementar una central eléctrica aprovechando el biogás generado por el relleno sanitario del Inga. Quito: Universidad Politécnica Salesiana de Sede Quito, Tesis previo a la obtención del título de ingeniería Eléctrico. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6350/6/UPS%20-%20KT00806.pdf>.
- EPA, U. S. (2005). Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide. Washington: U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development.
- Ferrando, A. L. (2019). Modelización matemática de la producción de. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

- GADM, Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal. (2021). Solicitud Bienes materiales Nro.GADM-Pastaza-2021-Servicios Municipales-5002-SM. Obtenido de <https://puyo.gob.ec/wp-content/uploads/documentos/departamentos/administrativo/compras-publicas/solicitud-materiales/2021/gadm-pastaza-2021-serviciosmunicipales-5002-sm.pdf>
- Gaibor, K. E. (2017). Propuesta técnica para el cierre del relleno sanitario municipal del cantón Pastaza. Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo. Facultad de Ingeniería Ambiental. Título de trabajo de investigación. Obtenido de <http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/4218/1/UNACH-EC-ING-AMB-2017-0008.pdf>.
- García Escamilla, P. E. (2019). Eficiencia y confiabilidad de modelos de estimación de biogás en rellenos sanitarios. La Granja. Revista de ciencias de la vida, 29(1). doi:<https://doi.org/10.17163/lgr.n.29.2019.03>
- García, M., & Tenorio, J. (2020). Potencial de producción de biogás para la generación de energía eléctrica en el relleno sanitario de la provincia de Bagua, Amazonas, 2018. Chachapoyas-Perú: Universidad Nacional, Teoribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Ambiental. Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiY4NP5isb2AhUvQjABHXmWDUgQFnoECCEQAQ&url=http%3A%2F%2Frepositorio.untrm.edu.pe%2Fbitstream%2Fhandle%2FUNTRM%2F2146%2FGarc%25C3%25ADa%2520Jim%25C3%25A9nez%2520Martha%2>
- Gersonn, D. (15 de Julio de 2017). SCRIBD. Obtenido de Cuales son los tipos de rellenos sanitarios: <https://es.scribd.com/document/353850238/Cuales-Son-Los-Tipos-de-Relleno-Sanitario>
- Guevara, A. (2021). Evaluación del potencial de aprovechamiento energético del biogás residual generado por el relleno sanitario complejo ambiental Chasinato de la EPM-

GIDSA. Ambato: Universidad Técnica de Ambato, Facultad de ingeniería Civil y Mecánica, Proyecto Técnico previo a la obtención de título de Ingeniero Mecánico. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/33774>

Guzmán, D. (2017). Estudio de Impacto Ambiental Expost para la Gestión Integral de Desechos Peligrosos en el Relleno Sanitario de la ciudad de Puyo Cantón Pastaza. Puyo, Pastaza, Ecuador . Obtenido de https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:F5U2dG6d-FIJ:https://maepastaza.files.wordpress.com/2017/05/estudio_de_impacto_ambiental_expost_gestion_integral_de_desechos_peligrosos_en_el_relleno.pdf&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=ec&client=firefox-b-d

Herrera, D. B., & Saladrigas, H. M. (2019). La modelación como método del conocimiento científico en las ciencias sociales. El caso del modelo cubano de televisión local. RELMECS, 9(1). Obtenido de <https://www.relmecs.fahce.unlp.edu.ar/article/download/Relmecse053/10738?inline=1>

INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos., AME, Asociación Municipales del Ecuador., & BDE, Banco de Desarrollo del Ecuador. (2021). Estadística de Información Ambiental Económica en Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales. Obtenido de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/gad-municipales/>

Madrigal, G., Quispe, J. J., & Vargas, Y. (2018). 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. Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo, 4(2), 42-55. doi:<https://doi.org/10.17162/rictd.v4i2.1096>

MAE, Ministerio del Ambiente. (2015). Acuerdo N° 061. Reforma del Libro VI del texto Unificado de legislación secundaria. De la calidad ambiental. Quito.

Mayanga, W. C., & Bonilla, K. S. (20 de Mayo de 2007). Ingeniería química.org. Obtenido de Generación y manejo de gases en sitios de disposición final : http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/relleno_sanitario

Mena, J. M. (2017). Aplicación de Modelos simuladores para obtención de energía a partir del biogás en el relleno sanitario Doña Juana. Bogotá: Universidad Militar Nueva

Granada. Esp. Planeación ambiental y manejo integral de los residuos naturales. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/16433>

Narváez, O. M., & Villegas, L. I. (2014). Introducción a la Investigación: guía interactiva. Obtenido de Universidad Veracruzana: <https://www.uv.mx/apps/bdh/investigacion/unidad1/investigacion-tipos.html#collapseSeven>

Olmedo, J., & Currillo, J. (2019). Valoración de la producción de energía eléctrica a partir del Biogás que se genera en el Relleno Sanitario Ceibales de la Ciudad de Machala. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. Carrera Ingeniería Eléctrica. Trabajo de titulación previo a la obtención de título de Ingeniero Eléctrico.

Rey, L. G., & Management, A. R. (2016). Manual Técnico de medio ambiente y desarrollo sustentable. (B. M.), Ed.) Madrid- España: Equipo Cultural.

Towprayoon, S., Ishigaki, T., Chiemchaisri, C., & Amr Osama, A.-A. (2019). Solid Waste Disposal. Waste, 5. Obtenido de https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/5_Volume5/19R_V5_3_Ch03_SWDS.pdf

Anexos

Anexo 1. Estimación de generación de RSM del cantón Pastaza

Generación Per capital de RSM	0.65 kg/hab/día
Tasa de crecimiento poblacional	3.40 %
Población (2010)	64633 hab

Año	Población (hab)	Generación final de RSM que llegan al relleno sanitario (ton/día)	Generación RSM que llegan al relleno sanitario anualmente (ton/año)
2009	64633	41.32	15081.96
2010	66831	42.75	15603.44
2011	69103	44.23	16142.47
2012	71452	45.75	16699.77
2013	73882	47.33	17276.29
2014	76394	48.97	17872.26
2015	78991	50.65	18488.40
2016	81677	52.40	19125.65
2017	84454	54.20	19784.50
2018	87325	56.07	20465.64
2019	90294	58.00	21170.04
2020	93364	60.00	21898.39
2021	96539	62.06	22651.66
2022	99821	64.19	23430.32
2023	103215	66.40	24235.54
2024	106724	68.68	25068.05
2025	110353	71.04	25929.03
2026	114105	73.48	26819.20
2027	117984	76.00	27739.49
2028	121996	78.61	28691.34
2029	126144	81.30	29675.45
2030	130432	84.09	30692.78
2031	134867	86.97	31744.98
2032	139453	89.95	32833.01
2033	144194	93.04	33957.81
2034	149097	96.22	35121.05
2035	154166	99.52	36323.67
2036	159408	102.92	37567.33
2037	164827	106.45	38852.99
2038	170432	110.09	40182.78

Anexo 2. Tabla de tasa de generación de metano k mediante la categorización de residuos biodegradables.

TABLE 3.3 RECOMMENDED DEFAULT METHANE GENERATION RATE (k) VALUES UNDER TIER 1 (Derived from k values obtained in experimental measurements, calculated by models, or used in greenhouse gas inventories and other studies)									
Type of Waste		Climate Zone ^a							
		Boreal and Temperate (MAT $\leq 20^{\circ}\text{C}$)				Tropical ¹ (MAT $> 20^{\circ}\text{C}$)			
		Dry (MAP/PET < 1)		Wet (MAP/PET > 1)		Dry (MAP < 1000 mm)		Moist and Wet (MAP ≥ 1000 mm)	
		Default	Range ²	Default	Range ²	Default	Range ²	Default	Range ²
Slowly degrading waste	Paper/textiles waste	0.04	0.03 ^{3,5} – 0.05 ^{3,4}	0.06	0.05 – 0.07 ^{3,5}	0.045	0.04 – 0.06	0.07	0.06 – 0.085
	Wood/ straw waste	0.02	0.01 ^{3,4} – 0.03 ^{6,7}	0.03	0.02 – 0.04	0.025	0.02 – 0.04	0.035	0.03 – 0.05
Moderately degrading waste	Other (non – food) organic putrescible/ Garden and park waste	0.05	0.04 – 0.06	0.1	0.06 – 0.1 ⁸	0.065	0.05 – 0.08	0.17	0.15 – 0.2
Rapidly degrading waste	Food waste/Sewage sludge	0.06	0.05 – 0.08	0.185 ⁴	0.1 ^{3,4} – 0.2 ⁹	0.085	0.07 – 0.1	0.4	0.17 – 0.7 ¹⁰
Bulk Waste		0.05	0.04 – 0.06	0.09	0.08 ⁸ – 0.1	0.065	0.05 – 0.08	0.17	0.15 ¹¹ – 0.2

Fuente: (Towprayoon, *et al.*, 2019).