

Propuesta para el aprovechamiento de gas metano generado en el Relleno Sanitario de la Mancomunidad de Patate-Pelileo, Provincia Tungurahua.

Proposal for the utilization of methane gas generated at the Patate-Pelileo Joint Authority Landfill, Tungurahua Province.

Milena Ibeth Guato Chugcho¹, Alex Ariel Suárez Castillo¹, Jessica Alexandra Machado Cuzco¹

<https://doi.org/10.59410/PREPRINT-UEA-vAMB2324ep12-67> 

Resumen

El presente artículo con el objetivo de generar una propuesta para un sistema de captura y aprovechamiento de gas metano emitido en el Centro de Gestión Patate-Pelileo con el propósito de mitigar el impacto ambiental y promover la sostenibilidad energética. La metodología se basó en un enfoque mixto de tipo descriptivo que permitió recolectar la información pertinente para obtener datos que contribuyan a determinar las tecnologías innovadoras de captura de gas metano considerando factores como la viabilidad técnica, económica y ambiental, estimar y cuantificar de la emisión de gas metano por medio del Modelo LandGEM y establecer una propuesta de aprovechamiento de gas metano. Los resultados indicaron que actualmente existen varias tecnologías que permiten capturar el gas metano y transformarlo en energía, actualmente en el relleno sanitario se identificó la presencia de 3'387.798 kg de total de desechos anuales, los cuales generan 1'743.566 m³ de metano al año. Con base a estos datos se propone realizar una adaptación para realizar un proceso de tratamiento de biogás para obtener la generación de energía eléctrica en el centro de relleno sanitario el cual proporcionaría 287,03 MWh electricidad anual, beneficiando de esta manera al mismo centro en términos económicos, disminuyendo la contaminación ambiental y contribuyendo al buen vivir de la población del cantón y sus alrededores. Se concluye que el tratamiento de biogás y la generación de energía será beneficioso para obtener energía renovable y dar una solución ambientalmente sostenible a la comunidad.

Palabras clave Abstract

Tratamientos, energía renovable, contaminación atmosférica, biogás

This article is developed with the objective of generating a proposal for a system for capturing and using methane gas emitted in the Patate-Pelileo Management Center with the purpose of mitigating the environmental impact and promoting energy sustainability. The methodology was based on a mixed descriptive approach that allowed pertinent information to be collected to obtain data that contribute to determining innovative methane gas capture technologies, considering factors such as technical, economic and environmental feasibility, estimating and quantifying the emission of methane gas through the LandGEM Model and establish a proposal for the use of methane gas. The results indicated that there are currently several technologies that allow methane gas to be captured and transformed into energy. Currently, the presence of 3,387,798 kg of total annual waste was identified in the landfill, which generates 1,743,566 m³ of methane per year. Based on these data, it is proposed to carry out an adaptation to carry out a biogas treatment process to obtain the generation of electrical energy in the sanitary landfill center, which would provide 287.03 MWh of annual electricity, thus benefiting the same center in terms economic, reducing environmental pollution and contributing to the good life of the population of the canton and its surroundings. It is concluded that the treatment of biogas and the generation of energy will be beneficial to obtain renewable energy and provide an environmentally sustainable solution to the community.

Keywords

Treatments, renewable energy, atmospheric pollution, biogas.

Direcciones ¹Universidad Estatal Amazónica, Ecuador. Pastaza, Ecuador. Email: mi.guatoc@uea.edu.ec, aa.suarezc@uea.edu.ec, ja.machadoc@uea.edu.ec
Autor para la correspondencia Milena Ibeth Guato Chugcho. Universidad Estatal Amazónica, Ecuador. Pastaza, Ecuador. Email: mi.guatoc@uea.edu.ec
Cómo citar GUATO CHUGCHO, Milena Ibeth, SUÁREZ CASTILLO, Alex Ariel and MACHADO CUZCO, Jessica Alexandra 2026. Propuesta para el aprovechamiento de gas metano generado en el Relleno Sanitario de la Mancomunidad de Patate-Pelileo, Provincia Tungurahua.. PrePrint UEA. Vol. AMB2324. p. ep12–67. <https://doi.org/10.59410/PREPRINT-UEA-vAMB2324ep12-67>

Editores Académicos Mario Javier Barrera Castro

Editorial Editorial de la Universidad Estatal Amazónica 2026

Copyright Derechos de autor 2026 | PrePrint UEA. 
Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.
Los autores del artículo autorizan a la RACYT a que este artículo sea compartido bajo las condiciones de la Licencia Creative Commons 4.0 (CC-BY 4.0).

1. Introducción

En los últimos años los impactos generados por los rellenos sanitarios han ocasionado un interés a nivel mundial. Ante esta importancia, varios países han creado proyectos y normativas para proteger el ambiente, es por ello que en Madrid España se planteó un estudio para generar biogás a través de materiales para reducir residuos, lo que produce emisiones de metano a la atmósfera, por otra parte, “el Parlamento

Europeo determinó regulaciones y medidas direccionadas a proteger el medio ambiente por medio de la disminución de impactos y una apropiada gestión de residuos”(Quevedo y Rodríguez 2022, 90-98).

A nivel mundial, “la iniciativa Global de Metano (GMI) es un proyecto dirigido a disminuir las emisiones globales de metano y promover la reducción y aprovechar el metano como una valiosa fuente de energía limpia”(Iniciativa Global de Metano 2011, 1). Este organismo ha establecido una red

que incluye gobiernos asociados, sectores privados, públicos y organizaciones no gubernamentales con el objetivo de diseñar estrategias para avanzar con la implementación del proyecto para reducir el metano en los países colaboradores.

En este mismo sentido, el aprovechamiento del gas metano a nivel global es un tema importante debido a sus implicaciones en la atenuación del cambio medioambiental y gestión sostenible de recursos energéticos. De la misma manera este tipo de aprovechamiento es visto como una práctica importante para minimizar emisiones de gases efecto invernadero y residuos orgánicos, y para la implementación se requiere una combinación de tecnologías adecuadas, políticas efectivas y cooperación internacional para lograr un impacto significativo en reducir emisiones de metano a nivel global”(García 2021, 12).

Es necesario entender que “la gestión eficiente de los residuos es un reto en la búsqueda de prácticas sostenibles y ambientalmente responsables”(Miranda y Purizaca 2021, 12). En este contexto, “una atención de las alternativas innovadoras que ha ganado es el aprovechamiento del gas metano generado por el procesamiento de residuos sólidos orgánicos”(García 2021, 29) ; “este gas generado en vertederos y depósitos de desechos no solo es una potente fuente de contaminación atmosférica, sino también una valiosa fuente de energía”(Piarpuenzan, Herley y Revelo 2023, 3129-3146). Es por eso que, en América Latina, exactamente en México se desarrollan grandes proyectos que generan metanos provenientes de rellenos sanitarios, motivo por el cual, “es uno de los países líderes en ser generadores de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) mundialmente” ” (Quevedo y Rodríguez 2022, 90-98).

En el Ecuador existen pocos sistemas eficientes y responsables que realicen un acompañamiento hasta su práctica final. A pesar de existir ciudades que tienen una buena gestión y aprovechamiento de los residuos generados sigue preexistiendo deficiencias. “El aprovechamiento del metano permite mitigar los problemas ambientales se ve desde una perspectiva con valioso potencial energético, y, del cual, es necesario que los centros de relleno sanitario aprovechen este recurso por medio de adecuados procesos”(Posligua 2020, 1).

Cabe señalar que en Ecuador algunas provincias ya cuentan con sistemas efectivos para un manejo responsable desde el origen hasta la disposición final. “El metano generado en los vertederos puede ser utilizado como una potencial medida de mitigación, considerado un problema ambiental del manejo integrado de residuos sólidos, tomado desde una visión de uso, se considera un potencial activo”(Ortiz y Contreras 2022, 12259).

Según González y Villalobos (2021) indica que “la desintegración biológica de desechos orgánicos produce metano, es decir, un gas efecto invernadero en términos de atrapar el calor en la atmósfera” (11-22). Sin embargo, Gómez (2020) considera que “convertir este desafío ambiental en una oportunidad energética presenta ventajas significativas”. “La captura y aprovechamiento del gas metano aporta al equilibrio climático, como también ofrece una fuente sostenible de energía”(Miranda y Purizaca 2021, 25). Acorde a Tinajeros (2020) “al desarrollar la gestión de residuos domiciliarios, las autoridades locales han mostrado interés en encontrar

alternativas para una gestión eficiente de los residuos” (34).

Los centros de rellenos sanitarios de desechos pueden enfrentar una serie de problemas, algunas de las cuales pueden variar dependiendo de factores como la ubicación geográfica, el tamaño del relleno sanitario y las regulaciones ambientales locales. Situación que no es ajena al Relleno Sanitario de la Mancomunidad Patate-Pelileo del cual se ha identificado que en este centro se genera un alto nivel del gas metano y se no se establecido el debido tratamiento para minimizar este tipo de gas que afecta de forma directa al medio ambiente y por ende a la población a su alrededor.

Con el fin de proporcionar mayores detalles acerca de la gestión de residuos en la zona de investigación, este estudio se propuso el objetivo de generar una propuesta para un sistema de captura y aprovechamiento de metano emitido en el relleno sanitario con el propósito de mitigar el impacto ambiental y promover la sostenibilidad energética, a su vez este proyecto aporta a la resolución de la problemática encontrada. El estudio también permitirá cuantificar la emisión de gas metano en el relleno sanitario, así como también plantear tecnologías innovadoras de captura de gas metano que sean efectivas y rentables, considerando factores como la viabilidad técnica, económica y ambiental, finalizando este con una propuesta de diseño de sistema de captura eficiente para el gas metano identificado.

2. Metodología

2.1. Ubicación geográfica

“La investigación se ejecuta en el Centro de Gestión de Residuos Sólidos (EMMAIT-EP). La EMMAIT-EP inicia sus trabajos en el antiguo Relleno Sanitario que está situado en el sector El Derrumbo de la parroquia Pelileo Grande, cuenta con 3,5 ha de la cual 2 ha actualmente es el centro, donde realiza su operatividad. Es importante indicar que el centro se establece en la periferia urbana del Cantón Pelileo”(Ambuludi, Carvajal y Diéguez 2022, 70).

“Se localiza en el kilómetro 3 de la carretera Patate-Pelileo, con coordenadas de 775884.47 mE y 9852807.64 mS, a una altitud de 2344 metros sobre el nivel del mar. En este lugar, la humedad relativa es del 65 %, con una temperatura de 18°C. La precipitación media anual es de 700 mm, siendo abril y mayo los meses con mayor presencia de lluvias, mientras que de junio a octubre la temporada es más seca”(Ambuludi, Carvajal y Diéguez 2022, 70).

2.2 Materiales y Métodos

La metodología aplicada en el desarrollo del artículo es un enfoque mixto, es decir, cualitativo y cuantitativo; del cual, lo cuantitativo que “es un enfoque metodológico centrado en recopilar y analizar datos numéricos para describir, explicar o predecir fenómenos, bajo la medición de variables mediante números y datos cuantificables”(Rincón, et al. 2023, 1-11). Se emplea este método para la estimación y cuantificación de la emisión de gas metano en el Centro de Gestión de Residuos Sólidos Pelileo mediante el Modelo LandGEM apoyado del modelo de simulación de procesos de la United States Environmental Protection Agency, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA).

Por su parte, el enfoque cualitativo “permite comprender las situaciones sociales, basado en recolectar y análisis de información no numéricos, utilizando la exploración, descripción y comprensión de experiencias”(Rincón, et al. 2023, 1-11). Los datos sobre gestión de residuos sólidos en el lugar son analizados para la obtención de resultados y con ello determinar la propuesta de minimizar emisiones de metano.

Asimismo, se empleó “la investigación descriptiva que tiene como fin describir las características o propiedades de un fenómeno o grupo de manera sistemática y detallada, utilizando técnicas para recopilar datos”(Hernandez y Mendoza 2018, 26). Por medio de esta investigación se describen y analizan todos los datos recolectados por medio de los instrumentos aplicados.

El procedimiento de la información y obtención de datos se realizan mediante el siguiente diseño de investigación:

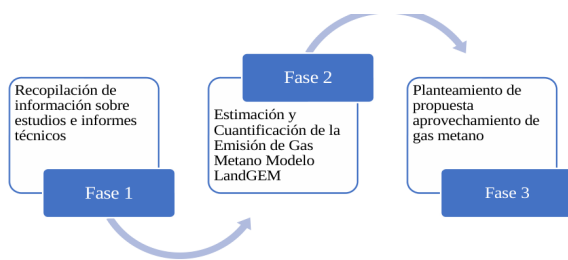


Figura 1 | Fases para la propuesta de aprovechamiento de gas metano.

Por último, también es importante mencionar que, aunque el aprovechamiento del gas metano ofrece numerosos beneficios, también enfrenta desafíos significativos que deben abordarse para su implementación efectiva y sostenible, motivo por el cual, existen algunas limitaciones y desafíos que deben abordarse tales como los costos de infraestructura, regulaciones, permisos, tecnología y políticas regulatorias efectivas.

2.3 Desarrollo de las Fases

2.3.1 Fase1: Recopilación de Información sobre Estudios e Informes Técnicos

Para la respectiva recolección de la información se acudió a la búsqueda de información en otros estudios importantes por medio de una revisión bibliográfica en artículos científicos de bases como AIDIS y Scielo. Se utilizó términos descriptores como “tecnologías innovadoras”, “gas metano”, “tecnología ambiental”.

Para seleccionar los artículos se utilizó criterios de inclusión como: artículos de libre acceso (gratuitos), en idiomas solo español, el título que tenga las palabras de búsqueda, mientras que, los criterios de exclusión fueron: artículos que presentan solo el resumen, artículos que no tienen el mismo título de búsqueda, artículo con otro idioma (Cely y Quiñones 2022, 150–174).

Una vez identificados los estudios, se procedió a organizar y ordenar conforme a la importancia, contexto, tema, y síntesis; elementos que permitieron realizar una revisión más eficiente de cada estudio. Para iniciar el proceso siguió las siguientes fases:

Identificación: hallar artículos en revistas científicas acorde

a la búsqueda según las palabras descriptoras.

Selección: se identificó una lista de estudios potenciales y se procede a revisar los títulos y resúmenes de estos estudios.

Elegibilidad: revisión minuciosamente los textos completos de los estudios que han pasado la etapa de selección inicial.

Inclusión: los estudios cumplen con los criterios de inclusión establecidos.(Cely y Quiñones 2022, 150–174)

Fase 2: Estimación y Cuantificación de la Emisión de Gas Metano Modelo LandGEM

Para valorar la emisión de metano en base a RSU se utilizó el modelo Landfill Gas Emission Model (LandGEM) se usa para estimar las emisiones de gases de vertedero. Este modelo se centra en la predicción de la producción y emisión de metano (CH₄), por medio de desechos sólidos depositados en vertederos (Hurtado 2023). Las cuantificaciones de este modelo se eligieron según la situación del relleno sanitario del Centro de Gestión de Residuos Sólidos Pelileo.

Las variables para tomar en consideración fueron el clima, la cantidad de residuos orgánicos e inorgánicos, la producción per cápita, etc. Dichos datos se obtuvieron de informes y bases de datos específica, mientras que, los datos de los RSU se obtuvieron de la misma empresa EMMAIT-EP, quien suministro la información necesaria para realizar la investigación.

La Producción Per Cápita (PPC) de residuos se utilizó la siguiente ecuación.

$$PPC = w/P \quad (1)$$

Donde:

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

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

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

2.3.2.1. Modelo LandGEM.

El modelo LandGEM utiliza una ecuación para calcular la tasa de descomposición de residuos y estimar la cantidad de metano generado durante un período determinado. La producción de biogás se calcula en base al contenido de metano en el biogás, asumiendo en este caso un 50% (Ambuludi, Carvajal y Diéguez 2022). El cálculo del modelo LandGEM se establece a través de la siguiente ecuación:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k * L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) * e^{-kT_{ij}} \quad (2)$$

Donde:

Q CH₄: es la generación anual de CH₄ en el año del cálculo (m³/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 CH₄ (año 1), L₀: es la capacidad potencial de generación de CH₄ (m³ / 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 ha sido ajustado para adaptarse a las condiciones climáticas ecuatorianas, así como a las variables de generación de metano (k) e índice de generación potencial de metano (L₀), teniendo en cuenta las particularidades del vertedero y otras características relevantes que se evidencian en la **Tabla 1**.

Tabla 1 | Descripción de los valores de k y L₀

Precipitación (mm/año)	K (Residuos orgánicos ≤ 50)	K (Residuos orgánicos ≥ 60)	Lo (Residuos orgánicos ≤ 50)	Lo (Residuos orgánicos ≥ 60)
0-249	0.4	0.43	60	62
250-499	0.5	0.53	80	83
500-999	0.65	0.69	84	87
1000-1999	0.8	0.85	84	87
2000	0.8	0.85	84	87

Para el presente artículo se tomó en consideración el valor de k=0,69 y de L₀ =87, el lugar de estudio es de 700 mm/año y la cantidad de residuos orgánicos son superiores al 60 %.

2.3.2.2 Determinación del Metano

La determinación de la producción de metano derivado de las fracciones de residuos es fundamental para calcular la generación de electricidad. Por lo tanto, es crucial calcular la producción de electricidad de los sistemas de captura de biogás en vertederos mediante la siguiente ecuación:

$$EAG = \frac{Q_{CH_4} \cdot 37.2 \cdot EGe \cdot ER \cdot 0.9 \cdot C}{\phi} \quad (3)$$

Dónde:

EAG: es la electricidad anual generada (MWh),

QCH₄: El metano generado (m³/año)

37.2 (MJ/m³) es el valor de calentamiento más bajo de metano

EGe: es la eficiencia de generación de electricidad del dispositivo de conversión, según varios autores se puede considerar de 35 %.

ER: es la eficiencia de recolección de metano, se consideró de 75 % como plantean

0.9 es el factor de oxidación del relleno sanitario

C es el factor de capacidad, y se considera como 85 %, y

Ø es el factor de conversión de MJ a MWh.

2.3.3 Fase 3: Planteamiento de Propuesta de Aprovechamiento de Gas Metano

En esta fase se detalla la propuesta de aprovechamiento de gas metano través de la descripción de la factibilidad técnica, económica y ambiental:

2.3.3.1 Factibilidad técnica

En la factibilidad técnica se verificará la disponibilidad del espacio territorial en el Centro de Gestión de Residuos Sólidos Pelileo en base a los sistemas de recolección, tipos de tratamiento y a los tipos de residuos postratamiento y así analizar la ubicación del centro de aprovechamiento de gas metano. Se definió la fuente del gas metano por vertederos de residuos sólidos.

Acorde a la revisión bibliográfica que se obtiene de la fase 1, se determinara el mejor método que se ajuste para la propuesta de aprovechamiento del gas metano.

2.3.3.2 Factibilidad económica

La estimación del costo para implementar un propuesta aprovechamiento de gas metano se puede determinar en los siguientes costos: costos de materiales, costos de mano de obra y costos indirectos, los mismos que han sido propuestos a través de revisión bibliográfica de (Castro 2020).

2.3.3.3 Factibilidad ambiental

La utilización del gas metano no solo puede contribuir a mitigar el cambio climático y minimizar las emisiones de gases, también, producir grandes beneficios ambientales y sociales para las comunidades y la sociedad conjuntamente. Por ello, se han identificado impactos positivos y negativos del biogás.

3. Resultados y Discusión

3.1 Resultados

En relación con la identificación de las tecnologías innovadoras de captura de gas metano considerando factores como la viabilidad técnica, económica y ambiental, plasmadas en la **Tabla 2** y acorde a la revisión bibliográfica se obtuvo la siguiente información:

Análisis: Acorde a la información que se detalla en la **Tabla 2** se destaca que la tecnología para la captura del metano generado a partir de fuentes biológicas como vertederos, genera grandes beneficios para el entorno. El biogás recolectado puede ser aprovechado directamente como combustible para producir energía eléctrica, calefacción o incluso como combustible para vehículos. Esta tecnología ayuda a reducir las emisiones de metano y ofrece una fuente de energía renovable (González, et al. 2024, 20-27).

Las tecnologías están diseñadas para detectar y capturar fugas de metano en infraestructuras de plantas de procesamiento de gas, y estaciones de compresión se utiliza una variedad de sensores y sistemas de monitoreo para identificar fugas, lo que permite a los operadores tomar medidas correctivas rápidas para minimizar las emisiones (Veneros, et al. 2020).

Aunque no se centra específicamente en la captura de metano, la captura y almacenamiento de carbono (CCS) puede ser aplicado en instalaciones que emiten metano, en este proceso, el metano se captura antes de ser liberado a la atmósfera y se almacena de forma segura bajo tierra, evitando así su liberación a la atmósfera (Veneros, et al. 2020).

Tabla 2 | Información de las tecnologías innovadoras de captura de gas metano

	Viabilidad técnica	Viabilidad económica	Viabilidad ambiental
Captura directa en instalaciones industriales (González, et al. 2024, 20-27)	Muchas industrias emiten grandes cantidades de metano durante la producción y procesamiento. La captura directa en estas instalaciones implica el uso de sistemas avanzados, como sensores y tecnologías de monitoreo, para identificar y recolectar el metano impidiendo que este llegue a la atmósfera.	La viabilidad económica depende de la escala de la instalación y el costo de implementar tecnologías de captura. Los ingresos generados pueden compensar los costos operativos.	Reducir las emisiones de metano en las instalaciones industriales contribuye a mitigar los cambios bruscos en el clima y mejora la calidad del aire.
Captura de metano en vertederos (Quevedo y Rodríguez 2022)	Los vertederos emiten grandes cantidades de metano debido a la descomposición de materia orgánica. La captura implica la instalación de sistemas de recolección para atrapar el gas liberado.	La captura de metano en vertederos puede ser económicamente viable a través de proyectos de captura de gas para su uso como fuente de energía o mediante la venta de créditos de carbono.	Al capturar el metano en vertederos, se evita que este gas de efecto invernadero se libere a la atmósfera, ayudando a reducir el impacto ambiental.
Tecnologías de detección remota y vigilancia (Veneros, et al. 2020)	El uso de tecnologías satelitales y drones equipados con sensores avanzados permite la detección y monitoreo remoto de fugas de metano en áreas extensas, como campos de petróleo y gas.	Aunque la implementación inicial puede ser costosa, la detección temprana y rápida de fugas puede ahorrar costos a largo plazo y mejorar la eficiencia operativa.	La detección remota contribuye a la pronta identificación y corrección de fugas, reduciendo las emisiones de metano y minimizando su impacto ambiental.
Biocaptura de metano por microorganismos (Pino y Huayna 2022)	Algunos microorganismos tienen la capacidad de consumir metano. La investigación se centra en desarrollar bioprocesos que utilizan estos microorganismos para capturar y convertir el metano en subproductos menos perjudiciales.	Aunque está en una etapa inicial, la biocaptura tiene el potencial de ser una solución sostenible a largo plazo, optimizando los procesos.	La biocaptura puede ser una opción respetuosa con el medio ambiente al aprovechar procesos naturales para mitigar la presencia del gas metano.
Reactor de mezcla completa (USAID 2020)	Sistema de distribución uniforme con concentración por medio de agitación, y un intercambiador de calor u otro mecanismo de calefacción.	Alta inversión para la construcción del reactor debido a su tamaño y capacidad.	Favorable para el medio ambiente.
Laguna cubierta (USAID 2020)	Una laguna impermeabilizada se ha diseñado para evitar infiltraciones en el subsuelo, y está cubierta con una capa de PVC o PEAD para capturar las emisiones de biogás.	Es económicamente viable para su uso.	Es una opción favorable para el medio ambiente puesto que aprovecha los procesos naturales y mitiga las emisiones de gas metano.

Estas tecnologías innovadoras juegan un papel crucial en la minimización de metano, contribuyendo así a reducir el cambio climático y con ello alcanzar el mejoramiento de la calidad del aire. Sin embargo, es importante tener en cuenta que ninguna tecnología es perfecta y que se necesitan enfoques integrales que aborden tanto la captura como la reducción de emisiones en cada etapa de generación y

distribución de metano (Veneros, et al. 2020).

Cuantificación la emisión de Gas Metano en el Centro de Gestión Patate-Pelileo

Para lograr los resultados deseados, fue esencial recopilar tanto información primaria como secundaria sobre los desechos sólidos acumulados en el vertedero sanitario. Basándo-

se en los datos disponibles en las oficinas de EMMAIT-EP durante el año 2023, así como en otros datos externos, se determinaron las siguientes características de los residuos sólidos depositados en el vertedero sanitario como se detallan en la **Tabla 3**:

Tabla 3 | Composición de los RSU depositados en el relleno sanitario. Información a partir de la base de datos de EMMAIT-EP e investigación propia

Componentes de los residuos	Total, de desechos en kg anual	Promedio (%)
Aserrín	1060	0,03%
Basura común	186111	5,49%
Decomiso	1755	0,05%
Desechos	1300	0,04%
Industriales	10015	0,30%
Lodos	3128642	92,35%
Orgánicos	1240	0,04%
Otros	1200	0,04%
Retazos de tela	56450	1,67%
Vidrios	25	0,00%

Tabla 4 | Proyección de Residuos Sólidos

Año	Generación de RSU, kg/día	Generación de RSU kg/a	ppc
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	49,75	17.157,65	0,68
2021	50,81	17.547,11	0,67
2022	51,88	18.936,56	0,69
2023	9411	17.258,00	0,20
2024	9533	17.482,35	0,20
2025	9657	17.709,62	0,20
2026	9782	17.939,85	0,20
2027	9910	18.173,06	0,21
2028	10038	18.409,31	0,21
2029	10169	18.648,64	0,21
2030	10301	18.891,07	0,21
2031	10435	19.136,65	0,22
Total		363.183,28	p*proyectado

Acorde a la **Tabla 3**, se verifica que los residuos más predominantes son los desechos de lodos (92.35%), seguido de basura común (5,49%), los retazos de tela (1,67%), y desechos industriales (0,30%). Los demás desechos como aserrín, decomiso, orgánicos, otros desechos y vidrios solo presentan un mínimo porcentaje en comparación a los demás desechos.

A continuación, se presenta una proyección actual del comportamiento de la producción de residuos sólidos urbanos (RSU) hasta la fecha, así como una proyección de los próximos años hasta el 2031, que es la fecha de vida útil estimada del relleno sanitario. A partir del año 2023, se ha estimado la generación anual de desechos en kilogramos, teniendo en cuenta un aumento en la generación y en la población. Este último se ha calculado según una tasa de crecimiento anual del 1.3%:

3.1.2. Cálculo de Producción de Metano con el Modelo

En esta sección se realizó la estimación de la producción del metano a través del método (LandGem modificado para Ecuador) el volumen del metano de 331.477 m³ en relación a una media de 1'743.566 m³ al año.

La producción anual de metano, siendo el valor más alto de producción de gas en el relleno sanitario al año del cierre

2031 será de 1.743.566 m³ puesto que, desde el año 2023 al año cierre se generará un mayor incremento de desechos.

En la **Figura 2** se observa la tendencia de las emisiones gaseosas anuales (Mg/año) de los gases estimados (Metano, dióxido de carbono y el total de gases del relleno). En la figura se visualiza que la producción anual de emisiones de gases acrecienta hasta un año posterior del cierre del relleno. Luego de ese año inicia un descenso de la emisión de gases y es debido que la mayor parte de desechos que llegan al relleno es lodo razón por la cual la vida de producción de metano es corta.

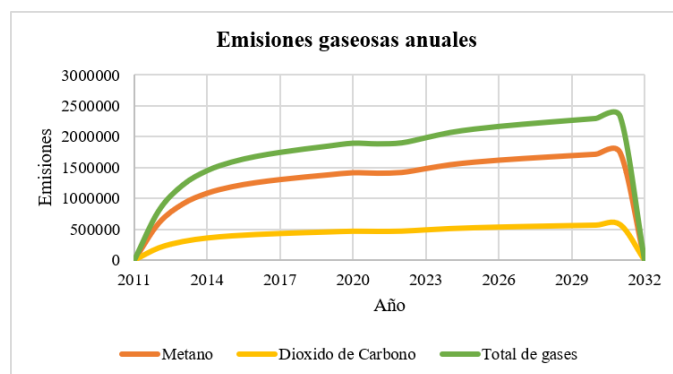


Figura 2 | Resultados del software LANDGEM del relleno sanitario Patate-Pelileo, periodo 2011-2031, (Mg/Año)

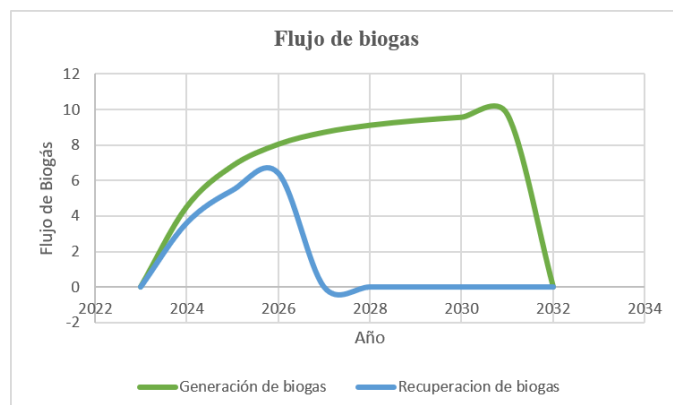


Figura 3 | Flujo de biogás a metano (m³/hr)

En la **Figura 3** se visualiza la generación del biogás de desde la implementación de digestor el Centro de Relleno Sanitario del cual se observa que hasta el año del cierre se generará una elevada cantidad de biogás iniciando con 4.5 m³ hasta 9.7 m³ (fecha cierre) luego se presentará una disfunción.

Dentro de los diferentes lineamientos planteados anteriormente, el biogás capturado se propone que se pueda utilizar para generar electricidad, por lo que el principal uso que se le daría a esta cantidad de energía obtenida es la alimentación de instalaciones del relleno sanitario. ya que la misma podría ser utilizada para abastecer las operaciones del propio relleno sanitario, como la maquinaria utilizada en la gestión de residuos, la iluminación, las oficinas administrativas, entre otros. Así también se podría suministrar de energía a la comunidad cercana, teniendo en cuenta que las necesidades eléctricas locales del relleno sanitario se po-

drían reducir de la dependencia de fuentes de energía más contaminantes, como lo menciona (Savino 2015).

3.1.3 Generación de Electricidad.

Desarrollo de cálculo de generación de electricidad en los sistemas de captación de biogás:

$$EAG = Q(CH_4) * 37,2 * EGe * ER * 0,9 + C/ \quad (4)$$

$$EAG = 1,743,566 * 37,2 * 0,35 * 0,75 * 0,9 + 0,85/(53385) \quad (5)$$

$$EAG = 287,03 \quad (6)$$

Se estimada la generación de 287,03 MWh electricidad anual generada en el relleno sanitario.

Seguidamente se detalla la propuesta de aprovechamiento de gas metano través de la descripción de la factibilidad técnica, económica y ambiental:

3.2 Factibilidad técnica

Se cree necesario diseñar unos sistemas de recolección y captura para obtener el gas metano implicando la instalación de pozos de recolección en vertederos. Se requerirá de tratamientos para eliminar impurezas como sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono y humedad utilizando la desulfuración, la absorción con solventes o el secado.

El gas metano capturado puede utilizarse de diversas maneras y para ello se necesitarán tecnologías y equipos específi-

cos para cada etapa del proceso, desde la captura hasta el uso del gas metano. Esto puede incluir compresores, generadores, sistemas de purificación, entre otros. El tratamiento de biogás reduce la cantidad de desechos que ingresan al vertedero, mitigando así los problemas asociados con la contaminación y el mal olor, y al mismo tiempo aprovechando recursos valiosos.

El proceso del tratamiento de biogás implica varias etapas, desde la captura hasta su conversión en electricidad utilizable. Dicho proceso comienza con la captura de biogás generado por la descomposición de materia orgánica depositado en el relleno sanitario. El biogás se extrae del relleno sanitario mediante sistemas de recolección que utilizan tuberías y sistemas de succión, canalizado hacia una planta de tratamiento. En esta planta se purifica el biogás para eliminar las impurezas y secar el gas para mejorar su calidad y rendimiento.

Una vez tratado, el biogás puede ser almacenado temporalmente en tanques hasta que esté listo para ser utilizado como combustible en un generador de energía eléctrica. Este proceso convierte la energía química del biogás en energía mecánica, que luego se convierte en electricidad mediante un generador eléctrico.

3.3 Factibilidad Económica

La estimación del costo para desarrollar la propuesta de aprovechamiento de gas metano enfocado en un proceso de tratamiento de biogás se determina acorde a los procedimientos a realizarse para obtener el producto final que es a generación de energía. Dichos valores se describen a continuación:

Tabla 5 | Costos de la Propuesta

	Unidad	Longitud (m)	Costo Unitario	Costo Total
Captación forzada de biogás en módulos				31.317,60
Construcción de Modulo (Generación de biogás)	1		5.870,00	5.870,00
Pozo de captación vertical de Biogás	2		212,00	424,00
Excavación	2		3.127,00	6.254,00
Tubería lateral		12	50,36	604,32
Colector	1		55,12	55,12
Cárcamo de condesado primario	1		17.808,00	17.808,00
Tubería perimetral		6	50,36	302,16
Cámara de condesado secundario	1		6.340,00	6.340,00
Skid				3.855,36
Separador de humedad	3		1.230,00	3.690,00
Tanques	3		55,12	165,36
Tratamiento de Biogás y aprovechamiento (generación de energía eléctrica)				82.110,00
3 antorcha de quemado de biogás de 30 a 1500 [m ³ /h]	3		24.380,00	73.140,00
Central térmica de generación de energía eléctrica a partir de biogás.	1		8.970,00	8.970,00
Equipos de compresión, tratamiento de biogás y obras civiles	1		837.400,00	837.400,00
Instalación de estación de regulación y medición de biogás	1		60.420,00	60.420,00
Operación y mantenimiento ductos y pozos	1		55.798,40	55.798,40
Total				1.077.241,36

Se estima un costo de \$1.077.241,36 como se detalla en la **Tabla 5** para establecer un proceso de tratamiento de biogás y generación de energía eléctrica en el Centro de Gestión de

Residuos Sólidos Pelileo, esta adaptación se realizará con fondos propios de la entidad. Dicha inversión será beneficioso para la población en general y a su vez tendrá un impacto

ambiental positivo.

3.4 Factibilidad Ambiental.

Los impactos ambientales más importantes del gas metano son los siguientes que se plantean en la **Tabla 6**.

Tabla 6 | Impactos ambientales del gas metano modificado por (Florez y Franco 2021)

Impactos ambientales negativos del gas metano	Impactos ambientales positivos al controlar y aprovechar el gas metano
- Contamina el aire y perjudica la salud. - Es antecesor de varios contaminantes atmosféricos. - Al interactuar con la luz solar, favorece la formación del ozono al nivel del suelo (O_3). - Al quemar el metano se emite carbono negro.	- Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). - Se utiliza como fuente de energía renovable para generar electricidad. - Evita la liberación de gases de efecto invernadero y ayuda a gestionar de manera más eficiente estos residuos. - Se reduce la emisión de contaminantes atmosféricos locales.

En este mismo sentido, los beneficios de realizar un tratamiento de biogás y a través de ello generar energía eléctrica, según (Savino 2015, 1-43) son:

Disminución de la producción de gas efecto invernadero.

Prevención de la degradación ambiental provocada por la disposición descontrolada de residuos.

La recuperación de materiales contribuye a la preservación de los recursos naturales y energéticos.

El aprovechamiento de energía ayuda a disminuir la demanda de recursos naturales limitados.

Mejoramiento en las situaciones sanitarias y de salud.

Fortalecimiento institucional, formación y capacitación.

3.5 Tratamiento de biogás y generación de energía eléctrica

A continuación, se presenta el flujograma de proceso del tratamiento de biogás en el relleno sanitario y generación de energía eléctrica:

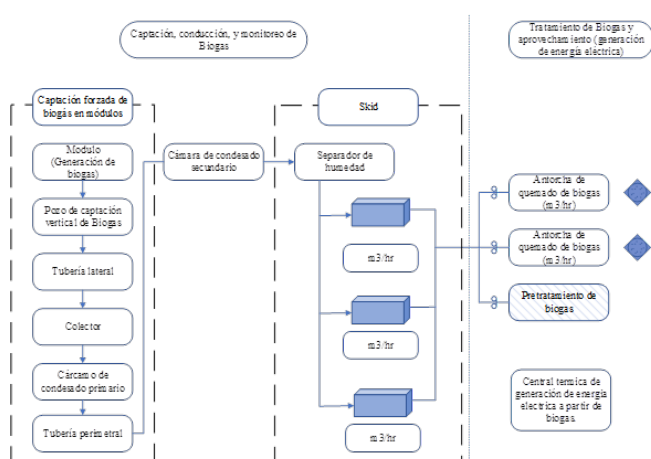


Figura 4 | Diagrama de flujo Tratamiento de biogás y generación de energía eléctrica

El proceso del tratamiento de biogás y generación de energía eléctrica implica la captura, tratamiento y conversión del biogás en electricidad utilizable. Este proceso aprovecha los residuos orgánicos para generar energía renovable y contribuye a la reducción de emisiones de gases, promoviendo así la sostenibilidad y eficiencia de los recursos.

Como se observa en la **Figura 4** el proceso de tratamiento de biogás para obtener energía eléctrica inicia con la captación de biogás en los rellenos, seguido de la extracción del biogás generado del relleno sanitario mediante los sistemas de recolección por tuberías. Este gas es canalizado para el debido tratamiento puesto que el biogás recolectado puede contener impurezas como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), humedad y otros contaminantes que deben ser eliminados antes de su uso como combustible.

La electricidad generada se utiliza para alimentar las operaciones de la instalación del Centro de Gestión de Residuos Sólidos Pelileo-Patate. Así también, será necesario implementar sistemas de control y monitoreo de la planta de generación de energía, así como el mantenimiento regular de equipos para garantizar su óptimo rendimiento y durabilidad.

3.6 Discusión

Actualmente, la mayor parte de rellenos sanitarios posee diversos problemas de contaminación ambientales y de ellos el Centro de Gestión de Residuos Sólidos Pelileo-Patate también presenta este tipo de problemas razón por la cual por medio de la presente propuesta se espera generar grandes beneficios ambientales y sociales para la comunidad del cantón Pelileo y sus alrededores, y a su vez (Zamonsky y Bajsa 2021) indican que la construcción de rellenos sanitarios minimiza los impactos ambientales de la disposición de los RSU y estos a su vez favorecen la viabilidad de proyectos de quema de biogás y aprovechamiento energético.

En el estudio de Hurtado (2023) recalca que un relleno sanitario Portillo Grande en Perú genera un potencial biogás por el cual, se consideró necesario aprovechar dicha transformación en fuente de energía, y esa a su vez ayudó a mitigar gases de efecto invernadero. Para determinar el aprovechamiento del biogás se determinó una inversión mixta, es decir, aportes privado y público para su promoción y financiamiento, que en comparación al presente estudio se planteó un presupuesto e inversión pública que es muy diferente a la inversión privada puesto que cada sector tiene sus limitaciones.

Por otra parte, se verificó en el presente estudio en el relleno sanitario Patate-Pelileo se podrá genera un total de 287,03 MWh electricidad anual a partir de año 2023. A estos datos se suma la investigación de (Ambuludi, Carvajal y Diéguez 2022) quienes afirman en su estudio en el mismo lugar de recolección de desechos que por medio un biodigestor podrá generar electricidad estimada entre el año 2011 al 2032 entre 17693MWh y 53385MWh.

La propuesta para dar solución a la problemática del presente estudio es establecer un proceso del tratamiento de biogás que permita generar energía eléctrica implicando la captura, tratamiento y transformación del biogás en electricidad utilizable, lo cual, será de gran beneficio económico, social y ambiental, esta afirmación se sustenta con el estudio de (Quevedo y Rodríguez 2022) quienes realizaron una investigación similar en un relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo, en donde se estableció un sistema de captura de biogás en el relleno sanitario a fin de generar energía eléctrica, puesto que con ello se consigue reducir el impac-

to ambiental concluyendo que este sistema es viablemente energético, ambiental, económico y social para el territorio.

4. Conclusiones

La implementación de un sistema para aprovechar el gas metano generado en el relleno sanitario no solo representa una solución ambientalmente sostenible, sino también una oportunidad para la generación de energía renovable, es por ello que actualmente existen varias tecnologías que permiten capturar el gas metano y transformarlo en energía, hoy en día en el relleno sanitario se identificó la presencia de 3'387.798 kg de total de desechos anuales, los cuales generan 1'743.566 m³ de metano al año, con esto la captura del metano minimiza las emisiones de gases y ofrece beneficios medio ambientales.

Contribuciones de los autores

Milena Ibeth Guato Chugcho: Adquisición, y análisis de los datos; redactó el manuscrito, aprobó la versión enviada y la versión sustancialmente editada

Alex Ariel Suárez Castillo: Adquisición, y análisis de los datos; redactó el manuscrito, aprobó la versión enviada y la versión sustancialmente editada

Jessica Alexandra Machado Cuzco: Concepción del trabajo; aprobó la versión enviada y la versión sustancialmente editada

Todos los autores aprobaron la versión enviada y editada.[0.5em]

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

5. Referencias

Ambuludi, Robinson, Victor Carvajal, y Karel Diéguez. "Estimación de gas metano mediante el modelo LandGEM del relleno sanitario municipal de residuos sólidos de Patate-Pelileo, Tungurahua, Ecuador." *Tecnología en Marcha*, 2022: 67-78.

Barragán, Karen, y Holger Alvarado. "Subsistema de áreas naturales protegidas para enfrentar delitos ambientales contra la fauna del cantón Quevedo." *RECIMUNDO. Editorial Saberes del Conocimiento*, 2019: 1005-1060.

Castro, Sebastián. *DISEÑO DE UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS PARA GAD DE SALCEDO*. Proyecto técnico, Ambato: Universidad Técnica de Ambato, 2020.

Cely, Mónica, y Abel Quiñones. "Revisión sistemática de las características de evaluación curricular en programas académicos de pregrado a través del método PRISMA-NMA." *Revista Electrónica Calidad En La Educación Superior*, 2022: 150-174.

Fallahizadeh, S., M. Rahmatinia, Z. Mohammadi, M. Vaezzadeh, A. Tajamiri, and M. Soleimani. "Estimation of methane gas by LandGEM model from Yasuj municipal solid waste landfill." *MethodsX* 6, 2019: 391-398.

Florez, Angel, y Alex Franco. *Revisión sistemática de los árboles como bio-indicadores de la contaminación atmosférica por metales pesados*. Trabajo de investigación, Peru: Universidad César Vallejo, 2021.

García, María. *Sostenibilidad, retos tecnológicos y circularidad en la reutilización de residuos agroalimentarios típicos de la cuenca mediterránea*. Tesis de Maestría, Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena, 2021.

Gómez, Laura. *Desafíos y oportunidades en la gestión de residuos hacia una economía circular; una revisión del estado del arte hacia la comparación del desempeño de américa latina y el caribe (ALC) y la unión europea (UE)*. Tesis de maestría, Colombia: Universidad Santo Tomás, 2020.

González, Daniel, Erik Rojo, Ángel Ochoa, and Rodrigo Trejo. "Captura, almacenamiento y conversión de CO₂: nuevas técnicas de reducción." *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 2024: 20-27.

González, Yuliana, y Josué Villalobos. "Manejo ambiental de residuos orgánicos: Estado del arte de la generación de compostaje a partir de residuos sólidos provenientes de sistemas de trampas de grasa y aceite." *Revista Tecnología en Marcha* 34, n° 2 (2021): 11-22.

Hernandez, Roberto, y Christian: Mendoza. *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativas, cualitativa o mixta*. Mexico: McGraw-Hill

Así también, se propone realizar una adaptación de un biodigestor en el centro de relleno sanitario el cual proporcionaría 287,03 MWh electricidad anual, beneficiando de esta manera al mismo centro en términos económicos, disminuyendo la contaminación ambiental y contribuyendo al buen vivir de la población del cantón y sus alrededores

La implementación de tecnologías de captura y aprovechamiento del gas metano en el relleno sanitario no solo tiene beneficios ambientales y económicos, sino que también puede promover la innovación tecnológica.

Es imperativo considerar políticas y regulaciones que fomenten y apoyen el desarrollo de proyectos para aprovechar el metano en rellenos sanitarios, con el fin de maximizar los beneficios ambientales, económicos y sociales que estos proyectos pueden ofrecer a la comunidad.

Interamericana Editores S.A, 2018.

Hurtado, Carlos. "Revisión sistemática de la valorización del biogás de residuos sólidos del relleno sanitario Portillo Grande." *Rev. Inst. investig. Fac. minas metal. cienc. geogr.*, 2023: e25264.

Iniciativa Global de Metano. *Metano de Vertederos: Reducción de las Emisiones, Avance de las Oportunidades de Recuperación y Utilización*. Informe, Iniciativa Global de Metano, 2011.

Miranda, Jennyfer, y Maicoll Purizaca. *Revisión sistemática de las estrategias aplicadas para la gestión integrada de residuos sólidos*. Tesis de Titulación, Perú: Universidad César Vallejo, 2021.

Ortiz, Gerardo, y Robert Contreras. "Políticas públicas, gestión de residuos sólidos municipales y sostenibilidad ambiental. Una revisión." *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 2022: 12258-12278.

Piarpuezan, Víctor, Nelson Herley, y Herman Revelo. "Estrategias Pedagógicas para Fortalecer la Cultura Ambiental Frente a la Contaminación por Residuos Sólidos en los Estudiantes de Primaria de la Sede Indígena Awá, La Brava." *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* 7, n° 5 (2023): 3129-3146.

Pino, Edwin, y Germán Huayna. "Evolución espacial y temporal de cultivo del olivo por efecto del ataque de plagas, utilizando sensoramiento remoto y procesamiento de imágenes satelitales." *Scientia Agropecuaria*, 2022.

Posligua, Josselyn. *Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de una propuesta de generación*. Tesina de especialización, Quito: FLACSO Ecuador, 2020.

Quevedo, Gary, y María Rodríguez. "Introducción de sistema de captura de biogás en el relleno sanitario de la ciudad de Portoviejo." *Ingeniería Energética*, 2022: 90-98.

Rincón, Idana, Betty Soledispa, Ruth Sumba, Zoraida Burbano, and Francisca Jimenez. "Abordajes metodológicos y paradigmas en la investigación científica y tecnológica." *Bibliotecas. Anales de Investigación* 19, no. 1 (2023): 1-11.

Savino, Atilio. "Captura de biogás de los Rellenos Sanitarios y Aprovechamiento Energético." *ISWA -ARS*, 2015.

Savino, Atilio. *Foro Internacional. Valorización energética de residuos urbanos. Experiencias y estrategias globales*. Foro, México: Gobierno de la República de México, 2015.

Tinajeros, Dick. Revisión Bibliográfica de la Simbiosis Industrial como Estrategia para la Gestión. Tesis de titulación, Arequipa: Universidad Católica San Pablo, 2020.

USAID. "CAPTURA Y USO DE BIOGÁS." Programa de manejo de desechos , USAID del pueblo de los Estados Unidos de America, 2020.

Veneros, Jaris, Ligia García, Eli Morales, Víctor Gómez, Mariana Torres, and Fernando López. Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua.Ídesia (Arica), 2020: En línea.

Zamonsky, Pablo, y Sebastián Balsa. "Captura y quema de biogás en rellenos sanitarios y su utilización para la generación de energía eléctrica. la experiencia del relleno sanitario de las rosas." UdelaR, 2021: 1-8.