UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD CIENCIAS DE LA VIDA

NOMBRE DE LA CARRERA:

INGENIERÍA AMBIENTAL

DENOMINACIÓN DEL TÍTULO A OBTENER:

INGENIERO AMBIENTAL

TÍTULO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

"ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE LAS EMISIONES DE METANO EN EL RELLENO SANITARIO DE LA MANCOMUNIDAD PATATE-PELILEO"

AUTORES:

AMBULUDI PAREDES ROBINSON RIGOBERTO CARVAJAL

PADILLA VICTOR PAUL

DIRECTOR DEL PROYECTO:

ING. KAREL DIÉGUEZ SANTANA. MsC

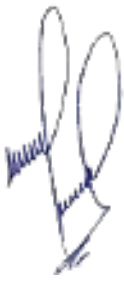
PUYO – ECUADOR

2020

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Nosotros, Ambuludi Paredes Robinson Rigoberto y Carvajal Padilla Victor Paul con cédulas de identidad 2200245021, 1726035346 respectivamente, hacemos constar que somos los autores del Proyecto de Investigación titulado: "**Estimación del potencial de generación de electricidad a partir de las emisiones de metano en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo**", el cual constituye una elaboración personal realizada únicamente con la dirección del Tutor de dicho trabajo, Msc. Karel Diéguez Santana. En tal sentido, manifestamos la originalidad de la conceptualización del trabajo como interpretación de datos y elaboración de conclusiones dejando establecido que aquellos aportes intelectuales de otros autores se han referenciado debidamente en el texto de dicho trabajo.

En el cantón Pastaza, a los 4 días del mes de septiembre del 2020.





Carvajal Padilla Victor Paul

CI: 1726035346

Ambuludi Paredes Robinson Rigoberto

CI: 2200245021

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El tribunal de sustentación del proyecto de investigación y desarrollo aprueba el proyecto de Investigación titulado: "**Estimación del potencial de generación de electricidad a partir de las emisiones de metano en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo**".



_____

Dr. Luis Ramón Bravo Sánchez.

Presidente del Tribunal

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El tribunal de sustentación del proyecto de investigación y desarrollo aprueba el proyecto de Investigación titulado: "**Estimación del potencial de generación de electricidad a partir de las emisiones de metano en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo**".



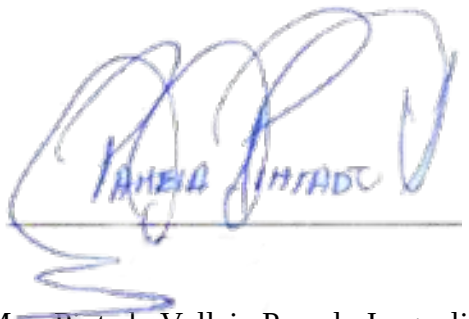
_____

Msc. Cuichan Paucar Santiago Homero

Miembro del Tribunal

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El tribunal de sustentación del proyecto de investigación y desarrollo aprueba el proyecto de Investigación titulado: "**Estimación del potencial de generación de electricidad a partir de las emisiones de metano en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo**".



Msc. Pintado Vallejo Pamela Jacqueline

Miembro del Tribunal

CERTIFICADO DE PORCENTAJE DE SIMILITUD OBTENIDO EN EL SISTEMA ANTI PLAGIO

Quien suscribe el presente Msc: Karel Diéguez Santana con CI:1756444129, certifica que el Proyecto de Investigación titulado: "**Estimación del potencial de generación de electricidad a partir de las emisiones de metano en el relleno sanitario de la mancomunidad PatatePelileo**", ha sido examinado a través del sistema Antiplagio URKUND y presenta un porcentaje de similitud del 3 %.

Puyo, 4 de septiembre del 2020.



Msc: Karel Diéguez Santana

Director del Proyecto de Investigación

Oficio No. 293-SAU-UEA-2020

Puyo, 22 de septiembre de 2020

Por medio del presente **CERTIFICO** que:

El proyecto de investigación correspondiente a los egresados CARVAJAL PADILLA VÍCTOR PAUL con C.I. 1726035346 y AMBULUDI PAREDES ROBINSON RIGOBERTO con C.I. 2200245021, con el Tema: **"Estimación del potencial de generación de energía de las emisiones de en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo",** de la carrera, Ingenieria Ambiental. Director del proyecto Ing. Karel Dieguez Santana, M.Sc., ha sido revisado mediante el sistema antiplagio URKUND, reportando una similitud del 3%, Informe generado con fecha 31 de agosto de 2020 por parte del director conforme archivo adjunto.

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes

Atentamente,

Ing. Italo Marcelo Lara Pilco M.Sc.
ADMINISTRADOR DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND – UEA - .

AGRADECIMIENTO

Principalmente quiero agradecer a Dios porque él me ha guiado por el camino del bien a lo largo de esto años, por haber escuchado todos mis pedidos, por haber sido mi consuelo en momentos difíciles y sobre todo por haber hecho de mi un hombre de bien en todos los aspectos.

Un agradecimiento muy especial e infinito a mis amados padres Rigoberto y Mirian por todo el esfuerzo que han realizado a lo largo de todo este tiempo para que yo pueda cumplir el objetivo que me plantee hace algunos años, por sus son consejos que me han servido muchísimo los cuales me han llevado por el camino del bien y a ser una mejor persona, por sus palabras de apoyo que me han hecho crecer tanto a nivel personal como a nivel profesional y en si por todos los detalles que han tenido conmigo los cuales los convierte en padres únicos, los Amo.

A mi querida novia Maribel Quintanilla por estar presente en los momentos que más la necesito, por siempre confiar en mí, por brindarme palabras de apoyo las cuales me hacen sentir que puedo seguir hacia delante a pesar de las adversidades y por todo muchas gracias amor.

A mis amados abuelitos Severino y Mercedes les agradezco todas sus palabras de apoyo y consejos los cuales me sirvieron para no dejarme vencer por nada ni nadie y seguir hacia delante, logrando conseguir el objetivo que tanto anhelaban que yo obtuviera.

A toda mi familia por siempre estar ahí cuando más se los necesita, siendo ellos un pilar fundamental en la obtención de este tan anhelado objetivo.

A mi estimado tutor de proyecto de titulación y además un gran amigo el Msc. Karel Diéguez por habernos brindado su conocimiento y apoyo incondicional a lo largo a lo largo de todo este tiempo de vida estudiantil.

A mi querido amigo y hermano de otra sangre Víctor Carvajal por haber sido un gran apoyo a lo largo de estos años, por ser parte de este gran dúo que se vino consolidando con el pasar del tiempo y sobre todo por entregar todo su empeño a que este proyecto salga de la mejor manera posible.

Robinson AP

En primer lugar, agradezco a Dios, por ser la guía de mi camino, por escuchar siempre mis plegarias y por darme aliento siempre que lo necesito.

A mi tutor de proyecto Msc. Karel Dieguez, por su incesable apoyo tanto en este trabajo como en consejos que ayudaron a fortalecer el ímpetu por concluir mi carrera, por ser el primer docente que me recibió en la universidad y ser el que me despedirá, mucho más halla por ser una gran persona, gran profesor y un gran amigo.

Quiero agradecer a mis padres, especialmente a mi papá Patricio Carvajal, ya que, sin su apoyo incesante, consejos, dedicación y cariño nada de esto fuera posible, él es el pilar fundamental para continuar con mi vida pese a todas las adversidades.

A mi esposa Evelyn Cisneros por apoyarme en mis proyectos de vida, nunca cortarme las alas y acompañarme durante estos años, su cálida compañía y amor me han dado más fuerzas para salir adelante.

A mis suegros Victoriano Cisneros y Susana Freire, a sus hijos Eulalia, Mercy y Fernando, que me dieron una calidad bienvenida a su familia, me han dado un valioso ejemplo de superación, unidad y gratitud, por toda su paciencia y ayuda brindada, siempre estaré eternamente agradecido.

A mi compañero de proyecto y gran amigo Robinsón Ambuludi por desarrollar esta investigación mano a mano, compartir esta experiencia de titulación, acompañarme durante estos años de estudio y conseguir esta meta tan anhelada.

Víctor.

DEDICATORIA

Todo el esfuerzo y sacrificio que he realizado a lo largo de este tiempo se lo dedico principalmente a Dios por haberme llenado de fuerza en momentos difíciles y guiarme siempre por el camino del bien.

A mis amados padres y abuelitos por haber sido un apoyo incondicional en todos los aspectos a lo largo de mi vida estudiantil y de esta manera lograr cumplir cada uno de mis objetivos.

A mi querida novia Maribel Quintanilla por su apoyo incondicional en las diferentes facetas de mi vida.

A mis seres queridos que ya presentes en esta vida pero que les hubiera encantado ver como logro cumplir uno de mis más grandes objetivos.

Robinson AP

Dedico este trabajo a mi esposa Evelyn Cisneros ya que gracias a su apoyo logre concluir este proyecto a mis hijos, Andrés y David, a mis padres en especial a mi papá Patricio Carvajal, a mis familiares y a todas las personas que contribuyeron con su ayuda y motivación para cumplir con esta meta, a mi alma mater la Universidad Estatal Amazónica, que me abrió sus puertas y me brindo todos los conocimientos necesarios que contribuyeron en mi formación profesional, a todos los docentes que día a día con esfuerzo y dedicación me brindaron un poco de su sabiduría, a la ciudad del Puyo por ser mi hogar durante el tiempo que duraron mis estudios, siempre los llevare en el corazón. ***¡Muchas gracias!***

Víctor.

RESUMEN

El crecimiento económico y demográfico de los países han incrementado la tasa de generación de residuos sólidos, y ha creado una nueva amenaza para la agenda global de sostenibilidad de la ONU. El presente trabajo se enfocó en buscar una alternativa que conlleve a la reducción de

las emisiones atmosféricas y a la generación de energía renovable. Se utilizaron los modelos de LandGem (modificado) y del IPCC para calcular el potencial de biogás generado y en base a estos se calculó la electricidad producida por las emisiones de metano del relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo ubicado en la provincia de Tungurahua cantón Pelileo, teniendo como resultados un total de 30,428,281.94 m^3/año de metano para el modelo de LadnGem (modificado) y de 22,817,359.62 m^3/año de metano para el modelo de IPCC, generando 43´995,976.2 kWh/año y 32´991,412.9 kWh/año, respectivamente para cada modelo., Los modelos de estimación de metano ((IPCC y LandGem (modificado)) mostraron diferencias entre los valores resultantes, que pueden estar asociadas a que el modelo de IPCC a diferencia de LandGem, emplea mayor cantidad de parámetros característicos del relleno sanitario, razón por la cual, varios autores toman este modelo como preferido al momento de realizar un análisis de estimación de metano.

Palabras clave: Metano, IPCC, LandGem, emisiones atmosféricas, energías alternativas, gas de vertedero.

ABSTRACT

The economic and demographic growth of the countries has increased the rate of solid waste generation, and has created a new threat to the UNO global sustainability agenda. This work focused on finding an alternative that leads to a reduction in atmospheric emissions and the generation of renewable energy. LandGem (modified) and IPCC models were used to calculate the potential of biogas generated and based on these, the electricity produced by methane emissions from the Patate-Pelileo community landfill located in the province of Tungurahua

canton was calculated. Pelileo, resulting in a total of 30,428,281.94 m^3 / year of methane for the LadnGem model (modified) and 22,817,359.62 m^3 / year of methane for the IPCC model, generating 43'995,976.2 kWh / year and 32'991,412.9 kWh / year , respectively for each model., The methane estimation models ((IPCC and LandGem (modified)) shows between the resulting values, which may be associated with the fact that the IPCC model, unlike LandGem, uses a greater number of characteristic parameters of the landfill, which is why several authors take this model as preferred when conducting a methane estimation analysis.

Keywords: Methane, IPCC, LandGem, atmospheric emissions, alternative energy, landfill gas.

Tabla de contenido.

1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN. 16

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 17

1.2. OBJETIVOS. 18

1.2.1. GENERAL. 18

1.2.2. ESPECÍFICOS. 18

1.3. JUSTIFICACIÓN 18

2. CAPITULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 20

2.1. **PRINCIPALES ELEMENTOS DE UN RELLENO SANITARIO** 20

2.2. BIOGÁS Y SU TRATAMIENTO PARA POTENCIAL GENERACIÓN ... DE ENERGÍA. 21

2.3. ETAPAS Y FACTORES QUE INCIDEN EN LA PRODUCCIÓN DE LOS ..... GASES DE UN RELLENO SANITARIO. 21

2.4. USO DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA..... 23

2.5. MODELOS EMPLEADOS PARA ESTIMAR LA GENERACIÓN DE ..... BIOGÁS 23

2.6. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DEL METANO GENERADO ..... EN LOS RELLENOS SANITARIOS 26

3. CAPITULO 3: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. 28

3.1. LOCALIZACIÓN. 28

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN. 29

3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN 29

4. CAPITULO 4: ANALISIS DE RESULTADOS 36

4.1. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL. 36

4.2. CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE METANO. 39

4.2.1. MODELO LANDGEM 39

4.2.2. Modelo de IPCC 41

4.3. ESTIMACIÓN DE ELECTRICIDAD PRODUCIDA A PARTIR DEL ..... METANO. 44

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 46

6. REFERENCIAS 48

7. ANEXOS 55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Resumen de ventajas y desventajas de los métodos de generación de energía eléctrica* ..... ***¡Error! Marcador no definido.***

Tabla 2. *Valores de k tomando en cuenta la precipitación del lugar de estudio* *31*

Tabla 3. *Valores de L_0 tomando en cuenta la precipitación del lugar de estudio* *31*

Tabla 4: *Eficiencia del sistema de recolección de gases* *32*

Tabla 5. *Producción per cápita de residuos sólidos municipales de la mancomunidad Patate-Pelileo año 201936* *35*

Tabla 6. *Proyección de residuos sólidos del relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo* *35*

Tabla 7. *Cantidad total de RSM que serán aprovechados* *37*

Tabla 8. *Estudios de producción estimada de metano con el modelo de LandGem* *39*

Tabla 9. *Detalles de los valores obtenidos para cada una de las variables para la metodología de IPCC (Ecuación 6)* *40*

Tabla 10. *Estudios de producción estimada de metano con el modelo de IPCC* *42*

Tabla 11. *Valores asignados para cada una de las variables necesarias para el cálculo del potencial de electricidad en virtud de cada modelo* *43*

Tabla 12. *Resultados obtenidos de generación de electricidad (kWh/año)* *44*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. *Estructuras de un relleno sanitario con sistema típico de recuperación de biogás 21*
Figura 2*. Estructuras de un relleno sanitario con sistema típico de recuperación de biogás 22*
Figura 3*.Ubicación del relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo (EMMAIT-EP)..... 28*
Figura 4: *Composición porcentual de residuos sólidos del relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo 38*
Figura 5. *Cantidad de gas de vertedero total y cantidad de metano recuperable (modelo LandGem modificado para Ecuador.) 39*
Figura 6. *Producción de CH_4, según el modelo de IPCC 42*
Figura 7. *Producción de metano según el modelo de LandGem modifica e IPCC 43*

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. *Cálculo de la producción Per Cápita 30*
Ecuación 2. *Cálculo de la población futura 30*
Ecuación 3. *Cálculo de la emisión de metano, Modelo LandGEM 31*
Ecuación 4. *Cálculo de emisión de metano, Modelo IPCC 34*
Ecuación 5. *Fracción de carbono orgánico degradable..... 34*
Ecuación 6. *Estimación de electricidad producida a partir del biogás. 35*

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. *Cantidad total de RSM que serán aprovechados por años de proyección. 55*
Anexo 2*. Cantidad de metano aprovechable en base al gas de vertedero total (modelo LandGem modificado para Ecuador)..... 55*
Anexo 3. *Resultado total de la cantidad de electricidad potencial generada por años de proyección, a partir de la producción de metano para el modelo de LandGem modificado para Ecuador. 56*
Anexo 4. *Resultado total de la cantidad de electricidad potencial generada por años de proyección, a partir de la producción de metano para el modelo de IPCC. 57*
Anexo 5. *Interfaz de la herramienta automatizada para el cálculo del LandGem. 57*
Anexo 6. *Interfaz de la herramienta automatizada para el cálculo del LandGem. 58*
Anexo 7. *Interfaz de la herramienta automatizada para el cálculo del LandGem. 58*
Anexo 8. *Interfaz de la herramienta automatizada para el cálculo del LandGem. 59*

1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

El crecimiento económico y demográfico de los países han incrementado la tasa de generación de residuos sólidos, y ha creado una nueva amenaza para la agenda global de sostenibilidad de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (Ayeleru, Okonta, y Ntuli, 2018). Nuevos lugares anteriormente con ecosistemas naturales han sido convertidos en hogares, infraestructuras o vertederos, para satisfacer las necesidades humanas. Este proceso se refleja en la generación de residuos en América Latina y el Caribe, pues en el 2014 se generaban diariamente 541.000 t/día (de ellos, 145.000 t/día de residuos a basurales) y se estima para el año 2050, que las cifras lleguen a las 671.000 t/día. La tasa promedio de generación actual de la región es de 1,04 kg/hab.-día, alrededor de 40 millones de personas carecen de acceso a la recolección de residuos y más del 50% de los residuos urbanos generados son orgánicos (Environment, 2018). A pesar de la rápida urbanización mundial en las últimas décadas, según el informe del Banco Mundial del año 2018, alrededor del 45% (3.4 mil millones) de la población mundial y el 36.18% (6.18 millones) de la población de Ecuador todavía viven en áreas rurales (Bank, 2018). El manejo de residuos sólidos domésticos del área rural no ha recibido tanta atención como las comunidades urbanas (Taghipour *et al.*, 2016) y como plantea He (2012) los niveles de contaminación relacionada con la falta de gestión de residuos en el área rural se ha convertido en una gran amenaza para el medio ambiente y especialmente en los países en desarrollo.

La organización y planificación de los servicios de recolección de residuos en países en vías de desarrollo como Ecuador es muy rudimentaria. Esta se refleja en la falta de información en la que los funcionarios locales pueden confiar para abordar el problema. Los funcionarios locales requieren información sobre las cantidades y tipos de residuos sólidos (RS) recolectados, así como las cantidades que son reciclables y recuperables de estos datos depende la disponibilidad de los sitios de disposición final y en muchos casos esta es inadecuada, y los programas actuales de reutilización y reciclaje son ineficientes (Aguilar-Virgen, TaboadaGonzález, y Ojeda-Benítez, 2013a; Al-Khatib *et al.*, 2007; Thanh, Matsui, y Fujiwara, 2011), todos estos motivos conllevan a la búsqueda de alternativas de gestión eficientes, a tomar medidas de control sobre los residuos sólidos generados por las diferentes ciudades, y a reducir considerablemente la contaminación ambiental que estos producen.

Debido a que la práctica más común para el manejo de residuos sólidos municipales (RSM) en Ecuador, así como en otros países en desarrollo, es mediante la eliminación en rellenos

sanitarios, esta investigación se centró en los beneficios que estos sitios de eliminación podrían ofrecer. El principal producto que se puede obtener del relleno sanitario es el biogás, producido a través de procesos anaeróbicos naturales en la descomposición de la materia orgánica en el relleno sanitario. El biogás está compuesto principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), compuestos orgánicos responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero (Chiemchaisri y Visvanathan, 2008; Machado, Carvalho, Gourc, Vilar, y do Nascimento, 2009). La experiencia de muchos países muestra que el biogás se puede utilizar con éxito para diferentes propósitos, como la generación de energía, el uso directo, la calefacción y como combustible de transporte alternativo, entre otras aplicaciones (EPA 2008 ; (Aguilar-Virgen, Taboada-González, y Ojeda-Benítez, 2013a; EPA, 1996; Garg, Achari, y Joshi, 2006; Giugliano, Grosso, y Rigamonti, 2008; Kumar, Mondal, Gaikwad, Devotta, y Singh, 2004; Machado, Carvalho, Gourc, Vilar, y do Nascimento, 2009; Martín, Marañón, y Sastre, 2001)). La recuperación de biogás fomenta el tratamiento sostenible de residuos (Greben y Oelofse, 2009).

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El aumento poblacional, la crisis energética, el consumo de los recursos naturales no renovables, la utilización de combustibles fósiles y las emisiones producidas por los rellenos sanitarios con reducida clasificación y reutilización de residuos aprovechables han dado paso a repercusiones negativas hacia el medio ambiente, varias de estas problemática son notorias en la ciudad de Pelileo, Patate y en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo (EMMAIT-EP), donde no se han tomado en consideración aspectos relacionados con la gestión de residuos sólidos y su clasificación debido a que no existe una concientización social colectiva.

Es por esta razón que el presente trabajo se enfocó en buscar una alternativa que conlleve a la reducción de las emisiones atmosféricas y a la generación de energía limpia y renovable, las cuales no se han abordado y no se tienen en consideración actualmente en el relleno sanitario pese a ser de gran importancia tanto a nivel social como a nivel ambiental, motivo por el cual la generación de potencial energía eléctrica a partir del biogás recolectado de la degradación controlada de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo es necesaria ya que de esta forma se logrará controlar los gases de efecto invernadero y se tomarán alternativas cada vez más óptimas al momento de escoger nuevas formas de energías renovables y amigables con el ambiente.

1.2. OBJETIVOS.

1.2.1. GENERAL.

Estimar el potencial de generación de electricidad a partir de las emisiones de metano en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo.

1.2.2. ESPECÍFICOS.

- Recolectar información primaria y secundaria de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo.
- Calcular la generación de metano producido en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo utilizando los métodos del IPCC y de la EPA (LandGEM modificado).
- Estimar la generación de electricidad a partir del metano producido por la degradación de los residuos depositados en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo

1.3. JUSTIFICACIÓN

La crisis energética, la contaminación ambiental y el cambio climático, debido principalmente, al dióxido de carbono (CO_2) producido por el uso de combustibles fósiles son los desafíos más importantes para las personas en todo el mundo. Esta circunstancia atrae más atención pública en el desarrollo y utilización de fuentes de energía renovables alternativas no basadas en el petróleo para frenar el calentamiento global y desarrollar una sociedad con un método ambientalmente sostenible. Hoy es fundamental centrarse en el uso de los recursos limitados existentes e identificar nuevas tecnologías y recursos renovables para el suministro de energía en el futuro (Andriani y Atmaja, 2019).

El rápido desarrollo de la población y la aceleración de las actividades económicas dan lugar a mayores volúmenes de desechos orgánicos, envases de plástico y subproductos industriales. El incremento de la cantidad de residuos sin una gestión estricta de los residuos ha creado una tendencia a la acumulación de residuos en el punto final, el relleno sanitario (Meidiana, 2010).

Sin embargo estas prácticas no son las únicas que contribuyen con la generación de emisiones, el uso de combustibles fósiles derivados de compuestos hidrocarburados, tienen un mayor peso en las repercusiones negativas hacia el ambiente (Darquea, 2018), se han buscado alternativas viables para generar energías alternativas mucho más limpias y económicas que sean independientes de la explotación de recursos naturales no renovables y contribuyan con la reducción de las emisiones atmosféricas (Valencia, Moreno, y Rodríguez, 2015). Por otra parte,

la producción de biogás a partir de la descomposición controlada de los residuos sólidos municipales (RSM) es una opción poco explotada en nuestro país, pese a existir estudios que comprueban que la generación de energía a partir del biogás tiene múltiples ventajas (Cervi, Esperancini, y Bueno, 2011), entre ellas el impacto positivo tanto a nivel ambiental como social, por esta razón la presente investigación se centró en estimar la producción de biogás que se encuentra presente en la descomposición de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo ubicada en la provincia de Tungurahua utilizando los modelos matemáticos del IPCC y el de la EPA (LandGEM) para posteriormente estimar la potencial producción de energía eléctrica a partir de estos resultados.

2. CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. PRINCIPALES ELEMENTOS DE UN RELLENO SANITARIO

Relleno sanitario: Sitio donde se realiza la eliminación controlada de desechos en la tierra para reducir el impacto negativo en el medio ambiente a través de la recuperación de biogás y el manejo de lixiviados (Kumar y Samadder, 2017).

Residuos sólidos urbanos: son todo aquel desperdicio, desecho o basura, que se genera antes o después de cualquier tipo de actividad de consumo antropogénico (Maldonado, 2006). En el caso de los países desarrollados han intentado evitar el vertido de desechos implementando regulaciones estrictas, reducción de desechos y el reciclaje (López Borreguero, 2019). Los expertos han estimado que solo entre el 10% y el 15% del total de desechos generados deberían ir a vertederos y debería ser la última opción para las ciudades donde la tierra es limitada (Trancho Bedoya, 2018).

Lixiviado: Efluente oscuro de composición muy variable con presencia de compuestos recalcitrantes, y sustancias contaminantes provenientes de las composiciones de los residuos, contamina los cursos de agua superficiales y acuíferos subterráneos cercanos (Müller *et al.*, 2015).

Metano: también conocido como (CH_4) es un hidrocarburo, reconocido a nivel mundial por ser el principal componente del gas natural. Es también un gas de efecto invernadero, por lo que al estar presente en la atmósfera en cantidades considerables hace que sufra variaciones la temperatura y todo el sistema climatológico en la tierra (Soto-Cabrera *et al.*, 2020). Al realizar esfuerzos para reducir las emisiones de este gas hacia la atmósfera se lograrán beneficios muy sustanciosos tanto para el ambiente, economía y energía (Carmona, Bolívar, y Giraldo, 2005; Ramos-Ramos, Guevara-Llerena, Sarduy-Pereira, y Diéguez-Santana, 2020).

Producción Per Cápita: cantidad de residuos sólidos generados por un individuo o colectividad en general, utilizado ampliamente para proyectar la capacidad de almacenamiento de un relleno sanitario y su tiempo de vida útil (Soto Vilca, 2016).

Proyección de población: cantidad de población que se estima en base a la tasa del crecimiento poblacional, el número de años al que se desea realizar la proyección y la población actual en base a estadísticas y censos, su es muy amplio ya que varios cálculos de primer orden como proyecciones de superficies, servicios básicos y salud, son analizado con esta variable (Rondón Toro, Szantó Narea, Pacheco, Contreras, y Gálvez, 2016; Soto-Cabrera, Panimboza-Ojeda, Ilibay-Granda, Valverde-Lara, y Diéguez-Santana, 2020).

2.2. BIOGÁS Y SU TRATAMIENTO PARA POTENCIAL GENERACIÓN DE ENERGÍA.

Biogás: El biogás es un residuo generado por la degradación de la materia orgánica está compuesto principalmente de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), (Chiemchaisri y Visvanathan, 2008; Machado, Carvalho, Gourc, Vilar, y do Nascimento, 2009). Por lo regular, este biogás, contiene 50–60% de metano (Unnikrishnan y Singh, 2010) y se considera una de las principales fuentes de emisiones antropogénicas de metano (Johari, Ahmed, Hashim, Alkali, y Ramli, 2012).

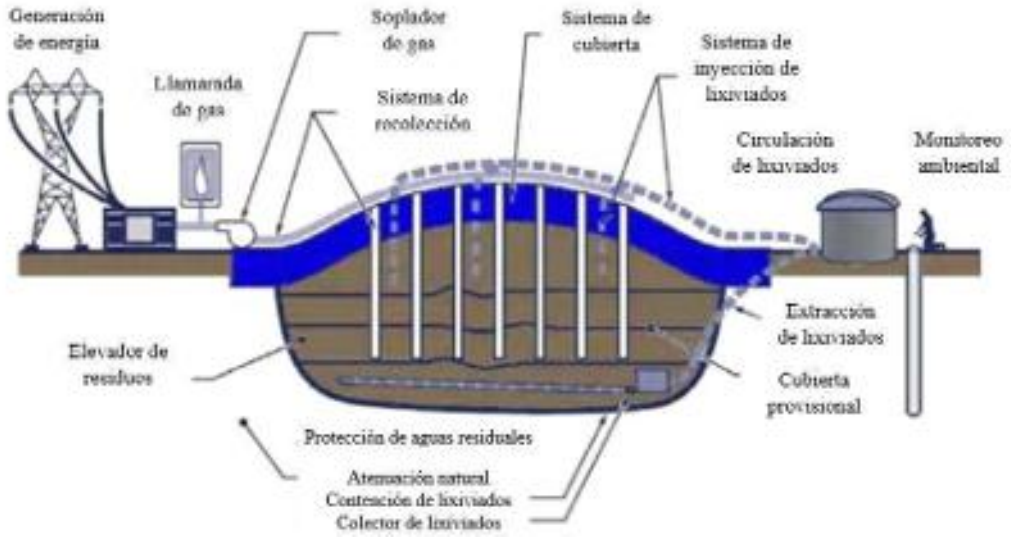


Figura 1. *Estructuras de un relleno sanitario con sistema típico de recuperación de biogás* ***Adaptado de:*** *(Zaman, 2010).*

2.3. ETAPAS Y FACTORES QUE INCIDEN EN LA PRODUCCIÓN DE LOS GASES DE UN RELLENO SANITARIO.

La materia orgánica presente en los desechos depositados en los vertederos sufre una compleja descomposición biológica y química que resulta en la producción de biogás. Según Noor, Yusuf, Abba, Abu Hassan, y Mohd Din (2013) mencionan que prácticamente, la producción de gases del relleno sanitario, comienza poco después de enterrar los desechos en relleno, y continuará ocurriendo mientras haya desechos orgánicos. En general, los desechos orgánicos pasan por cuatro fases principales de descomposición para producir el biogás del relleno

sanitario (Davis, 2002). En la primera fase se produce una descomposición de oxígeno, que tarda entre 7 y 30 días. En la segunda etapa se produce una fermentación ácida que tarda de 1 a 6 meses en producir productos intermedios. En la tercera fase se produce un proceso metanogénico inestable, en el que se produce reacciones químicas específicas que sirven para procesar los productos intermedios de las fases anteriores, lo que resulta en metano como producto principal en un tiempo estimado de 3 a 30 meses. Finalmente, un proceso metanogénico constante y estable produce biogás en el relleno sanitario el cual puede durar entre 5 y 50 años en dependencia de la disponibilidad de los desechos, sin embargo, el largo plazo de producción de gas se reconoce como una ventaja en la producción de energía en un relleno sanitario (Andriani y Atmaja, 2019; Davis, 2002).

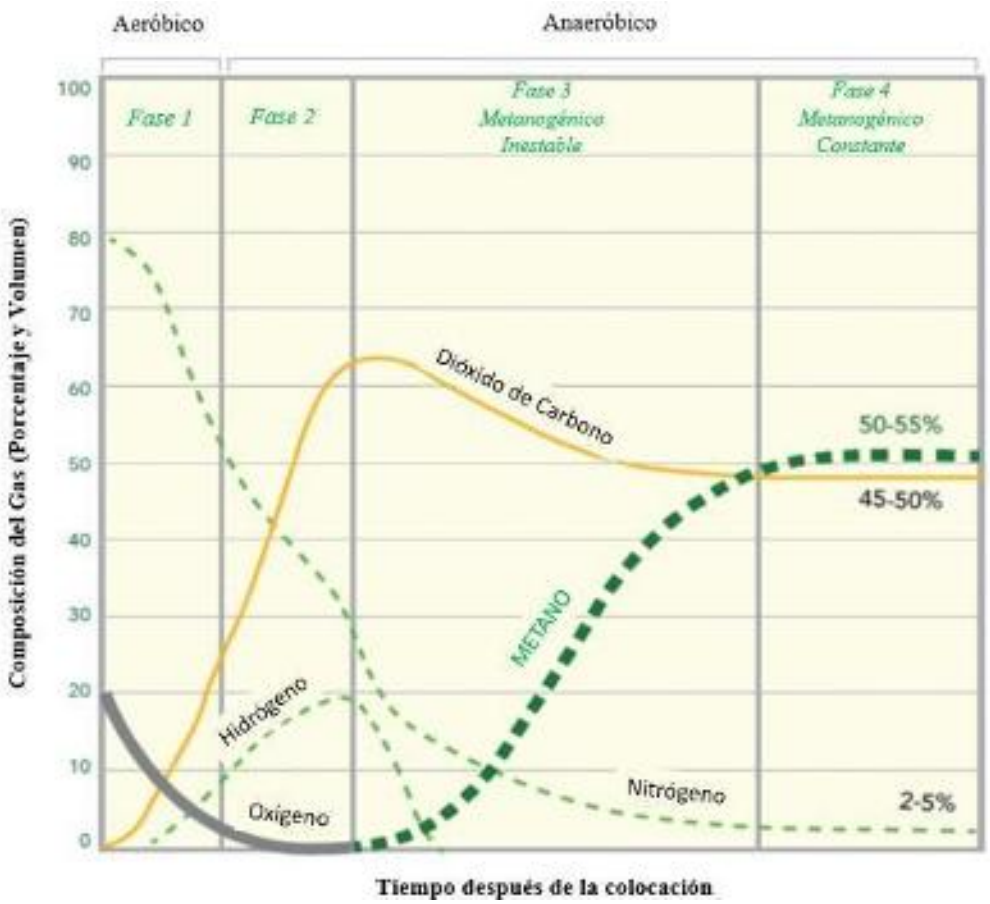


Figura 2. *Estructuras de un relleno sanitario con sistema típico de recuperación de biogás*

Adaptado de: (Andriani y Atmaja, 2019; Davis, 2002).

2.4. USO DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA.

Las principales opciones tecnológicas de conversión de residuos sólidos a energía son: la incineración, pirólisis, gasificación, digestión anaeróbica, y la recuperación de gas en los rellenos sanitarios (Kumar y Samadder, 2017). La selección del método de tratamiento depende de muchos criterios, como las condiciones socioeconómicas locales, así como en la cantidad y calidad de los RS generados.

La experiencia de muchos países muestra que el biogás se puede utilizar con éxito para diferentes propósitos, como la generación de energía, el uso directo, la calefacción y como combustible de transporte alternativo, entre otras aplicaciones (Aguilar-Virgen, TaboadaGonzález, y Ojeda-Benítez, 2013b; EPA, 1996; Garg, Achari, y Joshi, 2006; Giugliano, Grosso, y Rigamonti, 2008; Kumar, Mondal, Gaikwad, Devotta, y Singh, 2004; Machado, Carvalho, Gourc, Vilar, y do Nascimento, 2009), y como plantea (Greben y Oelofse, 2009),la recuperación de biogás fomenta el tratamiento sostenible de residuos.

2.5. MODELOS EMPLEADOS PARA ESTIMAR LA GENERACIÓN DE BIOGÁS

Como plantea Andriani y Atmaja (2019), existen disponibles diferentes modelos de predicción del biogás que se genera en los rellenos sanitarios. Principalmente, se basan, en ecuaciones de orden cero, como el de EPER Alemania y SWANA de orden cero; ecuación de descomposición de primer orden como LandGEM, Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), SWANA TNO, EPER France, México y Colombia.

Según Andriani y Atmaja (2019), plantea que los diferentes modelos de emisión dan resultados diferentes para un solo vertedero y los modelos dan resultados precisos para la región en la que se ha desarrollado, ya que la composición de los desechos difiere entre los países. Estos modelos han sido desarrollados y aplicados principalmente para escenarios europeos, aunque el LandGEM, fue desarrollado por la EPA, y en América Latina se ha desarrollado a partir del mismo, modelos aplicados a México y Colombia, a continuación, se describen los modelos más utilizados en este ámbito.

Modelo IPCC: modelo de descomposición de primer orden (la ecuación revisada del IPCC2006), tiene en cuenta las tasas de degradación de los desechos y la generación de metano a lo largo del tiempo, vasado en residuos vertidos y fracción orgánica degradable. Las

estimaciones de emisiones producidas por el modelo permitirán a los países evaluar los impactos de diferentes prácticas de gestión de residuos y mitigación de emisiones, básicamente se desarrolló para los países europeos (Chiemchaisri y Visvanathan, 2008; Machado, Carvalho, Gourc, Vilar, y do Nascimento, 2009).

Modelo LandGEM: Este es una aplicación de software basada en Microsoft Excel desarrollada por EPA que utiliza una ecuación de tasa de descomposición de primer orden para calcular las estimaciones para la generación de metano y biogás (LFG). Se supone que la generación de metano está en su punto máximo poco después de la colocación inicial de desechos y la tasa de generación de metano disminuye exponencialmente a medida que las bacterias consumen el material orgánico, este modelo está basado en la composición de residuos de EE. UU, las suposiciones inexactas sobre variables como el contenido orgánico, las tasas de eliminación futuras, las fechas de cierre del sitio y las eficiencias de recolección pueden generar grandes errores (Garg, Achari, y Joshi, 2006; Machado, Carvalho, Gourc, Vilar, y do Nascimento, 2009).

Modelo Mexicano: se enfoca en estimar el índice de generación de biogás cada año usando la ecuación de degradación de primer grado (ecuación 3), la cual fue modificada por la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU (USEPA), en el Modelo LandGEM versión 3.02 en el 2005 (Aguilar-Virgen, Taboada-González, y Ojeda-Benítez, 2011).

Modelo Colombiano de Biogás: el modelo aplica ecuaciones separadas para calcular la generación de cada uno de los cuatro grupos de residuos orgánicos agrupados de acuerdo a su índice de degradación:

- ✓ Residuos de degradación muy rápida – residuos alimenticios, otros orgánicos, 20% de los pañales.
- ✓ Residuos degradación moderadamente rápida – residuos vegetales, poda de casas o parques municipales, papel higiénico.
- ✓ Residuos degradación moderadamente lenta – papel, cartón, textiles.
- ✓ Residuos degradación muy lenta – madera, caucho. piel, huesos, paja.

La generación de biogás total para todos los residuos es calculada como la suma de las cantidades de generación de biogás de cada una de las cuatro categorías de residuos. Cada una de las categorías tiene asignados un valor de k y L_0 que son usados en el cálculo. Los cálculos del modelo también incluyen ajustes que toman en cuenta la descomposición aeróbica de los residuos conocido como el factor de corrección de metano (MCF), y un ajuste que toma en

cuenta si el sitio ha sido impactado por incendios. La recuperación de biogás es estimada por el modelo multiplicando la generación de biogás proyectada por la eficiencia de captura. Cada una de estas variables – k, L_0, MCF, ajuste de impacto por incendios y la eficiencia de captura (Ludwig, Stege, Engineers, y Dávila, 2009).

Modelo TNO: es un modelo de primer orden cuyos parámetros se basaron en datos reales de generación de biogás, esto se lo realiza mediante estimación directa de metano o biogás, la información sobre el componente orgánico de los componentes de desecho no está disponible. El modelo se basa mediante la medición de emisiones en 20 vertederos en los Países Bajos y se encontró que el error relativo medio entre el biogás observado y calculado fue del 22%. Es uno de los pocos modelos, donde los datos de los modelos se validaron con la medición real del gas del vertedero (Oonk y Boom, 1995).

Modelo EPER Francia: este modelo genera la tasa de metano producción independiente de la cantidad de sustrato restante o de la cantidad de biogás ya producidos (Thompson, Sawyer, Bonam, y Valdivia, 2009), además ofrece dos enfoques, cualquiera de los cuales puede usarse para la estimación de la generación de metano a partir de vertederos, el segundo enfoque está basado en el modelo ADEME, el lado izquierdo y derecho de la ecuación no tiene una dimensión dimensional. Sin embargo, se incluye un factor de normalización en la ecuación del modelo, pero parece que falta en las hojas de cálculo. El modelo menciona tres categorías de residuos y diferentes valores de k para cada categoría (Scharff y Jacobs, 2006).

Modelo EPER Alemania: es un modelo de orden cero que toma residuos residenciales y comerciales no acondicionados. Para el propósito de la estimación de emisiones, se consideraron desechos domésticos gruesos, desechos domésticos y desechos comerciales. El modelo es útil para la estimación de grandes fluctuaciones de emisiones de metano.
Básicamente se usa en Alemania (Scharff y Jacobs, 2006).

2.6. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DEL METANO GENERADO EN LOS RELLENOS SANITARIOS

El biogás de los rellenos sanitarios puede ser empleado de varias maneras como fuente de combustible. Por ejemplo, en la producción de gas natural de alta calidad que puede inyectarse directamente en las tuberías con la introducción de sistemas de recuperación de gas (Bolan *et al.*, 2013). También, se utiliza como sustituto del gas natural en los equipos de combustión de gas y para la generación de energía eléctrica. En este caso, la energía eléctrica se puede generar a través de diferentes aplicaciones, que van desde motores de combustión interna, hasta

microturbinas y turbinas de gas (USEPA, 2017). Estos sistemas requieren de sistemas ara ello los sistemas de en pozos, zanjas y redes de tuberías para la recuperación del biogás en los sitios de disposición. Tanto las ventajas como las desventajas de la generación de electricidad con LFG se resumen en la *Tabla 1* (USEPA, 2017).

Tabla 1. *Resumen de ventajas y desventajas de los métodos de generación de energía eléctrica.*

Métodos	***Ventajas***	***Desventajas***
Motores de combustión interna	Alta eficiencia en comparación con turbinas de gas y microturbinas. Tamaño de motor adecuado que complementa la producción de gas de muchos vertederos. Costo de instalación relativamente bajo. Eficiente para convertir el biogás en electricidad (hasta 30-40%). Generalmente se usa en vertederos donde la cantidad de gas es capaz de producir 800 kW – 3 MW	Costes de mantenimiento relativamente altos Emisiones al aire relativamente altas
Turbinas de gas	El tamaño es relativamente compacto. Bajo costo operativo y de mantenimiento en	Requiere tratamiento para eliminar los
Métodos	***Ventajas***	***Desventajas***

	comparación con otros métodos. El costo de generación por kW disminuye a medida que aumenta el tamaño de la turbina de gas. Más resistencia a la corrosión. Bajas emisiones de óxido de nitrógeno.	siloxanos. Las eficiencias disminuyen cuando la unidad está funcionando a carga parcial Se requiere una alta compresión de gas, 165 psi o más. Pérdida de carga parasitaria alta.
Microturbinas	Bajo requerimiento de flujo de gas Capaz de usar gas de relleno sanitario con menor porcentaje de contenido de metano (35%). Baja emisión de óxidos de nitrógeno. La interconexión es relativamente fácil debido a la menor capacidad de generación	Se requieren algunos tratamientos para el biogás para eliminar la humedad, los siloxanos y otros contaminantes.

***Tomado de*:** (Andriani y Atmaja, 2019; USEPA, 2017)

3. CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

3.1. LOCALIZACIÓN.

La investigación se desarrolló en la ciudad de Pelileo, cantón de la provincia de Tungurahua, en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo, que cuenta con una extensión de 3,5 ha de las cuales 2 ha se encuentran ocupadas, se ubica en el km 3 de la vía Patate-Pelileo, en las coordenadas 775884.47 mE, 9852807.64 mS a 2344 m.s.n.m posee una humedad relativa del 65% y una temperatura promedio de 18°C, su precipitación promedio anual oscila los 700 mm, siendo los meses de abril y mayo los de mayor presencia de lluvias, la temporada más seca se presenta en los meses de junio a octubre, se caracteriza por tener suelos de origen Inceptisoles, de color negro, arenosos (Tungurahua, 2019).

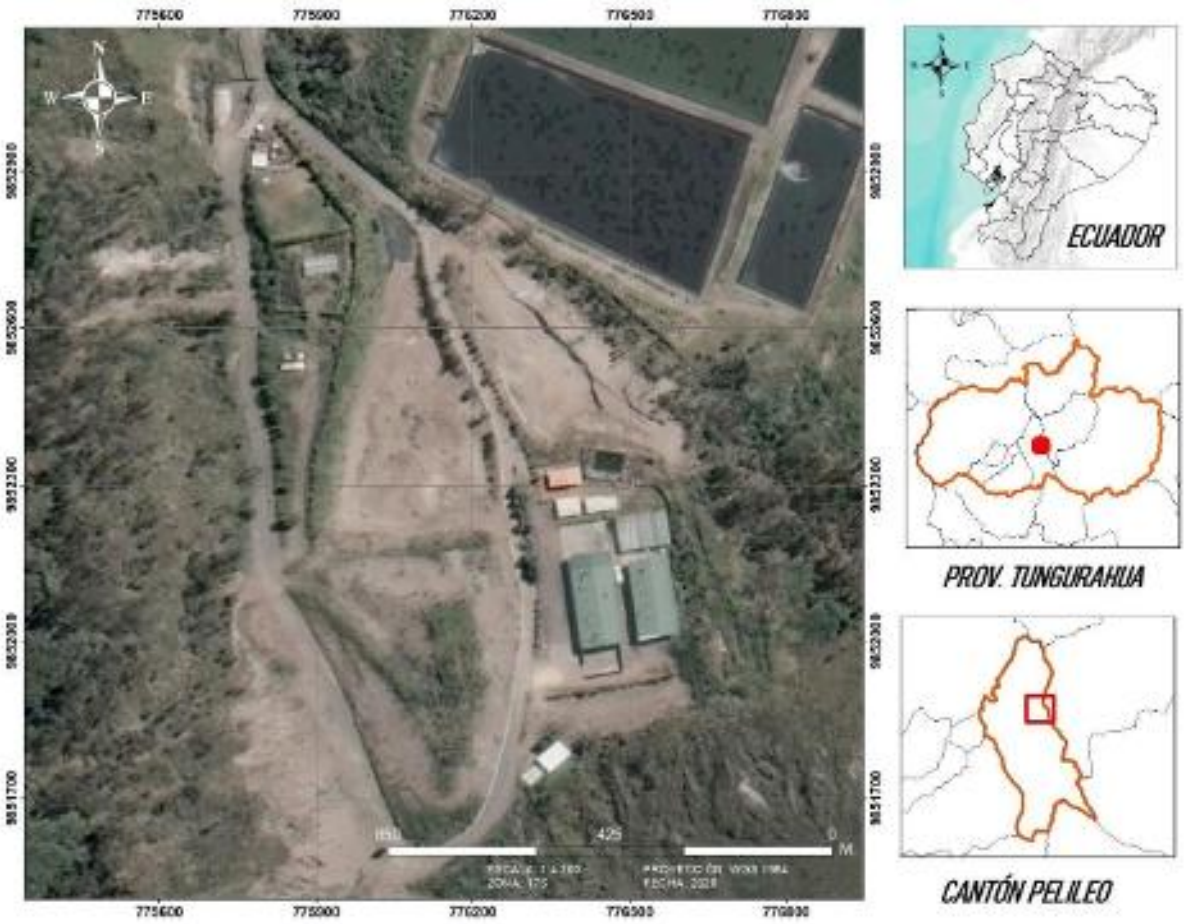


Figura 3*.Ubicación del relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo (EMMAIT-EP)*

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.

El presente proyecto se centra en la línea de investigación propuesta por la Universidad Estatal Amazónica: Gestión y Conservación Ambiental y se desarrolló bajo una investigación descriptiva utilizando como base la investigación bibliográfica en artículos científicos.

La modalidad de esta investigación fue cuantitativa de alcance descriptivo, debido a que se realizó la manipulación de diferentes variables y se describió las variables en estudio, como lo afirma (Hernández Sampieri, 2015): la investigación descriptiva únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren, su objetivo no es indicar cómo se relacionan éstas. Busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice.

3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

Para producir energía eléctrica a partir de los RSM se necesita de la ayuda de modelos matemáticos acorde a las necesidades de cada lugar, en el caso del relleno sanitario de la mancomunidad de Patate-Pelileo, se tomaron variables en dependencia de su situación actual como son: clima, humedad, precipitación, cantidad de residuos, producción per cápita, porcentaje de residuos orgánicos e inorgánicos, etc. Factores que al momento de realizar las estimaciones de producción de biogás son de vital importancia y el uso correcto de los mismos reflejan la eficiencia de los modelos escogidos ya que estos son la parte inicial del cálculo, la información de la composición y las cantidad de los residuos sólidos generados, se obtuvieron de los informes que proporciona la mancomunidad Patate-Pelileo al Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), los cuales registran datos hasta el 2018, debido a esto, para el presente trabajo se utilizaron los modelos de LandGEM y del IPCC para calcular el potencial de biogás generado.

CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS

Para el presente estudio la clasificación de los residuos se realizó según los porcentajes establecidos por el INEC (2018), donde se encuentra a detalle el porcentaje de cada uno de ellos, además se contrasto la información antes mencionada con datos proporcionados directamente por EMMAIT-EP, ya que es la empresa encargada de la administración del relleno sanitario de la mancomunidad Patate Pelileo y de esta manera lograr un validación de datos correcta que ingresaran en los modelos LandGEM (modificado para Ecuador) y de IPCC.

Producción Per Cápita (ppc). -

Para calcular la producción per cápita de residuos se utilizó la fórmula propuesta por (Castillo, 2012), la cual se detalla a continuación:

$$PPC = \frac{W}{P}$$

Ecuación 1. *Cálculo de la producción Per Cápita*

Donde:

PPC: Producción per cápita de residuos sólidos en kg/hab*día.

W: Peso generado de residuos sólidos en un día en kg.

P: Población que generó esos residuos sólidos en un día dada en habitantes

Crecimiento poblacional. -

El crecimiento poblacional se define como el cambio que experimenta una población en cierto lapso de tiempo, para el cálculo de la población en el presente estudio se tomó en cuenta la metodología propuesta por León Castillo (2015) el cual propone la siguiente formula:

$$P_f = P_i * (1 + r)^t$$

Ecuación 2. *Cálculo de la población futura*

Donde:

P_f: Población futura P_i: Población inicial

r: tasa de crecimiento t: tiempo en años a

los que se va a proyectar

Modelo LandGEM. -

Se utilizó el modelo de LandGEM debido a que es una herramienta automatizada, basada en una plantilla de Excel (Andriani y Atmaja, 2019; Escamilla-García, Jiménez-Castañeda, Fernández-Rodríguez, y Galicia-Villanueva, 2020). Con el modelo, LandGEM es posible realizar la estimación de emisiones utilizando datos específicos del sitio o parámetros predeterminados si no hay datos específicos del sitio disponibles (Amalia Chusna y Maryono, 2018). En general, la tasa de descomposición de primer orden produce una cantidad estimada

de metano que se generará en un período específico de tiempo (año). En el software LandGEM basado en Excel de la EPA de EE. UU., La generación de biogás, se estima en función del contenido de metano del biogás, en el que su valor predeterminado es del 50% (LandGEM, 2005). Además, LandGEM básicamente supone que un proceso de generación de metano está en su apogeo poco después de que las condiciones anaeróbicas lograron un estado estable en un vertedero (fase metanogénica constante) y disminuyen exponencialmente a medida que las bacterias consuman la materia orgánica (LandGEM, 2005). Las entradas para el cálculo en el modelo LandGEM incluyen (1) área y capacidad del relleno sanitario, (2) cantidad anual de residuos recibidos, (3) constante de tasa de generación de metano (*k*) y potencial de generación de metano (Lo), y (4) años totales de relleno sanitario operación (Kamalan, Sabour, y Shariatmad, 2011)

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0.1}^{1} k * L_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) * e^{-kT_{ij}}$$

Ecuación 3. *Cálculo de la emisión de metano, Modelo LandGEM*

Donde:

Q_{CH4}: es la generación anual de CH_4 en el año del cálculo (t / año),

i: es el incremento de tiempo de 1 año, j: es el incremento de

tiempo de 0.1 años, n: es el (año del cálculo) (año inicial de

aceptación de residuos), k: es la constante generación de CH_4

(año 1),

L_0: es la capacidad potencial de generación de CH_4 (m^3 / t),

Mi: es la cantidad de residuos recibidos en el año i (t),

T_{IJ}: es la edad de la sección j de cantidad de residuos Mi aceptado en el año i.

El modelo LandGem elaborado por la EPA tiene una modificación que se adapta a las condiciones climáticas de nuestro país, razón por la cual en el presente trabajo se utilizó el modelo de LandGem modificado por el Ministerio del Ambiente y Agua, el mismo que utiliza distintas variables para conocer las diferentes condiciones del relleno sanitario y de esta manera estimar la producción de biogás estas variables para este modelo en específico son predeterminadas y calculadas en función a la precipitación y a la cantidad de residuos orgánicos

presentes en el lugar de estudio, estas son; Índice de generación de metano (*k*), Índice de generación potencial de metano (L_0) y la Eficiencia del Sistema de Recolección (Nicola, 2017).

Tabla 2. *Valores de k tomando en cuenta la precipitación del lugar de estudio.*

Precipitación (mm/año)	***k (Contenido medio de residuos de Comida o Alimenticios ≤ 50***	***k (Alto contenido de residuos de Comida o Alimenticios ≥ 60***
0-249	0.4	0.43
250-499	0.5	0.53
500-999	0.065	0.69
1000-1999 o Saturado	0.08	0.085
2000+ o Saturado	0.08	0.085

Adaptado de: *(Fallahizadeh et al., 2019)*

Para el presente estudio se considera un valor de k=0.69, debido a que la precipitación promedio del lugar de estudio es de 700 mm/año, la misma que presenta clima frío gran parte del año (INAMHI, 2015).

El valor de L_0, se tomó en base a la metodología expuesta por la EPA, al igual que en el caso de la variable k, los valores se eligieron en base a la precipitación del lugar de estudio, los mismos que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. *Valores de L_0 tomando en cuenta la precipitación del lugar de estudio*

Precipitación (mm/año)	***L_0 (Contenido medio de residuos de Comida o Alimenticios ≤ 50***	***L_0 (Alto contenido de residuos de Comida o Alimenticios ≥ 60***
0-249	60	62
250-499	80	83
500-999	84	87
1000-1999 o Saturado	84	87
2000+ o Saturado	84	87

Adaptado de: *(Fallahizadeh et al., 2019)*

Para el presente estudio se considera un valor de L_0=87, debido a que la precipitación promedio del lugar de estudio es de 700 mm/año (INAMHI, 2015) y la cantidad de residuos orgánicos alimenticios son superiores al 60% (INEC, 2018).

La eficiencia del sistema de recolección en el caso del relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo es del 60% (*tabla 4*), ya que se deben realizar modificación al sistema actual de desalojo de gases para que estos sirvan de suministradores al sistema de recolección de gases y posteriormente al sistema de generación de electricidad, este valor fue obtenido en base a los valores predeterminados por la EPA y modificados por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (Nicola, 2017)

Tabla 4: *Eficiencia del sistema de recolección de gases*

Sistema de recolección	***Arcilla Saturada / Geomembrana***	***Arcilla No-Saturada***
Pozos Verticales de Gas Perforados o Colectores Horizontales	80%	70%
Pozos de Venteo Pasivos Convertidos / Modificados (existentes)	60%	40%

Adaptado de: *(Fallahizadeh et al., 2019)*

Modelo IPCC

Otro modelo que se empleó en la presente investigación fue el modelo matemático del IPCC según la metodología de Aziz, Hanafiah, y Gheewala (2019), que a diferencia del modelo de LandGEM, este no es una herramienta automatizada sin embargo calcula la emisión de metano de un relleno sanitario, en base a una fórmula matemática (*Ecuación 5*), tomando en consideración factores intrínsecos de un relleno sanitario, los cuales se detallan a continuación:

$$Emisiones\ CH_4\ (ton) = RSM_T * RSM_F * MCF * DOC * DOC_F * F * \frac{16}{12}$$

Ecuación 4. *Cálculo de emisión de metano, Modelo IPCC*

Donde:

RSM: residuos sólidos municipales,

RSM_T: residuos sólidos municipales totales generados (toneladas),

$RSM_{F:}$ es la fracción de RSM eliminada al relleno sanitario,

MCF: es el factor de corrección de metano,

DOC: es la fracción de carbono orgánico degradable,

$DOC_{F:}$ es la fracción de DOC total que realmente se degrada. El valor predeterminado utilizado según la guía de IPCC (2006), es de 0.77.

F: representa una fracción de metano en el biogás del relleno sanitario.

Para el presente estudio se tomó en consideración una situación típica, MCF tiene valores predeterminados de 0.4–1.0, dependiendo de las diferentes prácticas de operación de los rellenos sanitarios. En el caso de los rellenos que están sin gestionar, el valor de MCF se establece en 0.7 (Tsai, 2007). El valor de MCF representa la posibilidad de descomposición aeróbica de la fracción de desechos de la capa superior que conduce a una producción de metano menos de lo teóricamente posible en los rellenos sanitarios (Scarlat, Motola, Dallemand, Monforti-Ferrario, y Mofor, 2015). Según IPCC (2006), el DOC oscila entre 0,08 y 0,21, y su estimación se expresa como la *(Ecuación 6).*

$$DOC = 0.4 * P + 0.15 * K + 0.3 * W$$

Ecuación 5. *Fracción de carbono orgánico degradable.*

Donde:

P: es la fracción de papeles en RSM,

K: es la fracción de basura de cocina en RSM

W: es la fracción de maderas / hojas presentes en los RSM.

Una vez calculado el potencial de generación de biogás y realizada la comparación entre los resultados obtenidos de los dos modelos matemáticos (IPCC y LandGEM), se procederá a calcular la potencial energía eléctrica generada a partir del biogás obtenido utilizando la siguiente metodología.

Estimación de electricidad producida a partir del biogás. -

El potencial de electricidad del biogás de relleno se deriva del contenido de metano, mientras que el contenido de CO_2 biogénico, se considera que es incombustible y no tiene un valor energético. La cantidad de electricidad producida a partir de la captura de biogás de relleno sanitario se estimará a partir de la siguiente ecuación (USEPA, 2016).

$$EAG = BRC * LHV * \frac{1}{TC} * (1 - CP) * FD$$

Ecuación 6. *Estimación de electricidad producida a partir del biogás.*

Dónde:

EAG: es la electricidad anual generada (kWh),

BRC: es el biogás de relleno terrestre recolectado (m^3 / año); representa la magnitud del biogás de relleno de tierra por año que se recupera y transfiere a los equipos de generación de electricidad,

LHV: es el menor valor de calentamiento del metano (MJ / m^3) este varía de 13 a 23 MJ / m^3; sin embargo, se supuso un valor medio de 18 MJ / m^3 en este estudio (USEPA, 2016),

TC: es la tasa de calor (kWh / MJ); en este caso, la cantidad de energía utilizada por los motores de combustión, para generar un kilovatio-hora (kWh) de electricidad, que oscila entre 9.5 y 12.5 MJ / kWh, se supuso un valor intermedio de 11 MJ/kWh para este estudio. (USEPA, 2016),

CP: es la carga parasitaria que se considera que es la energía requerida para operar compresores y otros equipos de apoyo para convertir biogás de relleno sanitario en electricidad. Según la USEPA (2016), las cargas parásitas oscilan entre 0.04 y 0.08 para proyectos de biogás de relleno sanitario a electricidad (Thorneloe, 2008), en este caso, se considerará el valor medio, de 0.06.

FD: es el factor de disponibilidad del motor; que es la cantidad de horas en un año que la tecnología produce electricidad. Está entre 0.92 y 0.96 según el tiempo de inactividad del equipo de recuperación de energía para el mantenimiento regular, la disponibilidad de biogás de relleno y el diseño de la planta. El factor de disponibilidad de motor promedio asumido fue 0.94 (Steffens, 2013)

4. CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO ACTUAL.

Según la proyección de la cantidad de residuos sólidos que ingresara al relleno sanitario manejado por el EMMAIT-EP, realizada por Castro (2019) y los datos recopilados por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC, 2018), los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo, registran una producción per cápita de 0.67 kg/hab*día, con un total aproximado de 48.68 ton/día, como lo muestra la tabla 5, datos parecidos a los expuesto por Visarrea Vega (2016), con un total de 0.66 kg/hab*día para la ppc y un total de 48 ton/día de RSM, en un estudio de gestión de residuos sólidos elaborado para el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo.

Tabla 5. *Producción per cápita de residuos sólidos municipales de la mancomunidad PatatePelileo año 2019*

Tipo	***Generación kg/hab*día***	***Población (hab)***	***Generación total t/día***	***Generación total t/año***
Residuos sólidos municipales (RSM)	0.67	72,657	48.68	17,768.20

Adaptado de: (Castro, 2019)

Tomando en consideración que la fecha de inicio de operación fue en el año 2011, el tiempo de vida útil del relleno sanitario de 20 años (Castro, 2019), la ppc (producción per cápita) actual y sus datos históricos, se obtuvo una proyección hasta el año 2031, dando un total de 389,489.31 toneladas de residuos sólidos municipales, y una ppc de 0.76 kg/hab*día.

Tabla 6. *Proyección de residuos sólidos del relleno sanitario de la mancomunidad PatatePelileo*

Año	***Generación de RSM (t/d)***	***Generación de RSM (t/a)***	***ppc (kg/hab*día)***
2011	40.17	14,662.05	0.61
2012	41.20	15,038.00	0.62
2013	42.25	15,421.25	0.63
2014	43.33	15,815.45	0.63
2015	44.44	16,220.60	0.64
2016	45.48	16,599.83	0.65
2017	46.55	16,989.29	0.65

2018	47.61	17,378.74	0.66
2019	48.68	17,768.20	0.67
2020	49.75p	18,157.65p	0.67p
2021	50.81p	18,547.11p	0.68p
2022	51.88p	18,936.56p	0.69p
2023	52.95p	19,326.02p	0.69p
2024	54.01p	19,715.47p	0.71p
2025	55.08p	20,104.93p	0.71p
2026	56.15p	20,494.38p	0.72p
2027	57.22p	20,883.84p	0.73p
2028	58.28p	21,273.29p	0.73p
2029	59.35p	21,662.75p	0.74p
2030	60.42p	22,052.20p	0.75p
2031	61.48p	22,441.66p	0.76p
TOTAL	***1,067.09***	***389,489.31***	*p (proyección)

Adaptado de: (Castro, 2019)

Se tomaron en cuenta factores como, reciclaje, aprovechamiento y compostaje, ya que en la presente fecha el relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo presenta proyectos de aprovechamiento de residuos orgánicos a pequeña escala, estos residuos fueron tomados en consideración al momento de los cálculos, para de esta manera tener un valor exacto de la cantidad de RSM que son degradados en el relleno sanitario, dando como resultado un aprovechamiento del 2.07%, reduciendo la cantidad de residuos sólidos totales de 389,489.31 toneladas a 381,425.27 toneladas, teniendo solamente un 97.93% del total de residuos sólidos que realmente serán aprovechados para el cálculo de generación de electricidad, como se pueden observar en la tabla 7 y con mayor detalle en el *Anexo 1*.

Tabla 7. *Cantidad total de RSM que serán aprovechados*

	Cantidad total de RSM que ingresarán al relleno sanitario	***Cantidad total de RSM que serán aprovechados por el relleno sanitario***	***Cantidad total de RSM que serán utilizados para la estimación de producción de biogás***
Toneladas	389,489.27	8,064	381,425.27
%	100	2.07	97.93

Por otra parte, el cálculo de producción de electricidad a partir de los RSM se realizó teniendo en consideración la clasificación porcentual de los mismos, los datos fueron proporcionados por él INEC (2018), en la que se observa una mayor generación en lo que a residuos orgánicos se refiere, con un total del 66.01%, un valor intermedio de cartón de 3.72% y un valor ínfimo en lo que se refiere a madera con un 0,18%, (*figura 4*), según un estudio realizado por Del Consuelo Hernández-Berriel *et al.* (2017), nos expone que el porcentaje de residuos orgánicos en países de Latinoamérica sobrepasan los 60%, ya que no existe una correcta clasificación desde la fuente de origen y tampoco en los rellenos sanitarios que en mucho de los casos no llevan una gestión de residuos sólidos eficiente.

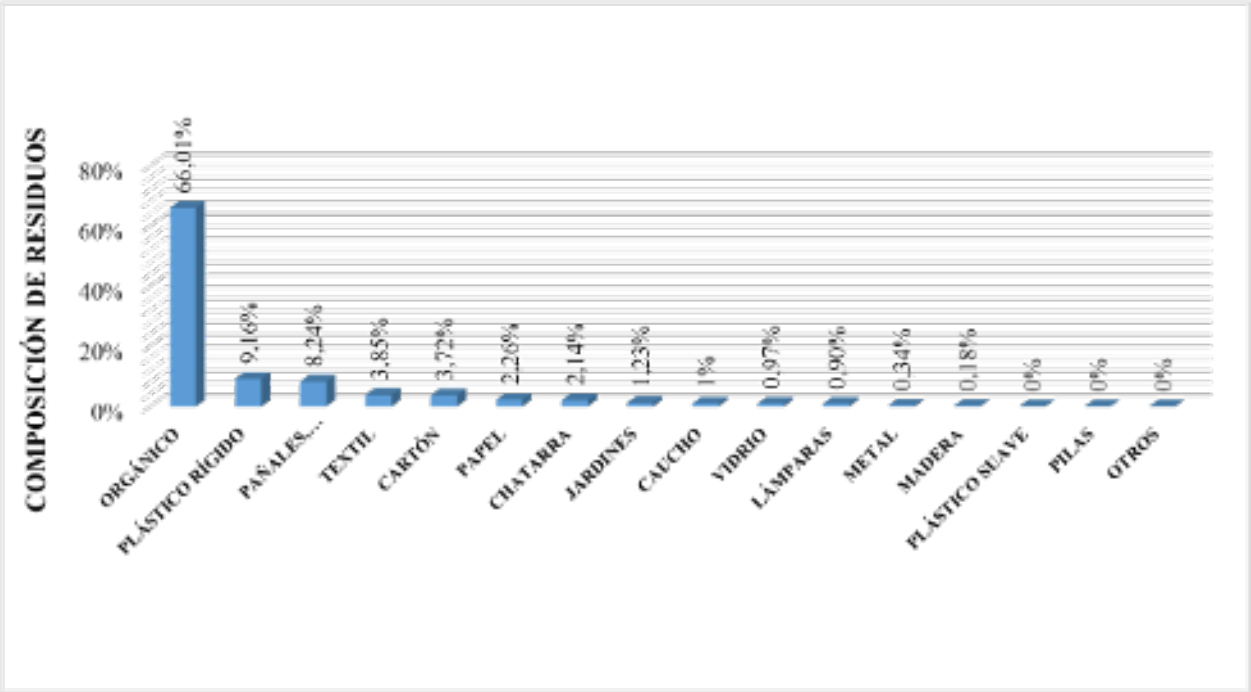


Figura 4: *Composición porcentual de residuos sólidos del relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo*

Adaptado de: *(INEC, 2018)*

4.2. CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE METANO.

4.2.1. Modelo LandGem.

Una vez recopilada y calculada la información inicial, se procedió a estimar la producción del metano del relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo, mediante los dos modelos expuestos con antelación en la metodología (LandGem modificado para Ecuador e IPCC), teniendo como resultado un total de 60,856,563.87m^3/año de los cuales según el modelo de LandGem modificado para Ecuador son recuperables solamente el 50% del total, dándonos un resultado de aprovechamiento de 30,428,281.94 m^3/año de metano (ver con mayor detalle en el *Anexo 2)*, en la figura 5 se puede observar que el pico más alto de producción de gas de vertedero es un año después del cierre esto es debido a que toda la materia orgánica se degradaría para esa fecha por las condiciones del relleno sanitario, el crecimiento exponencial en los primeros años de funcionamiento, es debido a la cantidad de materia orgánica que ingresa en el relleno sanitario comportamiento similar al estudio realizado por Biglari *et al.* (2017), donde el pico más alto es dos años después del cierre y la producción de gas de vertedero se reduce exponencialmente para los años siguientes.

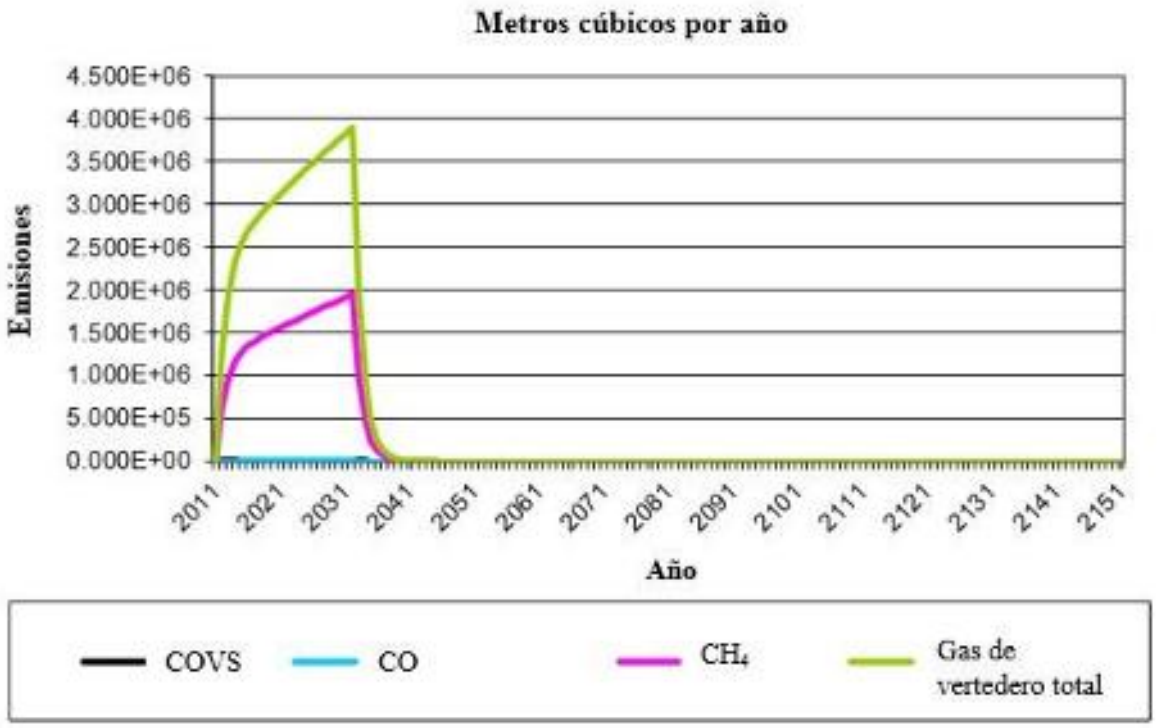


Figura 5. *Cantidad de gas de vertedero total y cantidad de metano recuperable (modelo LandGem modificado para Ecuador.)*

En base a los valores obtenidos se realizó una comparación con los resultados de otros estudios en distintos países, donde se utilizaron metodologías similares aplicadas en el presente estudio, con la pequeña variación que, en algunos casos específicos, se utilizó el modelo de LandGem

de EEUU, y en otros, el modelo de LandGem adaptado para el país donde se lo aplico, teniendo como resultado que según un estudio realizado por Pérez, Saavedra, y Huaman (2018) en la ciudad de Juliaca San Román, Puno, Perú se obtuvo un valor de 29,925,493,1 m^3/año resultado muy parecido al del presente estudio (30,428,281.94 m^3/año), ya que existe solamente una diferencia de 502,788.84 m^3/año, esto se debe a la cantidad de materia orgánica y la ppc (*tabla 8*).

En el estudio realizado por Escamilla-García, Jiménez-Castañeda, Fernández-Rodríguez, y Galicia-Villanueva (2020) en la ciudad de Oaxaca, México utilizando el modelo de LandGem modificado para México, se obtiene un total de 43,645,824 m^3/año, valor superior al propuesto en este estudio (30,428,281.94 m^3/año), ya que su diferencia es de 13,217,542.06 m^3/año, debido a que el estudio fue realizado para un relleno sanitario de mayores proporciones al de la Mancomunidad Patate-Pelileo y la población es superior (*tabla 8*).

De igual forma en un estudio realizado por Nicola (2017) en la parroquia Santa Rosa, Ambato, Ecuador utilizando el modelo LandGem modificado para Ecuador, se obtiene un total de 2´890,800 m3/año, valor bastante inferior al del presente estudio ya que este da como resultado un total de 30,428,281.94 m^3/año, de tal manera que se puede observar una diferencia de 27´537,482.94 m^3/año esto se da debido a que en la parroquia Santa Rosa presenta una menor población, PPC y menor cantidad de desechos orgánicos siendo este último de gran relevancia en cuanto a obtención del metano se refiere (*tabla 8*)

Tabla 8. *Estudios de producción estimada de metano con el modelo de LandGem*

Ciudad - País	***% Población***	***Ppc***	***Modelo empelados***	***Producción de CH_4 ión (m^3/año)***	***Referencia orgánicos***
Juliaca, San Román, Puno, Perú	225,146	0.72	LandGEM, versión 3.02	29,925,493.1	Pérez, Saavedra, y Huaman (2018) Escamilla-García, Jiménez-

Oaxaca, México	3,967,889	.41	51.3	LandGEM modificada para México.	3,645,824	Castañeda, Fernández-Rodríguez, y Galicia-Villanueva (2020)
Santa Rosa, Ambato, Ecuador	70,366	0.63	57.6	LandGem modificada para Ecuador	2´890,800	Nicola (2017)

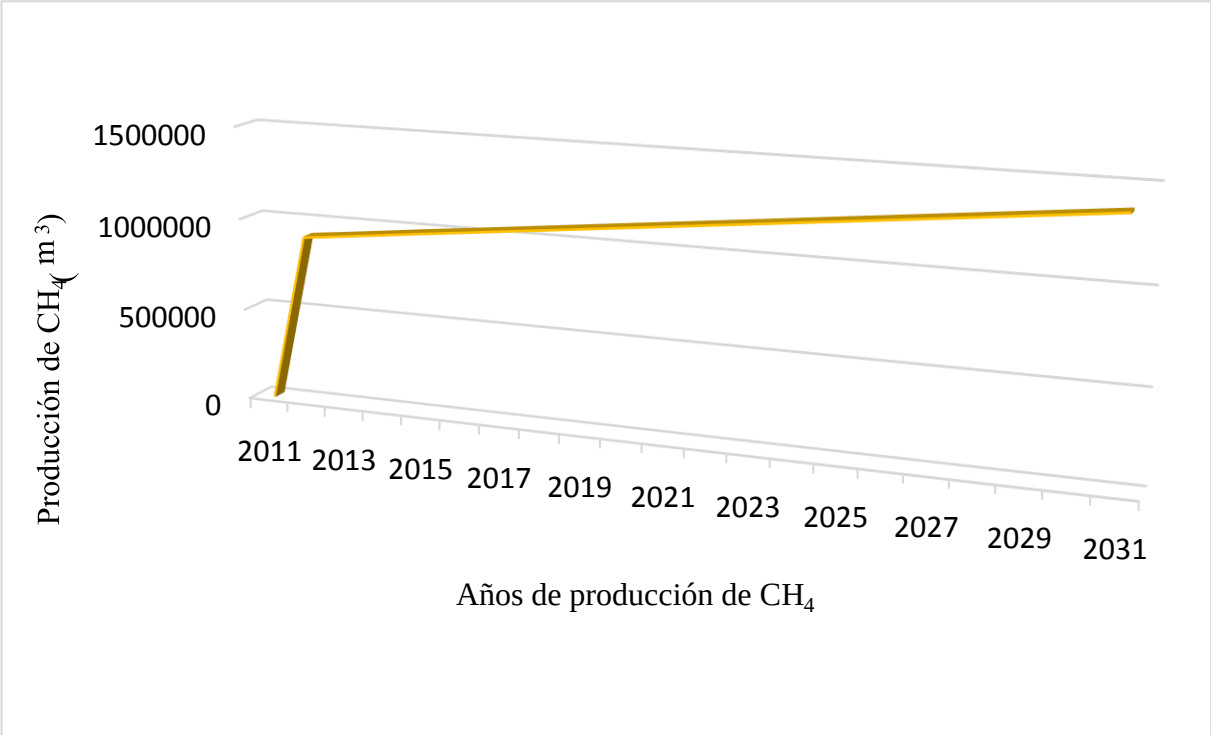
4.2.2. Modelo IPCC

Una vez aplicada la metodología expuesta para la producción estimada de metano de IPCC (*Ecuación 6*), se obtuvieron valores para cada una de las variables y por cada uno de los años de funcionamiento hasta la fecha, así como también los años proyectados hasta el cierre del relleno sanitario de la mancomunidad Patate-Pelileo, dando como resultado final una producción de 22,817,359.62 m^3/año de metano (*tabla 8*), con un crecimiento progresivo año tras año como se puede observar en la figura 6.

Tabla 9. *Detalles de los valores obtenidos para cada una de las variables para la metodología de IPCC (Ecuación 6).*

AÑOS	***RSMT***	***RSMF***	***MCF***	***DOC***	***DOCF***	***F***	***CH^4 t/año***	***CH_4 m3/año***
2011	14,662.05	0.0000	0	0	0	0	0	0
2012	15,038	0.9745	0.7	0.11363	0.77	0.5	598.34	910,712.57
2013	15,421.25	0.9751	0.7	0.11363	0.77	0.5	613.99	934,530.68
2014	15,815.45	0.9757	0.7	0.11363	0.77	0.5	630.08	959,029.31
2015	16,220.6	0.9763	0.7	0.11363	0.77	0.5	646.62	984,208.45
2016	16,599.83	0.9769	0.7	0.11363	0.77	0.5	662.11	1,007,776.73
2017	16,989.29	0.9774	0.7	0.11363	0.77	0.5	678.01	1,031,980.78
2018	17,378.74	0.9779	0.7	0.11363	0.77	0.5	693.91	1,056,184.20
2019	17,768.2	0.9784	0.7	0.11363	0.77	0.5	709.82	1,080,388.25
2020	18,157.65	0.9789	0.7	0.11363	0.77	0.5	725.72	1,104,591.68
2021	18,547.11	0.9793	0.7	0.11363	0.77	0.5	741.62	1,128,795.73
2022	18,936.56	0.9797	0.7	0.11363	0.77	0.5	757.52	1,152,999.15
2023	19,326.02	0.9801	0.7	0.11363	0.77	0.5	773.42	1,177,203.20
2024	19,715.47	0.9805	0.7	0.11363	0.77	0.5	789.32	1,201,406.63

2025	20,104.93		0.9809	0.7	0.11363		0.77	0.5	805.23	1,225,610.67
2026	20,494.38		0.9813	0.7	0.11363		0.77	0.5	821.13	1,249,814.10
2027	20,883.84		0.9816	0.7	0.11363		0.77	0.5	837.03	1,274,018.15
2028	21,273.29		0.9819	0.7	0.11363		0.77	0.5	852.93	1,298,221.58
2029	21,662.75		0.9823	0.7	0.11363		0.77	0.5	868.83	1,322,425.62
2030	22,052.2	0.9826	0.7	0.11363		0.77	0.5	884.74	1,346,629.05	
										1,370,833.10
TOTAL										***22,817,359.62***



2031	22,441.66	0.9829	0.7	0.11363		0.77	0.5	900.64

Figura 6. *Producción de CH_4, según el modelo de IPCC*

Los resultados obtenidos para este modelo fueron comparados con los resultados expuestos en la investigación de Imbiriba *et al.* (2020), donde se obtuvo un total 756,468,797.6 m^3/año de CH_4 cifra muy superior a la resultante de este trabajo (22,817,359.62 m^3/año) debido a que el relleno sanitario de la investigación de Imbiriba tiene una superficie 10 veces mayor al relleno sanitario de la mancomunidad de Patate-Pelileo, la población estudiada es de más de 2 millones y su ppc es 0.74 kg/hab*día (tabla 10).

Según un estudio realizado por Armenta-Rivas, Sierra-Camargo, y Vélez-Pereira (2017), en la ciudad de Santa Marta, Colombia, se obtuvo un valor de 4,488,584.47 m^3/año de CH_4 resultado menor en comparación al presente estudio para el modelo de IPCC (22,817,359.62 m^3/año), debido a la presencia de un sistema de recolección diferenciada con alta eficiencia, tasas de materia orgánica menor del 39.7% y una ppc 0.83 kg/hab*día. (tabla 10).

Tabla 10. *Estudios de producción estimada de metano con el modelo de IPCC*

Ciudad - País	***Población***	***Ppc (kg/hab*día)***	***% orgánicos***	***Modelo empelado***	***Producción de CH_4 (m^3/año)***	***Referencias***
Belem, Brasil	2,090,000	0.74	69	IPCC	756,468,797.6	Imbiriba *et al.* (2020)
Santa Marta, Colombia	449,060	0.83	39.7	IPCC	22,817,359.62	Armenta-Rivas, Sierra-Camargo, y VélezPereira (2017)

Como se puede observar en la figura 7, la producción de CH_4 para cada uno de los modelos se encuentra presente hasta el año del cierre, sin embargo el modelo de LandGem modificado para Ecuador muestra una mayor producción de CH_4 que el modelo de IPCC, esto se debe a que el modelo de LandGem según un estudio realizado por Mendoza, Darás, Altabella, Martínez, y Aranda (2017) tiene una menor tasa de confiabilidad, ya que no toma en consideración parámetros intrínsecos de los rellenos sanitarios, si no que más bien toma los parámetros

preestablecidos para cada una de sus variables, a diferencia del modelo de IPCC que según el mismo estudio ratifica su mayor confiabilidad al momento realizar este tipo de cálculo.

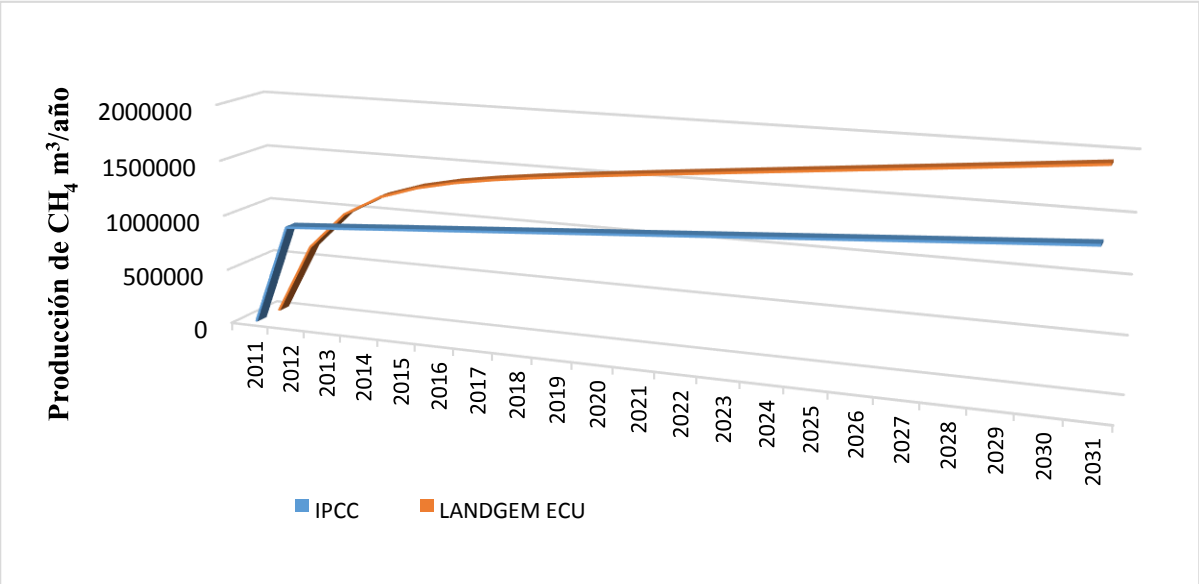


Figura 7. *Producción de metano según el modelo de LandGem modifica e IPCC*

4.3. ESTIMACIÓN DE ELECTRICIDAD PRODUCIDA A PARTIR DEL METANO.

El potencial de electricidad se calculó en base a la cantidad total de metano producido, tanto para el modelo de IPCC como para el modelo de LandGem modificado para Ecuador. Al igual que el modelo de IPCC, la estimación de electricidad es un método matemático que se basa en una ecuación (*Ecuación* ***6),*** para la cual se buscó valores |para cada una de las variables, las cuales se detallan en la tabla 11.

Tabla 11. *Valores asignados para cada una de las variables necesarias para el cálculo del potencial de electricidad en virtud de cada modelo.*

Modelo	***Cantidad de metano del relleno sanitario BCR (m^3/año)***	***Menor valor de calentamiento de metano LHV (MJ/m^3)***	***Tasa de calor TC (kWh/MJ)***	***Carga parasitaria CP***	***Factor de disponibilidad del motor FD***
IPCC	22´817,359.62	18	11	0.06	0.94
LandGem (modificado)	30´428,281.94	18	11	0.06	0.94

Se obtuvo como resultado un total de 32´991,412.9 kWh/año para el modelo del IPCC, y un total de 43´995,976.2 kWh/año, teniendo una diferencia de 11,004,563.4 kWh/año, entre los modelos (*Tabla 12),* y con mayor detalle en el *Anexo 3* y *Anexo 4.*

Tabla 12. *Resultados obtenidos de generación de electricidad (kWh/año).*

Modelo	***Cantidad de kWh/año***
IPCC	32´991,412.9
LandGem (modificado)	43´995,976.2

Los datos obtenidos en el presente trabajo se compararon con la investigación realizada por Pérez, Saavedra, y Huaman (2018) el cual ejecutó un estudio similar en la ciudad de Juliaca San Román, Puno, Perú donde obtuvo un valor de 63´151,000 kwh/año siendo este un valor relativamente superior a los obtenidos en el presente estudio, esto se da debido a que en el lugar antes mencionado existe una población mayor la cual genera un porcentaje significativo de materia orgánica la cual influye directamente en la producción de metano y por ende en la generación de energía, sumándole a esto que presentan una mayor PPC.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proceso de la recolección de información primaria es una de las fases más críticas del cálculo de la estimación de electricidad, ya que de esto dependen la correcta estimación y planificación de posibles sistemas a ser implementados, razón por la cual estos deben ser calculados o recolectados con la mayor cautela posible, se recomienda tener en consideración que para cada relleno sanitario existen características únicas, y que en zonas tropicales como el Ecuador, el microclima es un factor con gran influencia al momento de calcular la producción de metano.

Los modelos para la estimación de metano de los rellenos sanitarios 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, sin embargo para obtener resultados realistas, la elección de los parámetros de cada modelo debe ser escogido en dependencia del estado y las características del relleno sanitario, teniendo en consideración que aquel modelo que tome más parámetros relacionados con las cualidades intrínsecas del relleno sanitario será el que más se acerque a la estimación real de generación de metano.

Al comparar los modelos de estimación de metano de IPCC y LandGem modificado para Ecuador, se pudo notar que existe una gran diferencia entre los valores resultantes, esto es debido a que el modelo de IPCC a diferencia de LandGem, usa más parámetros característicos del relleno sanitario, razón por la cual, varios autores toman este modelo como preferido al momento de realizar un análisis de estimación de metano.

La generación de electricidad a partir de las emisiones de metano de un relleno sanitario es una energía alternativa, altamente fiable y renovable, con muchos impactos positivos, entre ellos la

reducción de las emisiones, la reutilización de metano que es un gas altamente energético, la alta tasa de generación de energía, y el aprovechamiento de los recursos presentes en un relleno sanitario.

Los resultados obtenidos son estimaciones de modelos matemáticos, para contrastar sus resultados, se deben realizar mediciones experimentales in situ, pues en los rellenos sanitarios, los problemas de compactación, de presencia de poca cobertura diaria, pueden incidir en la cantidad de generación de metano. La potencial energía que se puede generar es atractiva, pero para considerar la implementación de proyectos de esta índole es necesario realizar estudios complementarios, como; evaluaciones técnicas, evaluaciones económicas, eficiencia de procesos, etc. Parte del éxito futuro de la captación de biogás depende de la operación del relleno, desde la conformación de las celdas, la instalación de colectores y tuberías de gases hasta el sistema de captación, estos criterios deben contemplarse antes de comenzar la operación de la celda.

6. REFERENCIAS

Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P., & Ojeda-Benítez, S. (2011). Potencial de producción eléctrica del biogás generado en un relleno sanitario. *Ingeniería e investigación, 31*(3), 56-65.

Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P., & Ojeda-Benítez, S. (2013a). Seasonal analysis of the generation and composition of solid waste: potential use—a case study. *Environmental Monitoring and Assessment, 185*(6), 4633-4645. doi:10.1007/s10661012-2893-5

Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P., & Ojeda-Benítez, S. (2013b). Seasonal analysis of the generation and composition of solid waste: potential use a case study. *Environmental Monitoring and Assessment, 185*(6), 4633-4645. doi:10.1007/s10661-012-2893-5

Al-Khatib, I. A., Arafat, H. A., Basheer, T., Shawahneh, H., Salahat, A., Eid, J., & Ali, W. (2007). Trends and problems of solid waste management in developing countries: A case study in seven Palestinian districts. *Waste Management, 27*(12), 1910-1919. doi:10.1016/j.wasman.2006.11.006

Amalia Chusna, N., & Maryono, M. (2018). *(2018) Preliminary evaluation of method to monitor landfills resilience against methane emission.* Conferencia internacional en E3S Web Conf. 31-05006. The 2nd International Conference on Energy, Environmental and Information System (ICENIS 2017).

Andriani, D., & Atmaja, T. D. (2019). The potentials of landfill gas production: a review on municipal solid waste management in Indonesia. *Journal of Material Cycles and Waste Management, 21*(6), 1572-1586. doi:10.1007/s10163-019-00895-5

Armenta-Rivas, M. E., Sierra-Camargo, L. D., & Vélez-Pereira, A. M. (2017). Modelación de la producción de metano en el Relleno Sanitario Parque Ambiental Palangana (Santa Marta). *Ingeniería, investigación y tecnología, 18*(2), 183-192.

Ayeleru, O. O., Okonta, F. N., & Ntuli, F. (2018). Municipal solid waste generation and characterization in the City of Johannesburg: A pathway for the implementation of zero waste. *Waste Management, 79*, 87-97. doi:10.1016/j.wasman.2018.07.026

Aziz, N. I. H. A., Hanafiah, M. M., & Gheewala, S. H. (2019). A review on life cycle assessment of biogas production: Challenges and future perspectives in Malaysia. *Biomass Bioenergy, 122*, 361-374. doi:10.1016/j.biombioe.2019.01.047

Bank, W. (2018). World development indicators: rural environment and land use. Recuperado de http://wdi.worldbank.org/table/3.1

Biglari, H., Rahdar, S., Baneshi, M. M., Ahamadabadi, M., Saeidi, M., Narooie, M. R., . . . Khaksefidi, R. J. J. o. G. P. T. (2017). Estimating the amount of methane gas generated from the solid waste using the land GEM software, sistan and baluchistan. *Journal of Global Pharma Technology., 9*(3), 35-41.

Bolan, N., Thangarajan, R., Seshadri, B., Jena, U., Das, K., Wang, H., & Naidu, R. (2013). Landfills as a biorefinery to produce biomass and capture biogas. *Biores Technol, 135*. doi:10.1016/j.biortech.2012.08.135

Carmona, J., Bolívar, D., & Giraldo, L. (2005). El gas metano en la producción ganadera y alternativas para medir sus emisiones y aminorar su impacto a nivel ambiental y productivo. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias, 18*(1), 49-63.

Castillo, M. (2012). Consultoría para la realización de un estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos domésticos y asimilables a domésticos para el Distrito Metropolitano de Quito. *Secretaría de Ambiente de Quito. EMASEO, Quito-Ecuador*.

Castro, P. A. (2019). Estudio de Impacto Ambiental ex- post para el "Relleno Sanitario EMMAIT-EP", provincia de Tungurahua, Cantones Pelileo y Patate . Euador *Ingeniería Geólogica, Minera y Ambiental Seguridad Y Salud Ocupacional*.

Cervi, R. G., Esperancini, M. S., & Bueno, O. d. C. (2011). Viabilidad económica de la utilización de biogás para la conversión en energía eléctrica. *Información tecnológica, 22*(4), 3-14.

Chiemchaisri, C., & Visvanathan, C. (2008). Greenhouse gas emission potential of the municipal solid waste disposal sites in Thailand. *J Air Waste Manag Assoc, 58*(5), 629635. doi:10.3155/1047-3289.58.5.629

Darquea, D. G. P. (2018). Estudio de emisiones contaminantes utilizando combustibles locales. *INNOVA, 3*(3), 23-34.

Davis, G. (2002). *Economic and financial aspects of landfill gas to energy project development in California*. tharwahbata.tk/download/SSrTCe_HPjQC-economic-and-financialaspects-of-landfill-gas-to-energy-project-development-in-california

Del Consuelo Hernández-Berriel, M., Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P., Lima-Morra, R., Eljaiek-Urzola, M., Márquez-Benavides, L., & Buenrostro-Delgado, O. J. R. i. d. c. a. (2017). Generación y composición de los residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 32*, 11-22. doi:10.20937/RICA.2016.32.05.02

Environment, U. (2018). *Waste Management Outlook for Latin America and the Caribbean*. Panama City, Panama: United Nations Environment Programme. Latin America and the Caribbean Office.

EPA. (1996). *Turning a Liability into as asset: A Landfill Gas-to-energy Project Development Handbook* EPA 430-B-96-0004.

Escamilla-García, P. E., Jiménez-Castañeda, M. E., Fernández-Rodríguez, E., & GaliciaVillanueva, S. (2020). Feasibility of energy generation by methane emissions from a landfill in southern Mexico. *Journal of Material Cycles and Waste Management, 22*(1), 295-303. doi:10.1007/s10163-019-00940-3

Fallahizadeh, S., Rahmatinia, M., Mohammadi, Z., Vaezzadeh, M., Tajamiri, A., & Soleimani, H. J. M. (2019). Estimation of methane gas by LandGEM model from Yasuj municipal solid waste landfill, Iran. *6*, 391-398. doi:10.1016/j.mex.2019.02.013

Garg, A., Achari, G., & Joshi, R. C. (2006). A model to estimate the methane generation rate constant in sanitary landfills using fuzzy synthetic evaluation. *Waste Management & Research, 24*(4), 363-375. doi:10.1177/0734242x06065189

Giugliano, M., Grosso, M., & Rigamonti, L. (2008). Energy recovery from municipal waste: A case study for a middle-sized Italian district. *Waste Management, 28*(1), 39-50. doi:10.1016/j.wasman.2006.12.018

Greben, H. A., & Oelofse, S. H. H. (2009). Unlocking the resource potential of organic waste: a South African perspective. *Waste Management & Research, 27*(7), 676-684. doi:10.1177/0734242x09103817

He, P.-J. (2012). Municipal solid waste in rural areas of developing country: Do we need special treatment mode? *Waste Management, 32*(7), 1289-1290. doi:10.1016/j.wasman.2012.03.023

Hernández Sampieri, R. (2015). *Metodología de la Investigación* (6ta ed.). México DF: Mc Graw Hill Interamericana.

Imbiriba, B. C. d. O., Ramos, J. R. d. S., de Sousa Silva, R., Cattanio, J. H., do Couto, L. L., & Mitschein, T. A. (2020). Estimates of methane emissions and comparison with gas mass burned in CDM action in a large landfill in Eastern Amazon. *Waste Management, 101*, 28-34. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.029 INAMHI.

(2015). Anuario Meteorológico. *202012*.

INEC. (2018). Estadisticas de Informacion Ambiental Economica en Gobiernos Autonomos Descentralizados Municipales. *Ecuador en cifras*.

IPCC. (2006). Guidelines for national greenhouse gas inventories. *Task force on national greenhouse gas inventories*.

Johari, A., Ahmed, S. I., Hashim, H., Alkali, H., & Ramli, M. (2012). Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*(5), 2907-2912. doi:10.1016/j.rser.2012.02.005

Kamalan, H., Sabour, M., & Shariatmad, N. (2011). A review on available landfill gas models. *J Environ Sci Technol, 4*, 79-92. doi:10.3923/jest.2011.79.92

Kumar, A., & Samadder, S. R. (2017). A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. *Waste Management, 69*, 407-422. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.046

Kumar, S., Mondal, A. N., Gaikwad, S. A., Devotta, S., & Singh, R. N. (2004). Qualitative assessment of methane emission inventory from municipal solid waste disposal sites: a case study. *Atmospheric Environment, 38*(29), 4921-4929. doi:10.1016/j.atmosenv.2004.05.052

LandGEM. (2005). Landfill Gas Emissions Model (Version version 3.02.). Recuperado de http://www3.epa.gov/ttn/catc/products.html#software

León Castillo, L. A. (2015). *Análisis Económico de la Población. Demografía*. http://hdl.handle.net/10045/45026

López Borreguero, A. (2019). *Los Acuerdos Voluntarios para reducir la contaminación. Acuerdo Voluntario en Mercedes Benz España, para la correcta segregación y reciclaje de los residuos no peligrosos.* (Universidad Nacional de Educación a Distancia (España),

Ludwig, V., Stege, G. A., Engineers, S., & Dávila, J. L. (2009). Manual del Usuario Modelo Colombiano de Biogás. *Phoenix-United States*.

Machado, S. L., Carvalho, M. F., Gourc, J.-P., Vilar, O. M., & do Nascimento, J. C. F. (2009). Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. *Waste*

Management, 29(1), 153-161. doi:10.1016/j.wasman.2008.02.017

Maldonado, L. (2006). Reducción y reciclaje de residuos sólidos urbanos en centros de educación superior. *Redalyc, 10*(1), 59-68.

Martín, S., Marañón, E., & Sastre, H. (2001). Mathematical modelling of landfill gas migration in MSW sanitary landfills. *Waste Management & Research, 19*(5), 425-435. doi:10.1177/0734242x0101900507

Meidiana, C. (2010). Development of waste management practices in Indonesia. *Eur J Sci Res, 40*, 199-210.

Mendoza, F. J. C., Darás, F. G., Altabella, J. E., Martínez, F. R., & Aranda, G. (2017). Emisiones Gaseosas De Un Relleno Sanitario En México. Comparación Con Los Modelos De Generación De Biogás. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 32*, 113-122.

Müller, G. T., Giacobbo, A., dos Santos Chiaramonte, E. A., Rodrigues, M. A. S., Meneguzzi, A., & Bernardes, A. M. (2015). The effect of sanitary landfill leachate aging on the biological treatment and assessment of photoelectrooxidation as a pre-treatment process. *Waste Management, 36*, 177-183. doi:10.1016/j.wasman.2014.10.024

Nicola, G. G. (2017). *Diseño del sistema de recogida, tratamiento y eliminación de residuos sólidos para poblaciones de la zona alta del cantón Ambato, República del Ecuador.* (Universitat Politècnica de València., Recuperado de http://hdl.handle.net/10251/90165.

Noor, Z. Z., Yusuf, R. O., Abba, A. H., Abu Hassan, M. A., & Mohd Din, M. F. (2013). An overview for energy recovery from municipal solid wastes (MSW) in Malaysia scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20*, 378-384. doi:10.1016/j.rser.2012.11.050

Oonk, J., & Boom, A. (1995). *Landfill gas formation, recovery and emissions*: TNO Inst. of Environmetal and Energy Technology.

Pérez, G. B. M., Saavedra, J. J. Q., & Huaman, Y. M. V. (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

Ramos-Ramos, T. P., Guevara-Llerena, D. J., Sarduy-Pereira, L. B., & Diéguez-Santana, K. (2020). Producción más limpia y ecoeficiencia en el procesado del cacao. Un caso de estudio en Ecuador. *Revista Investigación & Desarrollo, 20*(1).

Rondón Toro, E., Szantó Narea, M., Pacheco, J. F., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios. *Repositorio Digital Comisión Económica para América Latina y el Caribe*, *2*, 211.

Scarlat, N., Motola, V., Dallemand, J. F., Monforti-Ferrario, F., & Mofor, L. (2015). Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *50*, 1269-1286. doi:10.1016/j.rser.2015.05.067

Scharff, H., & Jacobs, J. (2006). Applying guidance for methane emission estimation for landfills. *Waste Management*, *26*(4), 417-429. doi:10.1016/j.wasman.2005.11.015

Soto-Cabrera, A. I., Panimboza-Ojeda, A. P., Ilibay-Granda, C. G., Valverde-Lara, C. R., & Diéguez-Santana, K. (2020). Impacto ambiental de la operación del Centro de faenamiento de la ciudad de Puyo, Pastaza, Ecuador. *Prospectiva*, *18*(1), 60-68. doi:https://doi.org/10.15665/rp.v18i1.2101

Soto-Cabrera, A. I., Panimboza-Ojeda, A. P., Ramones-Pinargote, A., Pérez-Martínez, A., Sarduy-Pereira, L. B., & Diéguez-Santana, K. (2020). Huella de carbono en el cultivo de la caña de azúcar. Evaluación agrícola de un caso de estudio de la amazonia ecuatoriana. *Ingenio Magno*, *11*(1), 22-32.

Soto Vilca, M. (2016). *Producción per cápita de residuos sólidos domésticos según factores socioeconómicos de los habitantes del Centro Poblado Mina Rinconada Ananea, San Antonio de Putina, Puno.* (Universidad Nacional del Altiplano, Perú). Recuperado de http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/3527.

Steffens, D. (2013). Lifecycle Cost Considerations When Choosing a Power Generation System. Recuperado de http://www.catpowerplants.com/Media/Downloads/Lifecycle%20Costs%20Article.pdf

Taghipour, H., Amjad, Z., Aslani, H., Armanfar, F., Dehghanzadeh, R. J. J. o. M. C., & Management, W. (2016). Characterizing and quantifying solid waste of rural communities. *18*(4), 790-797.

Thanh, N. P., Matsui, Y., & Fujiwara, T. (2011). Assessment of plastic waste generation and its potential recycling of household solid waste in Can Tho City, Vietnam. *Environmental Monitoring and Assessment*, *175*(1), 23-35. doi:10.1007/s10661-0101490-8

Thompson, S., Sawyer, J., Bonam, R., & Valdivia, J. (2009). Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills. *Waste Management*, *29*(7), 2085-2091.

Thorneloe, S. (2008). *Background Information Document for Updating AP42 Section 2.4 for Estimating Emissions from Municipal Solid Waste Landfills*.

Trancho Bedoya, A. (2018). *Prevención mediante alternativas de gestión sostenible de residuos y aguas residuales en buques de pasaje tipo crucero ; Prevention through sustainable management alternatives for waste and wastewater in cruise passenger ships.* (Universidad de Cantabria, España). Recuperado de http://hdl.handle.net/10902/15476.

Tsai, W. T. (2007). Bioenergy from landfill gas (LFG) in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11*(2), 331-344. doi:https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.01.001

Tungurahua, G. A. D. (2019). Plan de Ordenamiento territorial del cantón Pelileo. *Pelileo*.

Unnikrishnan, S., & Singh, A. (2010). Energy recovery in solid waste management through CDM in India and other countries. *Resources, Conservation and Recycling*, *54*(10), 630640. doi:10.1016/j.resconrec.2009.11.003

USEPA. (2016). *LFG Energy Project Development Handbook*

USEPA. (2017). Landfill and LFG energy project database: project technology options. In *Landfill and LFG energy project database*: USEPA.

Valencia, L. P. U., Moreno, F. L. A., & Rodríguez, J. C. R. (2015). Importancia de las energías renovables en la seguridad energética y su relación con el crecimiento económico. *Revista de investigación agraria y ambiental*, *6*(2), 231-242.

Visarrea Vega, K. S. (2016). *Mancomunidad alternativa financiera y económica válida para la gestión integral de residuos sólidos: casos cantones San Pedro de Pelileo y Patate.* (Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Ecuador). Recuperado de http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/13765.

Zaman, A. U. (2010). Comparative study of municipal solid waste treatment technologies using life cycle assessment method. *International Journal of Environmental Science & Technology*, *7*(2), 225-234. doi:10.1007/BF03326132

7. ANEXOS

Anexo 1. *Cantidad total de RSM que serán aprovechados por años de proyección.*

Años	***Cantidad Total de RSM (t/a)***	***Cantidad de RSM utilizados en el cálculo (t/a)***	***Porcentaje de RSM aprovechados (%)***	***Porcentaje de RSM total que ingresa al relleno sanitario (%)***

2011	14,662.05	14,278.05	2.62	97.38
2012	15,038.00	14,654	2.55	97.45
2013	15,421.25	15,037.25	2.49	97.51
2014	15,815.45	15,431.45	2.43	97.57
2015	16,220.60	15,836.6	2.37	97.63
2016	16,599.83	16,215.83	2.31	97.69
2017	16,989.29	16,605.29	2.26	97.74
2018	17,378.74	16,994.74	2.21	97.79
2019	17,768.20	17,384.2	2.16	97.84
2020	18,157.65	17,773.65	2.11	97.89
2021	18,547.11	18,163.11	2.07	97.93
2022	18,936.56	18,552.56	2.03	97.97
2023	19,326.02	18,942.02	1.99	98.01
2024	19,715.47	19,331.47	1.95	98.05
2025	20,104.93	19,720.93	1.91	98.09
2026	20,494.38	20,110.38	1.87	98.13
2027	20,883.84	20,499.84	1.84	98.16
2028	21,273.29	20,889.29	1.81	98.19
2029	21,662.75	21,278.75	1.77	98.23
2030	22,052.20	21,668.2	1.74	98.26
2031	22,441.66	22,057.66	1.71	98.29

Anexo 2*. Cantidad de metano aprovechable en base al gas de vertedero total (modelo LandGem modificado para Ecuador)*

	Total, de gas de vertedero			***Eficiencia del Sistema de Recolección***	***Metano aprovechable***		
Año	*m3/min*	*m3/hr*	*m3/año*	*%*	*m3/min*	*m3/hr*	*m3/año*
2011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
2012	2.44	146.29	1,281,486.52	0.50	1.22	73.14	640,743.26
2013	5.12	307.20	1,957,991.84	0.50	1.86	111.76	978,995.92
2014	6.09	365.65	2,331,708.25	0.50	2.22	133.09	1,165,854.12
2015	6.67	400.38	2,554,535.78	0.50	2.43	145.81	1,277,267.89
2016	7.06	423.35	2,702,663.84	0.50	2.57	154.26	1,351,331.92
2017	7.33	440.08	2,810,998.06	0.50	2.67	160.45	1,405,499.03
2018	7.56	453.81	2,900,290.81	0.50	2.76	165.54	1,450,145.40
2019	7.77	466.04	2,980,031.91	0.50	2.83	170.09	1,490,015.96
2020	7.96	477.52	3,054,983.04	0.50	2.91	174.37	1,527,491.52
2021	8.14	488.62	3,127,530.72	0.50	2.98	178.51	1,563,765.36
2022	8.33	499.53	3,198,873.80	0.50	3.04	182.58	1,599,436.90
2023	8.51	510.35	3,269,611.78	0.50	3.11	186.62	1,634,805.89
2024	8.69	521.12	3,340,047.15	0.50	3.18	190.64	1,670,023.58
2025	8.86	531.86	3,410,329.85	0.50	3.24	194.65	1,705,164.92
2026	9.04	542.59	3,480,536.86	0.50	3.31	198.66	1,740,268.43
2027	9.22	553.32	3,550,705.02	0.50	3.38	202.67	1,775,352.51
2028	9.40	564.04	3,620,854.58	0.50	3.44	206.67	1,810,427.29
2029	9.58	574.76	3,690,993.92	0.50	3.51	210.67	1,845,496.96

2030	9.76	585.48	3,761,129.03	0.50	3.58	214.68	1,880,564.51	
			3,831,261.12					1,915,630.56
TOTAL			***60,856,563.87***					***30,428,281.94***
2031	9.94	596.20	0.50	3.64	218.68			

Anexo 3. *Resultado total de la cantidad de electricidad potencial generada por años de proyección, a partir de la producción de metano para el modelo de LandGem modificado para Ecuador.*

AÑO	***BRC (m3/año)***	***LHV (MJ/m3)***	***TC (kWh / MJ)***	***CP***	***FD***		***EAG (kWh/año)***
2012		640,743.2607	18	11	0.06	0.94	
		926,444.8557					
2013		978,995.9181	18	11	0.06	0.94	
		1,415,521.298					
2014		1,165854.123	18	11	0.06	0.94	
		1,685,697.878					
2015		1,277,267.888	18	11	0.06	0.94	
		1,846,790.027					
2016		1,351,331.919	18	11	0.06	0.94	
		1,953,878.537					
2017		1,405,499.03	18	11	0.06	0.94	2,032,198.27
2018		1,450,145.404	18	11	0.06	0.94	
		2,096,752.057					
2019		1,490,015.956	18	11	0.06	0.94	
		2,154,400.525					
2020		1,527,491.518	18	11	0.06	0.94	2,208,586.1
2021		1,563,765.362	18	11	0.06	0.94	
		2,261,034.121					
2022		1,599,436.902	18	11	0.06	0.94	
		2,312,611.276					
2023		1,634,805.891	18	11	0.06	0.94	
		2,363,750.976					
2024		1,670,023.577	18	11	0.06	0.94	
		2,414,671.908					
2025		1,705,164.925	18	11	0.06	0.94	
		2,465,482.463					
2026		1,740,268.431	18	11	0.06	0.94	
		2,516,238.304					
2027		1,775,352.509	18	11	0.06	0.94	
		2,566,966.053					
2028		1,810,427.29	18	11	0.06	0.94	2,617,680.36
2029		1,845,496.96	18	11	0.06	0.94	
		2,668,387.277					

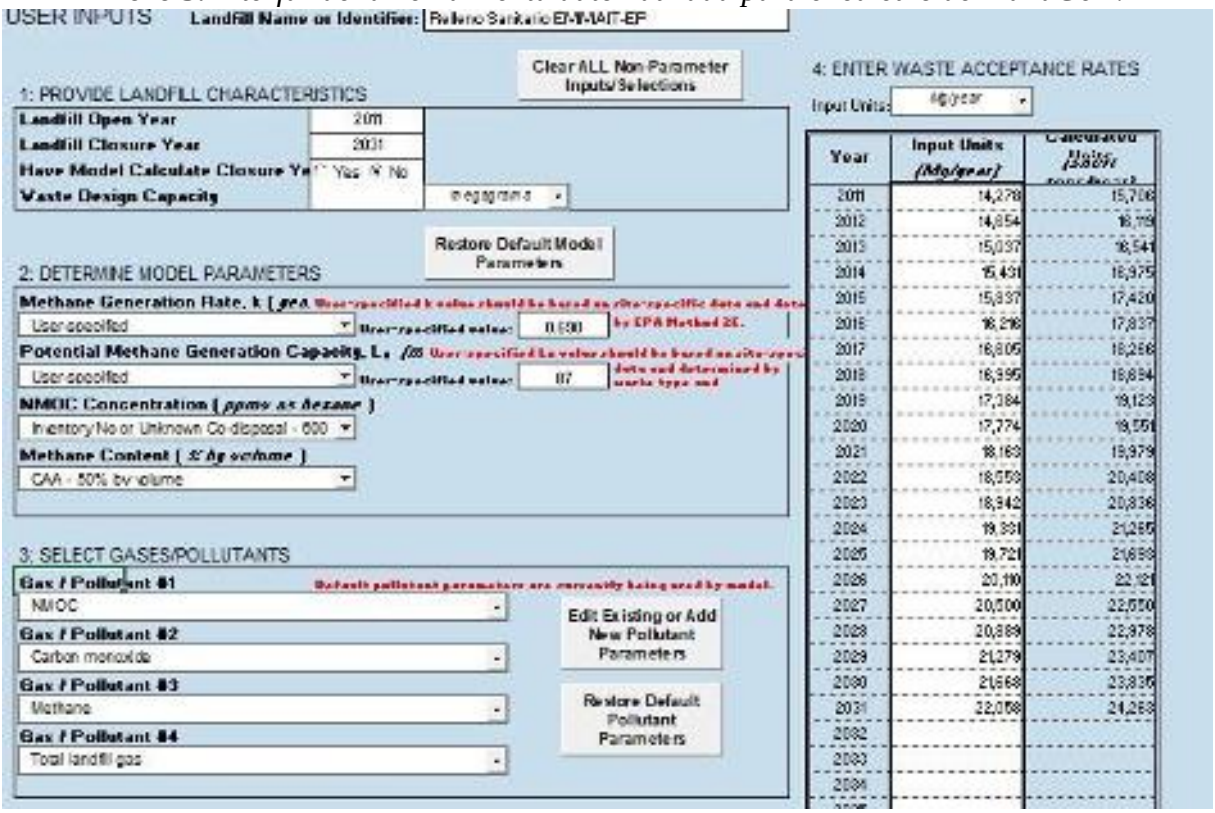
2030		1,880,564.515	18	11	0.06	0.94		
		2,719,091.135						
	1,915,630.56							2,769,792.811
TOTAL	30,428,281.94							43,995,976.23
2031		18	11	0.06	0.94			

Anexo 4. *Resultado total de la cantidad de electricidad potencial generada por años de proyección, a partir de la producción de metano para el modelo de IPCC.*

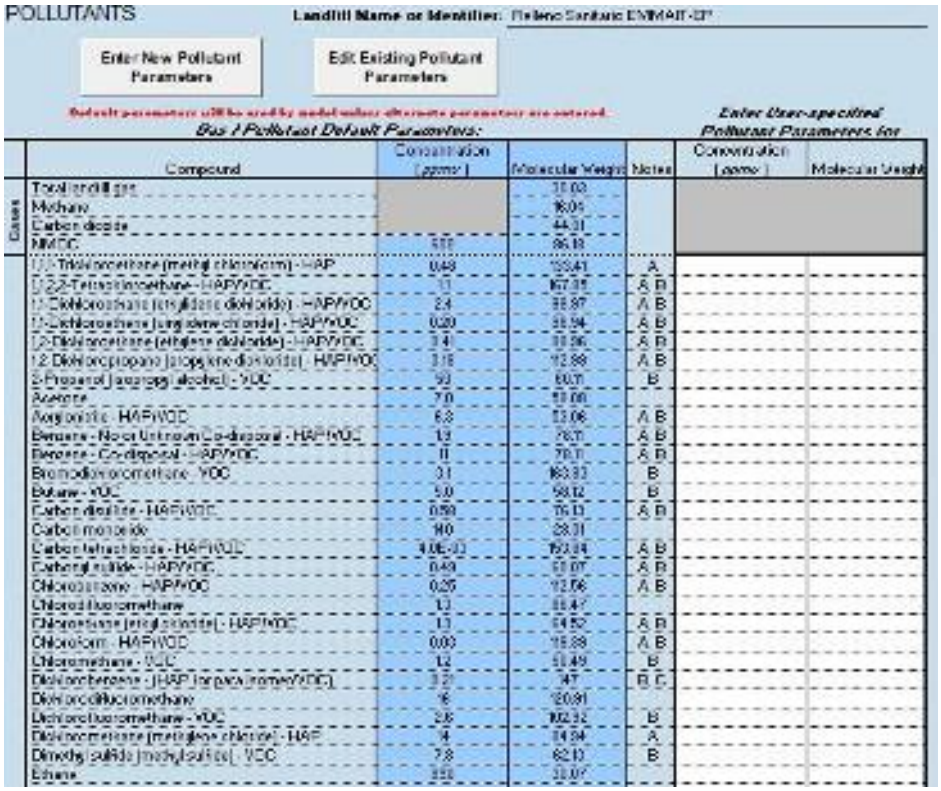
AÑO	***BRC (m3/año)***	***LHV (MJ/m3)***	***TC (kWh / MJ)***	***CP***	***FD***	***EAG (kWh/año)***
2012	910,712.57	18	11	0.06	0.94	1,316,791.024
2013			934,530.68	18	11	0.06	0.94	1,351,229.414
2014			959,029.31	18	11	0.06	0.94	1,386,651.757
2015			984,208.45	18	11	0.06	0.94	1,423,058.055
2016			1,007,776.73	18	11	0.06	0.94	1,457,135.212
2017			1,031,980.78	18	11	0.06	0.94	1,492,131.625
2018			1,056,184.20	18	11	0.06	0.94	1,527,127.139
2019			1,080,388.25	18	11	0.06	0.94	1,562,123.552
2020			1,104,591.68	18	11	0.06	0.94	1,597,119.066
2021			1,128,795.73	18	11	0.06	0.94	1,632,115.479
2022			1,152,999.15	18	11	0.06	0.94	1,667,110.993
2023			1,177,203.20	18	11	0.06	0.94	1,702,107.405

2024		1,201,406.63	18	11	0.06	0.94
		1,737,102.92				
2025		1,225,610.67	18	11	0.06	0.94
		1,772,099.332				
2026		1,249,814.10	18	11	0.06	0.94
		1,807,094.846				
2027		1,274,018.15	18	11	0.06	0.94
		1,842,091.259				
2028		1,298,221.58	18	11	0.06	0.94
		1,877,086.773				
2029		1,322,425.62	18	11	0.06	0.94
		1,912,083.186				
2030		1,346,629.05	18	11	0.06	0.94
		1,947,078.7				
	1,370,833.10					1,982,075.113
TOTAL	***22,817,359.62***					***32,991,412.85***
2031		18	11	0.06	0.94	

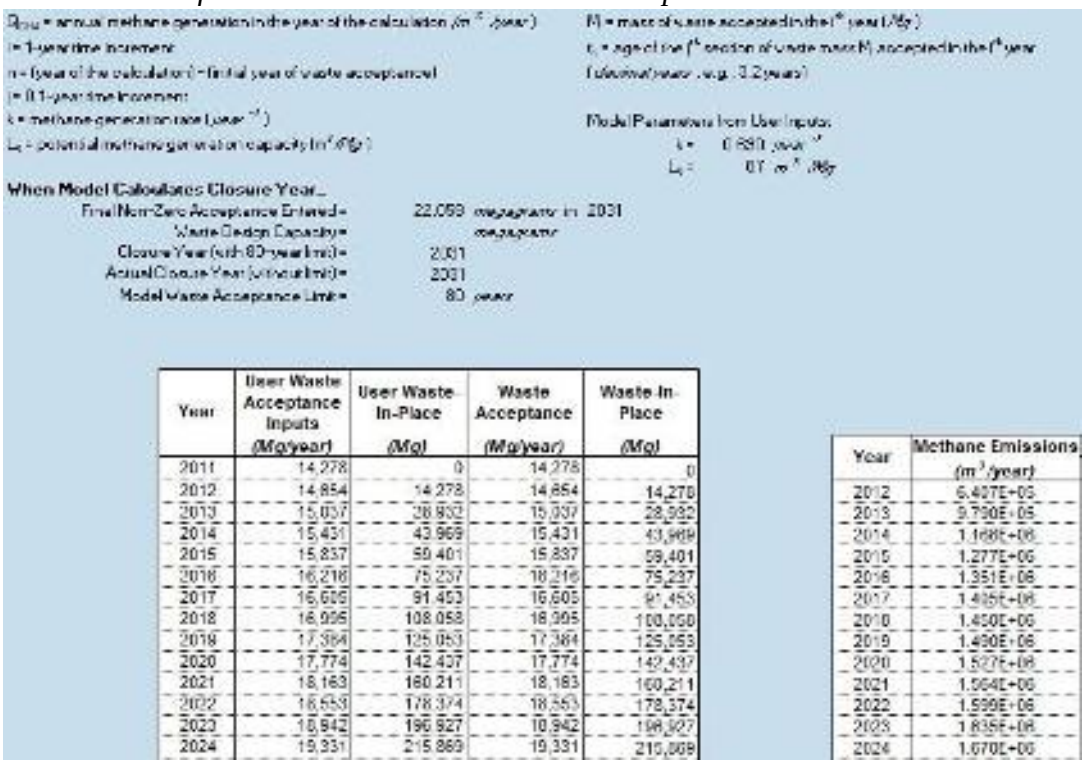
Anexo 5. *Interfaz de la herramienta automatizada para el cálculo del LandGem.*



Anexo 6. *Interfaz de la herramienta automatizada para el cálculo del LandGem.*



Anexo 7. *Interfaz de la herramienta automatizada para el cálculo del LandGem.*



Anexo 8. *Interfaz de la herramienta automatizada para el cálculo del LandGem.*

RESULTS Landfill Name or Identifier: Relleno Sanitario SINAT-SP

Closure Year (with 80-year limit) = 2031

Methane = 50 % by volume

Please choose a third unit of measure to represent all of the emission rates below.

User-specified Unit: short tons/year

Eje Vertical (Valor) Líneas de división p

Year	Waste Accepted		Waste-in-Place		NMOC			Carbon monoxide		
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)	(Mg/year)	(m^3/year)	(short tons/year)	(Mg/year)	(m^3/year)	(short tons/year)
2011	14,278	15,796	0	0	0	0	0	0	0	0
2012	14,654	16,119	14,278	15,796	2.756E+00	7.888E+02	3.032E+00	2.099E-01	1.794E+02	2.299E-01
2013	15,037	16,541	28,932	31,825	4.211E+00	1.175E+03	4.632E+00	3.194E-01	2.741E+02	3.513E-01
2014	15,431	16,975	43,969	48,366	5.015E+00	1.399E+03	5.516E+00	3.803E-01	3.264E+02	4.183E-01
2015	15,837	17,420	59,401	65,341	5.494E+00	1.533E+03	6.043E+00	4.166E-01	3.576E+02	4.583E-01
2016	16,216	17,837	75,237	82,761	5.813E+00	1.622E+03	6.394E+00	4.408E-01	3.784E+02	4.849E-01
2017	16,605	18,266	91,453	100,598	6.046E+00	1.687E+03	6.653E+00	4.585E-01	3.935E+02	5.043E-01
2018	16,995	18,694	108,058	118,864	6.238E+00	1.740E+03	6.861E+00	4.730E-01	4.060E+02	5.203E-01
2019	17,384	19,123	125,053	137,559	6.439E+00	1.796E+03	7.083E+00	4.863E-01	4.172E+02	5.347E-01
2020	17,774	19,551	142,437	156,681	6.573E+00	1.833E+03	7.227E+00	4.963E-01	4.277E+02	5.481E-01
2021	18,163	19,979	160,211	176,232	6.726E+00	1.877E+03	7.399E+00	5.101E-01	4.379E+02	5.611E-01
2022	18,553	20,408	178,374	196,212	6.883E+00	1.919E+03	7.565E+00	5.217E-01	4.478E+02	5.739E-01
2023	18,942	20,836	196,927	216,619	7.032E+00	1.962E+03	7.735E+00	5.333E-01	4.577E+02	5.866E-01
2024	19,331	21,265	215,869	237,456	7.183E+00	2.004E+03	7.902E+00	5.448E-01	4.676E+02	5.992E-01
2025	19,721	21,693	235,200	258,720	7.335E+00	2.048E+03	8.065E+00	5.562E-01	4.774E+02	6.119E-01
2026	20,110	22,121	254,921	280,413	7.486E+00	2.088E+03	8.234E+00	5.677E-01	4.873E+02	6.245E-01
2027	20,500	22,550	275,032	302,535	7.636E+00	2.130E+03	8.403E+00	5.791E-01	4.971E+02	6.370E-01
2028	20,889	22,978	295,531	325,085	7.787E+00	2.173E+03	8.566E+00	5.996E-01	5.069E+02	6.496E-01
2029	21,279	23,407	316,421	348,063	7.935E+00	2.215E+03	8.732E+00	6.023E-01	5.167E+02	6.622E-01
2030	21,668	23,835	337,699	371,469	8.089E+00	2.257E+03	8.895E+00	6.134E-01	5.266E+02	6.748E-01
2031	22,058	24,263	359,368	395,304	8.243E+00	2.299E+03	9.064E+00	6.249E-01	5.364E+02	6.874E-01