

RS_TURNITIN_RIOS ORTIZ_AMB_003

por MIRIAN LENITH RIOS ORTIZ

Fecha de entrega: 05-dic-2024 10:15a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2541729086

Nombre del archivo: TESIS_METANO_-_MIRIAN_RIOS_1.pdf (2.7M)

Total de palabras: 11038

Total de caracteres: 66000

14 RESUMEN

El actual proyecto de tesis tiene como objetivo principal evaluar el Potencial de Aprovechamiento Energético del Metano (CH₄) producido en la Celda Transitoria de residuos sólidos Municipales de la Provincia Leoncio Prado 2021-2023; mediante la investigación se basa en la premisa de que la gestión eficiente de residuos puede transformar un problema ambiental en una oportunidad para la generación de energía sostenible. La metodología empleada para el estudio consistió en la recolección y análisis de datos sobre los residuos sólidos generados en la provincia de Leoncio Prado. Se realizaron mediciones periódicas de la cantidad de residuos depositados y se estimó la producción de metano (CH₄) mediante un modelo de cálculo que considera factores como la composición de los residuos y las condiciones ambientales de la celda transitoria, basada en estudios previos que han demostrado la relación directa entre la cantidad de residuos sólidos y la generación de metano en vertederos

Se evaluaron los residuos sólidos acumulados en la celda transitoria, la cantidad máxima acumulada alcanzó las 24,002,90 toneladas en 2022; sin embargo, para 2023, esta cifra se redujo a 8,727.66 toneladas; las emisiones aprovechables de metano (CH₄) fueron 2,123 toneladas de y potencial energético del metano (CH₄) en la celda transitoria de residuos sólidos municipales de la provincia de Leoncio Prado es de 417,68 kW durante el período 2021-2023. Analizando todos los datos obtenidos podemos decir que la cantidad de residuos sólidos depositados en la celda transitoria tiene una relación directa con el potencial energético y las emisiones de metano generadas durante su descomposición.

Palabras clave: Celda transitoria, metano, potencial energético, residuos sólidos

ABSTRACT

The main objective of this thesis project is to evaluate the Energy Use Potential of Methane (CH₄) produced in the Transitional Municipal Solid Waste Cell of the Leoncio Prado Province 2021-2023; Through research, it is based on the premise that efficient waste management can transform an environmental problem into an opportunity for the generation of sustainable energy. The methodology used for the study consisted of the collection and analysis of data on solid waste generated in the province of Leoncio Prado. Periodic measurements of the amount of waste deposited were made and the production of methane (CH₄) was estimated using a calculation model that considers factors such as the composition of the waste and the environmental conditions of the transient cell, based on previous studies that have shown the direct relationship between the amount of solid waste and the generation of methane in landfills.

The solid waste accumulated in the transitional cell was evaluated, the maximum accumulated amount reached 24,002.90 tons in 2022; However, by 2023, this figure was reduced to 8,727.66 tons; The usable emissions of methane (CH₄) were 2,123 tons and the energy potential of methane (CH₄) in the temporary municipal solid waste cell of the province of Leoncio Prado is 417.68 kW during the period 2021-2023. Analyzing all the data obtained, we can say that the amount of solid waste deposited in the transient cell has a direct relationship with the energy potential and the methane emissions generated during its decomposition.

Keywords: Transitional cell, methane, energy potential, solid waste

I. ²¹ INTRODUCCIÓN

La mala ²¹ gestión de los residuos sólidos ha provocado una mayor acumulación en todo el mundo, conllevando a consecuencias negativas para el medio ambiente. Este problema está relacionado con el modelo de consumo actual, la creciente expansión demográfica y la ausencia de conciencia ambiental que fomenta una gestión de residuos adecuada. En consecuencia, han surgido los conocidos “botaderos”; se prevé que para el 2040 la cantidad de residuos será tanta, que se incrementará su volumen en 70%, alcanzando los 3,400 millones de toneladas anuales en todo el mundo.

De igual manera, ²⁰ los residuos sólidos en el Perú representan un obstáculo. Perú Gaste Innovation (PWI) realizó una evaluación que demostró que los residuos sólidos en Lima Metropolitana aumentaron de 6,300 a 9,950 tn diarias. De acuerdo con el reporte más reciente del Ministerio del Ambiente (MINAM), el país produce 19,000 toneladas de residuos de origen local añadido diariamente. De los cuales el 52% termina en infraestructuras de disposición final adecuada, y el 48% en botaderos.

En ⁹ la región de Huánuco, se observó en los últimos años que ha aumentado en gran medida la cantidad de residuos sólidos que se generan en cada hogar. La región tiene una población de 762,224 personas, lo que representa el 2,8% de la población nacional, y produce 0,50 kg de residuos diariamente por persona, lo que equivale a 349,85 toneladas diarias en todas sus provincias y distritos. Este gran número de residuos tiene efectos ambientales significativos, incluyendo la emisión de metano, un gas que contribuye al efecto invernadero.

Según el informe de 2021 sobre ²⁰ el manejo integral de residuos sólidos (PIGARS) en la provincia de Leoncio Prado, ¹ los distritos locales tienen las siguientes tasas de generación per cápita: ⁸ Rupa Rupa con 0,512 kg/hab/día, Luyando con 0,47 kg/hab/día, ¹ Mariano Damaso Beraun con 0,548 kg/hab/día y Daniel Alomía Robles con 0,60 kg/hab/día. La generación diaria promedio por persona es de 8,096 kg/hab/día, y ¹ más del 50% de estos residuos son orgánicos. Estos ⁸ residuos eran depositados en el área degradada llamada La Muyuna, ubicada a 1 km de la ciudad de Tingo María, hasta julio de 2021, lo que afectaba negativamente al río Huallaga y al medio ambiente.

Para abordar el problema, el municipio provincial de Leoncio Prado actuó de inmediato, ¹⁸ declarando una emergencia ambiental y dando inicio a la cimentación de una infraestructura

temporal para la disposición de residuos. Diseñada para operar durante dos años y un mes, esta instalación entró en funcionamiento en agosto de 2021. Su implementación, basada en el método semiaeróbico Fukuoka, una innovadora tecnología japonesa, contribuye a la gestión adecuada de los residuos y ayuda a mitigar los impactos ambientales.

Con base en lo expuesto, se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el potencial aprovechamiento energético del metano (CH_4) generado en la celda transitoria de residuos sólidos municipales de la provincia de Leoncio Prado durante el periodo 2021-2023? La hipótesis plantea que dicho potencial energético de CH_4 sería inferior a 30 000 GG/año para el periodo 2021-2023.

1.1. Objetivo general

Evaluar el potencial de aprovechamiento energético del metano (CH_4) producido en la celda transitoria de residuos sólidos municipales de la provincia de Leoncio Prado durante el período 2021-2023.

1.2. Objetivos específicos

- Estimar la cantidad de residuos dispuestos en la celda transitoria de residuos sólidos municipales de la provincia de Leoncio Prado.
- Estimar el volumen de metano (CH_4) que se puede utilizar en la celda transitoria de residuos sólidos municipales de la provincia de Leoncio Prado.
- Evaluar el potencial energético del biogás en la celda transitoria de residuos sólidos municipales de la provincia de Leoncio Prado.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

La investigación de Díaz (2023) en el relleno sanitario La Glorita, ubicado en Pereira, Colombia, cuyo objetivo fue proyectar la producción de gas en esta infraestructura. Para ello, utilizó el método propuesto por George Tchobanoglous. Una variable clave en su investigación fue la cantidad total de residuos, en especial los orgánicos, ya que estos al descomponerse y generan biogás. Según Díaz, aproximadamente el 40 % de los residuos son orgánicos. Además, señaló que uno de los factores importantes dentro de la producción de biogás es la temperatura pues influye de forma directa en ello. Basándose en estas variables, se estimó que para 2038 se generarían alrededor de 9839,17 m³ de metano por hora, lo que permitiría producir hasta 5,0 megavatios-hora (MWh) de energía.

Ambuludi et al. (2022), en su investigación sobre la determinación de gas metano en el relleno sanitario municipal de Patate-Pelileo, Tungurahua, Ecuador, utilizaron el modelo LandGEM para medir la elaboración de gases. Tomaron como punto de partida el año 2021, cuando se puso en marcha el relleno, y proyectaron su funcionamiento hasta 2032. Los resultados indicaron que la energía generada podría variar entre 17,693 MWh y 53,385 MWh, la cual podría suministrar a hogares y al sistema del relleno, así como al área de bombeo y tratamiento de lixiviados. Además, recomendaron utilizar el modelo adecuado para evaluar la obtención de metano, tomando en cuenta el tipo de relleno sanitario, a fin de obtener un inventario preciso y tener en cuenta los posibles efectos de los gases.

Ramprasad y Busetty (2024) emplearon el modelo LandGEM 3.02, uno de los más utilizados, para apreciar las emisiones de metano en los residuos sólidos municipales no gestionados de Tiruppur. Durante varios años de evaluación, se utilizó un coeficiente de crecimiento poblacional para hacer las proyecciones. A medida que pasó el tiempo, la producción de biogás aumentó y continuará incrementándose hasta 2036, cuando se alcanzará una producción máxima de $5,221 \times 10^7$ Mg por año. Un año después del cierre de los vertederos, Tiruppur contará con un alto potencial energético y su mayor productividad. Los resultados de esta investigación pueden ser utilizados para desarrollar la extracción de metano en vertederos.

Nieto (2021) analizó el potencial energético del municipio de Santiago de Cuba, considerando diversas alternativas para la valorización de residuos sólidos. Los cálculos

revelaron que la reserva energética de estos residuos alcanzaría los 827 657,22 megavatios. Este descubrimiento sería un aporte económico con un nivel de influencia muy alto pues los costos superarían los dos millones de dólares, considerando el ahorro de miles de toneladas de combustible por año. El estudio destacó que la pirólisis ofrece el mayor potencial para la generación de energía. Además, se subrayó que la gestión de residuos sólidos está estrechamente vinculada con los ODS para 2030.

2.1.2. Nacionales

En el estudio realizado por Hurtado (2023) en el que analiza el aprovechamiento del biogás obtenido del Relleno Sanitario “Portillo Grande”, hizo uso del LandGEM, un software diseñado para la estimación del biogás generado. Los resultados mostraron que el relleno podría producir 65 586 megavatios de energía eléctrica al año, basándose en un volumen de casi 16 millones de toneladas de residuos enclaustrados. El análisis económico también reveló que este biogás tendría un valor anual de \$5 204 123, permitiendo recuperar la inversión en tecnología e infraestructura en un plazo de dos a tres años. Además, la valorización del biogás contribuiría a la minimización de la producción de los GEI que se generan todos los días dentro de la actividad de disposición final.

En su estudio Valdivia y Guardia (2023), realizaron una revisión detallada del manejo de los residuos sólidos en el Perú y luego lo relacionaron con el aprovechamiento de los residuos orgánicos. El estudio destaca las consecuencias negativas sobre una disposición inadecuada de residuos tanto en la salud pública de los que se encuentran en la zona, así como en la calidad del ambiente. Se analiza la posibilidad de obtener energía a partir de residuos orgánicos, destacado su papel en la reducción de GEI. La metodología ACM0022 Procesos Alternativos de Tratamiento de Residuos, Modelo 3.0, se utiliza como base para evaluar el impacto del proyecto en la reducción de las emisiones de GEI. La generación de energía a partir de residuos orgánicos reducirá en 96,383 tCO₂eq durante los 15 años del proyecto. Se presentan también sugerencias para mejorar la gestión integral de residuos sólidos, fomentar la incorporación de otras fuentes de energía que sean prácticas y puedan sostenerse en el tiempo y a su vez, promover la valorización de residuos.

2.1.3. Locales

Sánchez (2019), en su estudio realizado, explora la viabilidad de utilizar materiales derivados de residuos sólidos domésticos como fertilizante orgánico en una

estructura cilíndrica. El experimento se realizó en un reactor discontinuo cilíndrico con tres cámaras internas, situadas a diferentes alturas y parcialmente aisladas térmicamente para minimizar el impacto de las variaciones de temperatura ambiente. La primera cámara se encarga de la acumulación y predigestión, la segunda de la digestión anaeróbica mediante una paleta mezcladora, y la tercera de la acumulación, descomposición y drenaje del lixiviado. Durante el experimento, se cargaron los biorreactores con 20 kg de residuos orgánicos sólidos durante 20 días, manteniéndolos lo más cerrados posible para simular condiciones anaeróbicas y registrar las temperaturas en cada proceso. La fermentación se realizó en las tres cámaras y se cuantificó el peso y volumen del material sólido restante, el lixiviado y los gases producidos. Los resultados mostraron que los productos y subproductos de la fermentación fueron: 52,91% sólidos restantes, 46% lixiviado y 1,09% gases en peso; y en volumen: 2,52% sólidos restantes, 2,68% lixiviado y 94,80% gases. El pH de los productos obtenidos varió entre 6,21 y 6,38, cercano al pH neutro. La relación C/N para los biosoles y biooles fue de aproximadamente 12,11 y 16,96, respectivamente, inferior al rango óptimo de 20-30 requerido para fertilizantes. Además, los valores de Cd y Pb en los residuos y materiales sólidos lixiviados estaban por debajo de los límites establecidos para biosoles y biooles. Por lo tanto, los sólidos remanentes, especialmente el lixiviado, son adecuados para su uso como biofertilizante.

En su investigación, Lijarza (2022) determinó la producción de biogás utilizando cáscaras de mazorcas de cacao. Para obtener el inóculo necesario para una adecuada digestión anaeróbica, se empleó estiércol de pollo. La metodología a escala de laboratorio incluyó el uso de sistemas de medición volumétrica. Se realizaron tres tratamientos con diferentes concentraciones de cáscaras de cacao combinadas en proporciones similares de microorganismos eficientes de gallinaza y agua, y se compararon con un tratamiento control que contenía únicamente microorganismos eficientes de gallinaza y agua. El segundo tratamiento, que tenía una proporción de 2:1 (inóculo), produjo más biogás en promedio, alcanzando 1,107.6 ml en 5 días. Estos hallazgos sugieren que la cáscara de cacao puede utilizarse para producir biogás.

Cáceres (2019) en su investigación determinó el potencial de reutilización de la pulpa de café. Sistema implementado para medir el potencial bioquímico del metano en variadas dosis de pulpa de café. De igual forma se estudió el periodo de descomposición, cantidad de biogás y biometano producido para calcular la eficiencia de descomposición en base al peso fresco y seco para obtener biol y biosol, que son los productos de la descomposición anaeróbica, posteriormente se determinó su disponibilidad. Como biofertilizante aplicando

pruebas de toxicidad por germinación en placas. Finalmente, se encontró que al utilizar pulpa de café en una concentración inferior al 30%, se degradó el 63% de la materia seca de la pulpa de café, produciendo metano con una pureza del 90%.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Legislación

a) “Constitución Política del Perú”

Decretada en 1993, establece disposiciones que garantizan a todos los ciudadanos el derecho a un entorno equilibrado y saludable. Asimismo, estipula que el gobierno tiene la responsabilidad de desarrollar y aplicar políticas nacionales en materia ambiental y de salud.

b) “Decreto Supremo N° 6-STN de 09-01-64”

El empleo de infraestructuras para el vertimiento final de los residuos está regulado, este dispositivo legal establece tipos de infraestructuras para la administración correcta de los residuos, siendo responsables con la salud y el medio ambiente.

c) Ley General del Ambiente – Ley N° 28611

Se distinguen los residuos sólidos domésticos, comerciales y municipales, así como otros tipos de residuos. El cumplimiento de las condiciones legales de inspección y seguimiento es la responsabilidad de los productores de estos residuos.

d) “Ley General de Salud” – Ley N° 26842

El Estado tiene la responsabilidad de salvaguardar el medio ambiente. Según el artículo 96; se deben tomar todas las precauciones y medidas necesarias para salvaguardar el bienestar ambiental y la salud de los ciudadanos al disponer de productos y sustancias peligrosas. Los artículos del Capítulo VIII; indican el manejo de residuos, estableciendo las obligaciones de evitar la liberación de residuos o sustancias que puedan dañar la salud a ríos, suelos o aire. Además, se regulan la creación de áreas para la acumulación de los residuos, su transformación y uso industrial.

e) ¹¹ **“Decreto Legislativo N° 1278”, “Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos”**

Promulgada en 2017, regula el ¹³ adecuado manejo y gestión de los residuos en el territorio peruano, así como las obligaciones de los generados y de las autoridades, por otro lado se prioriza acciones de aprovechamiento y minimización dejando como último escenario la disposición de residuos. A continuación, se detalla:

Fomentar la inversión del sector público y del gobierno para disminuir el déficit de infraestructura de residuos sólidos, así como para corregir y transformar los botaderos.

- Ampliar la data que el gobierno maneja sobre la administración de los residuos.
- Apoyar a las municipalidades a solventar los arbitrios y la facturación de la limpieza pública.
- Crear instrumentos a fin de manejar situaciones de emergencia.

f) **“Reglamento del Decreto Legislativo N° 1278”**

Es esencial contar los instrumentos ambientales idóneos para el cierre de un relleno sanitario o estructuras similares.

⁶ Cobertura final: Es necesario proyectar cómo se sellará y cubrirá correctamente el lugar de disposición final de los residuos. Esto contribuye a evitar que las emisiones y los efluentes contaminados se liberen al medio ambiente.

Control de gases: El establecimiento de medidas para la captura y el tratamiento de los gases que se liberan son esenciales. La salud y el ambiente pueden verse afectados por estos gases, como el metano.

Contingencia después del cierre: A fin de sobrellevar cualquier emergencia una vez que la estructura se clausure por completo, se deben planificar acciones específicas.

2.2.2. Residuos sólidos

2.2.2.1. Propiedades

Las características físicas, como la humedad y la densidad, son cruciales para comprender cómo se manejan los residuos en un entorno particular. La densidad, en particular, es esencial para entender la disposición de los residuos en ese ambiente.

Propiedades químicas: Son esenciales para evaluar la conformación química de los residuos y el poder energético. Las formas de procesamiento están influenciadas por esta composición, en particular por la relación entre carbono y nitrógeno.

Propiedades biológicas: Estas características tienen que ver con la descomposición de residuos. Los compuestos orgánicos pueden convertirse en gases excepto en materiales como el plástico, la goma y el cuero. Los residuos sólidos orgánicos se clasifican en tres categorías: celulosa, grasas y proteínas.

2.2.2.2. Clasificación de los residuos sólidos

Los residuos pueden organizarse según su propósito, clasificándose en dos categorías principales: peligrosos y no peligrosos. Además, según la entidad responsable de su gestión, se dividen en residuos municipales y no municipales. Cabe señalar que la normativa tiene la capacidad de crear nuevas clasificaciones de residuos basadas en su origen, si es necesario.

2.2.2.3. Gestión integral de residuos sólidos

De acuerdo con el DL 1 278, se define como la suma de procesos administrativos y técnicos que abarca la planificación, comunicación, preparación, implementación y evaluación de estrategias para su manejo adecuado a nivel local y nacional. A continuación, se detallan los pasos y etapas clave para la correcta gestión.

Minimización de residuos: Este proceso busca disminuir al mínimo la generación de residuos. Se logra mediante la implementación de normas preventivas, procedimientos, técnicas o métodos en el punto de origen de los residuos.

Segregación en la fuente: Los operadores autorizados deben recibir los residuos tanto municipales como no municipales. La segregación en la fuente es fundamental para facilitar su manejo y tratamiento posterior.

Reaprovechamiento: Durante el proceso de segregación, es común encontrar bienes o artículos que cambian su uso práctico; pueden ofrecer un nuevo beneficio que no se obtuvo en un principio. El reaprovechamiento es un método que ayuda a usar los recursos de manera más eficiente y a minimizar la cantidad de residuos.

Almacenamiento: Los residuos sólidos se acopian en contenedores y en áreas públicas, así como en casas.

Recolección: Este proceso incluye la recolección y el transporte de los residuos utilizando los métodos apropiados.

Tratamiento: Este proceso implica transformar las propiedades químicas, físicas o biológicas de los residuos para minimizar los riesgos de salud y al medio ambiente. Tras el tratamiento, algunos residuos pueden ser valorizados o vendidos (Orihuela, 2013).

Disposición final: Este es la etapa final, donde se requiere un manejo que asegure que los residuos no sean un riesgo para el entorno o la salud pública (Sáez, 2014).

2.2.3. Celdas transitorias

Se implementan con el propósito de acabar con los residuos de la ciudad. Esta infraestructura tiene una duración de tres años y se emplean provisionalmente en tanto se construye un relleno sanitario. Su objetivo es prevenir la contaminación ambiental, cumpliendo con las normativas ambientales (OEFA, 2019).

2.2.3.1. Celdas transitorias de la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado

Se encuentra en el distrito de Luyando, provincia de Leoncio Prado, Huánuco. En seguida, se presentan sus rasgos detallados:

- Diseñado para una duración aproximada de dos años y ocho meses.
- El tipo de la celda es Semi Mecanizada.

- Su diseño es Mixto, combinando metodologías de trinchera y área.
- Las trincheras están adaptadas a la topografía del lugar.
- Se han incluido canales perimetrales para trasladar aguas de fluviales.
- Se utiliza una geomembrana lisa de 1,5 mm de grosor junto con un geotextil de 300 g/m² para impermeabilizar el fondo.
- ⁴ Encima de la geomembrana y el geotextil, hay una capa de seguridad drenante de 0,30 m de grosor (arena limosa).
- El talud se rellena a una proporción de 1:15 de los diques (celdas).
- El espacio total es de 72 768,00 m³ para un período de 2,8 años.
- La capacidad de recepción total de la estructura es de 73 794,00 m³.
- Los insumos para cobertura provienen del propio lugar, con un metrado de 14 554,00 m³.
- La red de captura de gases está conectada al sistema de drenaje central y se adapta a medida que acrecienta la altura de los residuos. La chimenea está formada por una malla de 2 x 2 pulgadas, que rodea un perímetro cuadrado de 60 x 60 cm y tiene una altura de 5 m. Esta malla está repleta de rocas con diámetros de 1 a 4 pulgadas, dispuestas alrededor de una tubería de PVC hueca de 6 pulgadas.
- Hay 04 chimeneas instaladas.
- Tiene una laguna para coleccionar y acumular los lixiviados.
- Cuenta con un sistema de recolección en forma de espina de pescado para captar los lixiviados. Este sistema incluye una tubería central hueca de 8 pulgadas y tuberías auxiliares de 6 pulgadas, con una inclinación suave del 1%. Además, se utiliza ¹ piedra de 4 a 6 pulgadas de diámetro como filtro.
- La cobertura cotidiana corresponde al 25% del total de los residuos sólidos.
- El espesor final de la cobertura es de 0,60 metros.

2.2.4. Procedimientos dentro de la Celda Transitoria de Leoncio Prado

2.2.4.1. Recojo de los Residuos

La recolección de residuos se realiza de lunes a viernes en dos turnos diarios, y los sábados en un solo turno. Las unidades móviles operan de 9:00 a 11:00 a.m. y de 2:00 a 4:00 p.m., mientras que los camiones con sistema de compactación funcionan de 10:00 a 1:00 p.m., de 2:00 a 3:30 p.m., y de 10:00 p.m. a 1:00 a.m.

En la caseta de entrada, se registra la siguiente información de los vehículos que ingresan:

Se registran la hora y fecha de entrada, la placa y el modelo de la unidad móvil, la identificación del conductor, el origen y volumen de los residuos incorporados, la hora y fecha de salida, así como la verificación de la carga de residuos sólidos no municipales y la seguridad del vehículo.

Dentro de las celdas transitorias, se permite una velocidad máxima de 10 km/h, mientras que en otros espacios de tránsito se permite una velocidad de hasta 20 km/h.

2.2.4.2. Descarga de los residuos sólidos

Los vehículos de recolección circulan diariamente por la ciudad y depositan los residuos en las celdas correspondientes. La administración selecciona el área apropiada para este depósito. Posteriormente, maquinaria pesada se encarga de extender, compactar y confinar los residuos.

En el proceso, el recurso humano del servicio debe mantenerse alejado del compactador, evitando ingresar al área de maniobras del compactador en todo momento para garantizar la seguridad y prevenir accidentes.

La celda N° 1 se operó hasta que alcanzó el final de su tiempo de vida, seguido de la celda N° 2 y así continuamente hasta llegar a la celda N° 4. Los residuos que se disponen en forma diaria en la celda se organizan en plataformas homogéneas, con un grosor que oscila de 0.20 a 0.60 metros, empleando maquinaria pesada.

Concisamente, los residuos se descargan en las celdas y se distribuyen en plataformas delgadas de aproximadamente 60 cm. Luego, se compactan con el tractor oruga

entre 4 y 5 oportunidades por plataforma. Finalizando el día, se emplea una capa con material para cobertura de 15 cm de grosor, que se compacta de manera equivalente a la de los residuos.

2.2.4.3. Manejo de gases

Se instalan dispositivos en las chimeneas para incinerar los gases resultantes de la quema de residuos, lo que ayuda a aminorar el impacto ambiental. Además, las chimeneas se colocan a una altura mínima de 100 cm sobre los residuos gestionados. Esta disposición previene la acumulación de gases en las salidas y garantiza una operación eficiente y segura.

2.2.5. Metano

El metano, un gas inflamable e incoloro, es el principal componente del biogás. Se utiliza principalmente como combustible en los hogares para calefacción, cocina y secado de ropa, y también se emplea en la industria para producir productos químicos clave como metanol, etileno, tetracloruro de carbono y cloroformo. El metano se genera como subproducto en procesos de descomposición microbiológica en ambientes con poco oxígeno, como sedimentos y marismas, y durante la fermentación, como en la digestión de rumiantes. Es el alcano más simple, con un solo átomo de carbono, y es uno de los compuestos orgánicos más comunes en la Tierra. Clasificado como un "gas de efecto invernadero", favorece al calentamiento global. Debido a su bajo punto de ebullición y alta volatilidad, el metano tiende a migrar a la atmósfera cuando se libera, sin representar un riesgo significativo para la cadena alimentaria, ya que es prácticamente no tóxico. Su principal efecto es el desplazamiento del oxígeno, lo que puede causar asfixia. El metano no es mutagénico y no hay evidencia de que cause cáncer en animales de laboratorio o en humanos (Bolt, 2024).

Según Gerber et al. (2013), el metano se genera como ¹ un subproducto de la degradación de materia orgánica en ambientes anaeróbicos. Durante la fermentación entérica, los microorganismos liberan CH₄ a través de la acción de bacterias.

2.2.6. Importancia del metano (CH₄)

Según Bolt (2024), el metano (CH₄) desempeña un papel esencial en varios aspectos del medio ambiente. La oxidación microbiana del CH₄ contribuye a la formación de una significativa cantidad de biomasa microbiana y actúa como fuente de carbono en las redes tróficas, además de causar una disminución del oxígeno en los cuerpos de agua. Por tanto, el

metano es un componente clave en el ciclo del carbono acuático. Además, al ser un gas de efecto invernadero, el metano favorece al calentamiento global y es un componente importante del gas natural, con usos extensivos en aplicaciones industriales y residenciales. La crianza de ganado representa más del 20% asociado a los GEI asociadas con actividades humanas. De acuerdo al MINAM (2023), el sector de uso del suelo es responsable del 48% de las emisiones en Perú, seguido del sector energético (30,1%), la agricultura (13,5%), los residuos (5,0%) y los otros (3,6%).

2.2.7. Generación de metano

La obtención de metano ocurre mediante un proceso conocido como digestión anaeróbica, que tiene lugar en ausencia de oxígeno. Durante este proceso, los microorganismos desintegran materia orgánica, como residuos agrícolas, estiércol o restos de alimentos, generando biogás, una mezcla de dióxido de carbono y metano. La obtención de metano a partir de residuos orgánicos es una forma de valorización energética que favorece la minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero (Thakur, 2022).

Manyuchi et al. (2019) señalan que, en los rellenos sanitarios, la generación de metano está influenciada por la edad del desecho, la humedad, la temperatura y la composición del material. El estudio destaca que los residuos orgánicos con alta humedad y temperaturas mesofílicas son particularmente eficaces para la producción de metano. Además, se observa que los residuos que tienen más de cinco años de antigüedad producen concentraciones más elevadas de metano. El estudio resalta la importancia de aprovechar los vertederos como una fuente de energía renovable.

2.2.8. Fuentes de emisión de metano

Las emisiones de metano provienen de diversas fuentes, tanto humanas como naturales. Entre las fuentes antropogénicas comprende la quema de combustibles fósiles, la gestión de residuos y la agricultura, así como procesos industriales, la producción de alimentos y la actividad microbiana en los vertederos (Gianoutsos et al., 2024; Runkov et al., 2023). Aunque los bosques húmedos se consideran sumideros de metano, también pueden emitir cantidades significativas de este gas, con emisiones que varían según factores ambientales como la temperatura del suelo y los niveles de humedad (Runkov et al., 2023). Además, investigaciones en áreas urbanas han subrayado la importancia de identificar las emisiones de metano provenientes de redes de gas natural, sistemas de combustión y sistemas de aguas

residuales, destacando la necesidad de continuar con estudios y adoptar medidas de mitigación (Hmoudah et al., 2023). Las señales isotópicas de las emisiones de metano pueden ayudar a distinguir las fuentes y a cuantificar las emisiones de manera más precisa (Fiehn et al., 2023).

2.2.9. Consecuencia del metano en el medio ambiente

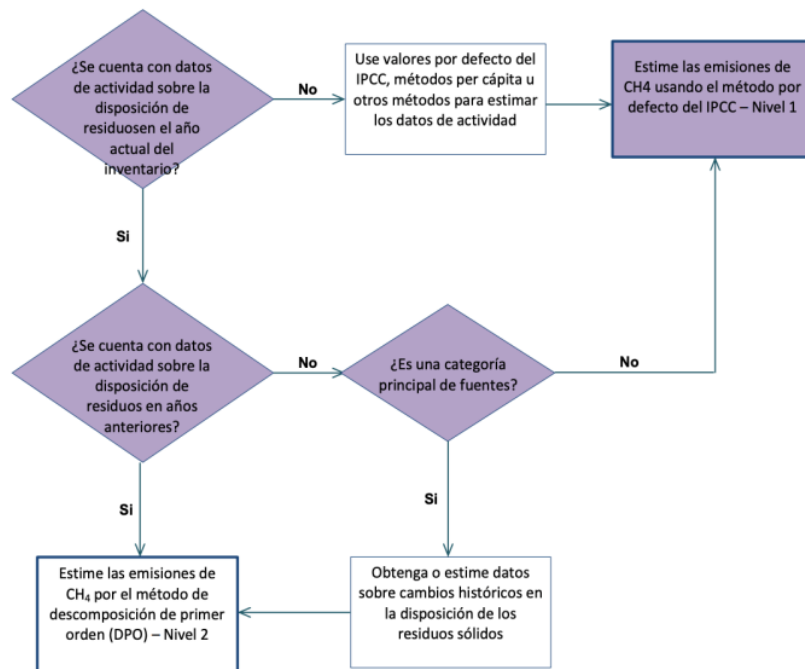
Es un potente gas de efecto invernadero, tiene significativas repercusiones ambientales. Se libera durante la extracción de carbón, lo que contribuye a la degradación de la capa de ozono que protege al planeta Tierra de la radiación solar y con ello también la salud de la población (Ianc et al., 2020). Aunque el metano es un gas que se produce en una serie de actividades humanas, su baja ecotoxicidad implica que su impacto directo en el medio ambiente es relativamente bajo (Bolt, 2024).

2.2.10. Consecuencia del metano en la salud humana

Según Bolt (2024), el metano no es mutágeno, no provoca cáncer y tiene una toxicidad prácticamente nula. Por otro lado, Rossi (2021) sostiene que la oxidación del metano en un biofiltro disminuye los riesgos en la salud humana asociados con las emisiones de gases de los vertederos. Esta reducción de riesgos incluye una disminución del 79% en el riesgo de cáncer y del 92% en el cociente de peligro, lo que contribuye a mejorar la calidad del aire.

2.2.10.1. Estimación de metano

MINAM (2014) establece directrices para el desarrollo del informe anual sobre GEI, con un enfoque específico en la gestión de residuos sólidos, indicando las consideraciones básicas tanto en la parte administrativa como técnica y utiliza las directrices del IPCC (GL, 1996). Estas orientaciones están alineadas con los procedimientos establecidos (OBP, 2000).



¹
Fuente: MINAM (2016)

Figura 1. Árbol de decisión para calcular emisiones de CH₄

En el sector de residuos, particularmente en la etapa de disposición de los residuos sólidos, se generan gases que contienen metano (CH₄). Este metano se produce mediante la actividad microbiana en residuos biodegradables en condiciones de baja concentración de oxígeno. Según las Directrices del IPCC de 1996 (GL, 1996), se establecen dos niveles de cálculo para estimar las emisiones en esta etapa del sector de residuos (ver Figura 1).

²
Nivel 1: Método por defecto; usa indicadores del IPCC y la GPC de los residuos.

²
Nivel 2: Método de descomposición de primer orden (DPO); usa datos históricos sobre la generación de los residuos.

Para realizar el cálculo en el Nivel 1, se utiliza la fórmula necesaria para su determinación:

$$\text{Emisiones de CH}_4 = [(\text{RSU}_T \times \text{RSU}_F \times L_0)] - R \times (1 - \text{OX}) \dots (1)$$

Donde:

- Emisiones de CH₄: CH₄ emitido durante el año base del inventario
- RSU_T: Cantidad total de residuos sólidos urbanos (RSU) generados en el año de estudio
- LO: Potencial de generación de metano
- R: CH₄ recuperado
- OX: Factor de oxidación (fracción), cero

2.2.11. Métodos para el cálculo de emisión de metano

Se utilizan métodos de respiración cerrados o calorimetría, que incorporan capuchas o cajas ventiladas para la cabeza, máscaras faciales y cámaras cerradas para medir el metano. Estas técnicas se basan en calcular el movimiento del aire en el sistema respiratorio y la diferencia de concentración de metano entre el aire exhalado y el aire ambiente. Empero, estas técnicas presentan desafíos, como las limitaciones en el movimiento de los animales, los costos de construcción, el mantenimiento y la necesidad de personal.

La metodología conocida como técnica trazadora se utiliza comúnmente en condiciones de pastoreo para calcular la emisión individual de metano, siendo el hexafluorosulfuro de azufre (SF₆) el trazador más empleado. Este enfoque se basa en la investigación de Johnson y Westberg, que demuestra que una parte significativa del CH₄ ruminal se expulsa a través de los eructos hacia el intestino grueso, mientras que solo una pequeña fracción se produce en los pulmones (Johnson et al., 1994). Una ventaja de este método es que no restringe el comportamiento del animal en el transcurso del pastoreo, a diferencia de lo que ocurre con otros enfoques (McCaughy et al., 1999).

Este método se basa en que en su mayoría; el 99% de las emisiones de metano provienen de la nariz y boca del animal, el 83% emitido por los eructos y el 16% por medio de la exhalación. Para realizar la medición de estas emisiones, se emplean cápsulas de hexafluoruro de azufre (SF₆) que se introducen en el umen del animal; en un lapso de tiempo, el SF₆ se libera junto con el CH₄. Seguidamente, para determinar la cantidad total de metano, se multiplica la cantidad total de SF₆ liberado por la concentración de metano (Murray et al., 1976).

Una ecuación de predicción creada por Woolin en 1960 es un método para calcular las emisiones CH₄ derivadas de ácidos grasos volátiles (AGV). El balance fermentativo se utiliza en este método para calcular el aporte de CH₄ que se produce como

resultado de la transformación de carbohidratos (CHO) de la dieta en AGV. Para propósitos comparativos, esta estrategia es particularmente ventajosa comparativos (Van Kessel y Russell, 1996).

2.2.12. Aprovechamiento energético

2.2.12.1. Energías renovables

Los recursos de energía renovable están ganando competitividad debido a su carácter limpio e inagotable. En contraste de los combustibles fósiles, se destacan por su amplia disponibilidad, su potencial de uso y su diversidad. Su principal ventaja es que no generan gases de efecto invernadero ni emiten contaminantes. En contraste, los combustibles fósiles enfrentan una proyección negativa, mientras que los costos de las energías renovables perpetúan en su reducción de manera constante, a pesar de su volatilidad ocasional (OSINERGMIN, 2019).

Un ejemplo de esto es el proceso Power-to-Gas (PtG), que ha demostrado ser efectivo en la producción de metano sintético a partir de hidrógeno renovable y CO₂. Este proceso se realiza en una planta modular, móvil y ajustable, proporcionando un combustible transportable que puede utilizarse en aplicaciones energéticas, térmicas y de movilidad (Bassano et al., 2019).

2.2.12.2. El metano como energía renovable

El biogás, formado mediante biodigestores a partir de los residuos, es una opción de energía limpia. Su uso de residuos orgánicos tiene la ventaja de reducir los gases de efecto invernadero; asimismo, ofrece una alternativa económica más accesible y crear oportunidades de empleo para los habitantes locales, generando beneficios adicionales (Venegas, 2019). Por otro lado, el metano sintético licuado (LSM), producido a partir de CO₂ atmosférico y H₂ renovable, puede ser una alternativa económica competitiva frente al hidrógeno licuado como combustible neutro en carbono. Sin embargo, presenta una menor eficiencia en la conversión de energía y costos más altos a pequeña escala (Kiani et al., 2021).

2.2.12.3. Composición y características del biogás

El biogás se compone principalmente de CH₄ y CO₂, pero también contiene pequeñas cantidades de impurezas, como nitrógeno (N₂), hidrógeno (H₂), amoníaco (NH₃) y sulfato de hidrógeno (H₂S) (Martinez-Alonso, 2023). La composición del biogás puede

variar según su fuente, y puede incluir contaminantes adicionales como vapor de agua (H₂O), metilsiloxanos (MS), oxígeno (O₂), compuestos orgánicos volátiles halogenados (COV), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (Kabeyi, 2024). En general, el biogás contiene entre un 50% y un 63% de metano y aproximadamente un 40% de dióxido de carbono, con niveles de oxígeno inferiores al 2% y de nitrógeno que oscilan entre menos del 15% y alrededor del 7% (Calero, 2022). Además, el biogás producido a partir de residuos municipales, residuos alimenticios y materias primas de fertilizantes lácteos en California muestra variaciones en la composición de trazas y niveles de toxicidad, siendo el biogás derivado de fertilizantes lácteos ligeramente más tóxico (Li, 2019).

2.2.12.4. Educación ambiental

La educación es crucial para incentivar a la población en la protección y el cuidado del ambiente, así como para la toma de decisiones que sean adecuadas y cumplan con lo exigible en el marco normativo (Silva et al., 2022). Huaycani (2024) también enfatiza la importancia de la conexión entre la educación-hogar, sugiriendo que se puede fortalecer esta conexión mediante la promoción de la segregación en origen. Asimismo, Subramaniam y Masron (2020) indican que es vital compartir las experiencias y enseñanzas, especialmente en los países en desarrollo, sobre gestión sostenible de los recursos y evitar los modelos de consumismo y economías lineales, lo que podría agravar la pobreza y la degradación ambiental.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

La infraestructura de residuos sólidos de ²⁸ la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado fue el lugar donde se llevó a cabo esta investigación.

3.1.1. Ubicación política

La ubicación de la Celda Transitoria ¹ de Shapajilla es en el distrito de Luyando, perteneciente a la provincia de Leoncio Prado, en la región de Huánuco. El diseño y operación de las instalaciones de manejo de residuos sólidos están directamente influenciados por las características topográficas únicas de la ubicación.

- ¹ Región: Huánuco
- Provincia: Leoncio Prado
- Distrito: Luyando

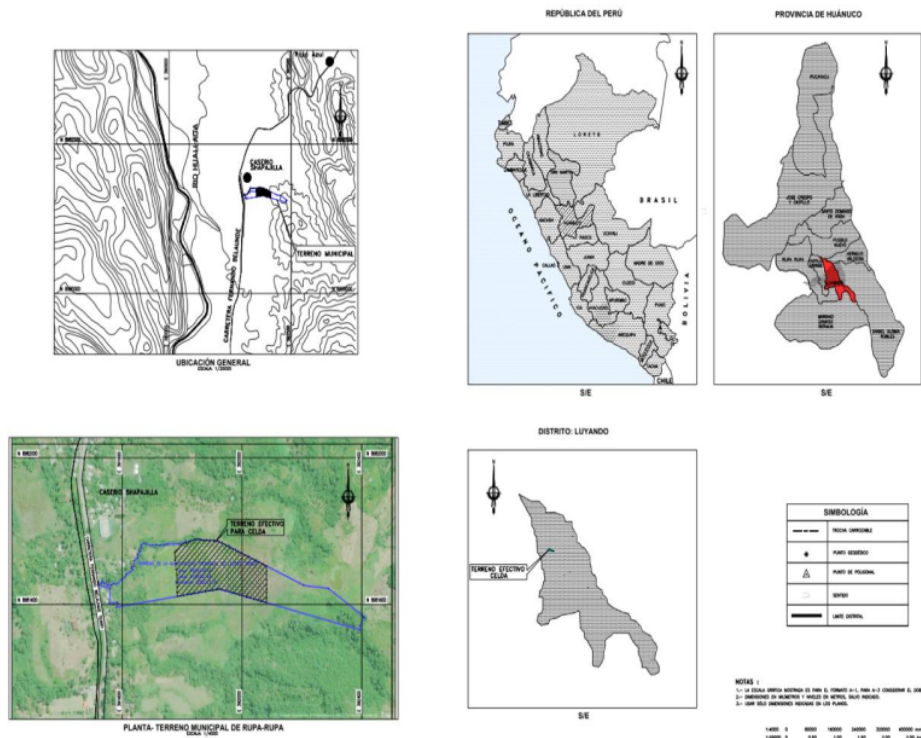


Figura 2. Ubicación de las Celdas Transitorias de Residuos Sólidos de Leoncio Prado

3.1.2. Ubicación geográfica

En la Carta Nacional del Instituto Geográfico Nacional se encuentra el distrito de Luyando, específicamente en la hoja 20k. Situado a una altitud de 700 m.s.n.m., se encuentra en las longitudes $9^{\circ} 14' 00''$ de latitud sur y $75^{\circ} 59' 30''$ de longitud oeste.

3.1.3. Características climáticas

Las celdas transitorias se encuentran en la selva alta, a altitudes que oscilan entre los 660 y 1300 m.s.n.m. Dependiendo de la altitud y la estación del año, el clima en esta región es tropical, cálido y húmedo. A pesar de esto, las precipitaciones son constantemente altas. La precipitación anual alcanza los 3179 mm, que aumenta a 3680 mm durante el invierno. La temperatura promedio anual es de $24,31^{\circ}\text{C}$ (SENAMHI, 2021).

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materiales

Se utilizó guantes quirúrgicos y mascarillas KN95. Para la recopilación de información, se emplearon fichas como instrumento de registro documental. Además, se utilizaron tableros, sobres manila, libretas de notas, lapiceros y mascarillas de tres pliegues.

3.2.2. Equipos

Se utilizaron dispositivos como un GPS Garmin 62s, una laptop ASUS y una cámara Canon 52S.

3.3. Metodología

3.3.1. Estimación de los residuos sólidos municipales depositados en las celdas

En primer lugar, se obtuvo la autorización de la subgerencia de Limpieza Pública de la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado, lo que permitió estimar los residuos sólidos acumulados en las celdas transitorias. Se organizó una mesa de trabajo informativa para explicar las características del estudio.

Una vez completada la presentación oficial, se solicitó a la Subgerencia de Limpieza Pública información sobre la disposición de residuos en la Infraestructura de disposición final. Se llevó a cabo una inspección inicial de dicha infraestructura, con el

propósito de reunirse con el personal técnico encargado y determinar las etapas del proceso, desde la llegada de los camiones hasta la disposición final de los residuos.

Finalmente, cuando arribaron los camiones compactadores, se estableció un área de descarga previa y se calculó diariamente la cantidad de residuos depositados en las celdas transitorias durante un período de cinco meses, según el generador.

Una vez recopilados todos los datos, se realizó una evaluación que abarcó desde el principio del proceso hasta la etapa final del estudio.

a) **Cuantificación de residuos sólidos**

El dimensionamiento de los compactadores que trasladan estos desechos sirvió como base para la metodología. El largo, alto y ancho de los vehículos de cada distrito se consideraron en este cálculo.

1
Caso 1: Cuando los residuos sólidos son trasladados con un vehículo compactador:

Se determinó el volumen de residuos del vehículo:

$$V = A \times L \times h \dots (2)$$

Donde:

- V= Volumen(m³)
- L= Largo(m)
- A= Ancho(m)
- h= Altura (m)

La siguiente fórmula se empleó para estimar el peso (toneladas) de los desechos:

$$1 \quad P = V \times d \dots (3)$$

Donde:

- P= Peso(Tn)
- V= Volumen(m³)
- d= Densidad (la densidad a considerar es de 0.60 Tn/m³)

El dispositivo normativo para el diseño de estas infraestructuras establece la densidad que se ha considerado 0,60 Tn/m³.

3.3.2. Estimación de la producción total de metano (CH₄) aprovechable

a) Cálculo de la generación de metano (CH₄)

Con el fin de medir la producción de metano, específicamente la relación con la disposición de residuos, se utilizaron los lineamientos de revisión de calidad establecidos en la guía para la Elaboración del Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero – Sector Residuos. El proceso incluye verificaciones relacionadas con estimaciones, análisis de datos y estudios técnicos aplicables en todas las etapas de un inventario de GEI. Seguidamente, se presenta una lista de los procedimientos específicos utilizados:

Además, se solicitó información detallada sobre la composición de los residuos, que incluyó paja, restos de jardín, madera, papel y textiles. La Gerencia de Gestión Ambiental y Defensa Civil del municipio llevó a cabo el Estudio de Caracterización de Residuos Sólidos.

b) Potencial de generación de metano

Después de la disposición final, el potencial de producción de CH₄ de los deshechos en un año, disminuye lentamente. A fin de estimar este fenómeno de producción de CH₄ de este volumen específico, se puede utilizar la siguiente ecuación.

$$L_O = (FCM \times COD \times COD_f \times F \times 16/12) \dots (4)$$

Donde:

Lo: Potencial de generación de metano (GG de CH₄/GG de residuos)

FCM: Factor de corrección para el metano (Fracción= 1)

COD: Carbono orgánico degradable (GG C/GG de residuos)

COD_F: Fracción de COD no asimilada es 0,5

F: Fracción de CH₄ en el gas de vertedero generado es 0,5

16/12: Cociente de pesos moleculares CH₄/C =16/12

¹ Para calcular el potencial de producción de metano, se necesitaron las variables adecuadas en la ecuación, teniendo en cuenta la infraestructura y la ubicación de las celdas transitorias. La tabla siguiente muestra cómo se realizó este proceso en función de estas consideraciones.

Tabla 1. Factores de ajuste del metano (CH₄)

Factor de ajuste Metano (CH ₄)		
² Lugar de eliminación de residuos	Valores del factor de ajuste de metano	Comentarios
Relleno Sanitario – controlado	1	Nivelación de residuos sólidos, compactación mecánica o material protector de la cubierta son ejemplos de disposición controlada de residuos.
Botaderos – profundo (> 5 m de residuos)	0,8	No cumplen con las especificaciones de los sitios controlados
Botadero – poco profundo (< 5 m de residuos)	0,4	¹ No cumple con los criterios de los lugares controlados
Vertederos no incluidos en ninguna categoría	0,60	Cuando no es posible clasificar en ninguna de las categorías anteriormente mencionadas.

Fuente: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2000)

Debido a sus características particulares, las celdas transitorias se consideran rellenos sanitarios controlados con un factor de ajuste de 1.

COD: Carbono orgánico degradable

Para calcular el carbono orgánico degradable, la guía recomienda utilizar la siguiente ecuación:

$$COD = (0.4 \times A) + (0.17 \times B) + (0.15 \times C) + (0.3 \times D) \dots (5)$$

Donde:

COD: Carbono Orgánico Degradable

A: Fracción de RSU compuesta de papel y textiles

B: Fracción de RSU formada por desechos de jardín

C: Fracción de RSU compuesta de restos de alimentos

D: La fracción de RSU compuesta de madera o paja

La fracción de cada tipo de carbono degradable se determinó utilizando datos calculados para la Provincia de Leoncio Prado. El porcentaje de residuos orgánicos domiciliarios del año 2023, clasificados por tipo, se detalla en los anexos, los cuales sirvieron como base para estos cálculos. Los datos organizados se agrupan en cuatro categorías según su representación.

Tabla 2. Porcentaje de residuos en la provincia de Leoncio Prado

Provincia	A Papel y textiles (%)	B Residuos de jardín, residuos de parques u otros (%)	C Compuesta de restos de alimentos (%)	D Madera o paja (%)	E Otros (%)
Leoncio Prado	13,62%	1,8%	63,81%	0,26%	20.51%

Fuente: SIGERSOL, Departamento de Huánuco, provincia de Leoncio Prado 2023.

Tabla 3. Fracción de COD no asimilada (CODf)

Fracción de carbón orgánico degradable no asimilado (CODf)		
COD _f	0.5	%

Fuente: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2000).

Según los datos proporcionados por el IPCC, la proporción de carbono orgánico degradable no asimilado es de 0,5.

Tabla 4. Fracción de CH₄ en gas de vertedero generado

Fracción de CH ₄ en el gas de vertedero (F)		
F	0.5	%

Fuente: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2000).

Los indicadores creados por el IPCC indican que el porcentaje de CH₄ en el gas de vertedero es del 0,5.

Los pesos moleculares CH₄/C son 16/12.

Después de determinar las variables, se sustituyen los valores para calcular el potencial de generación de metano.

c) Metano (CH₄) generado en el año t (GG/año)

El cálculo anual de los residuos sólidos requiere datos sobre la cantidad de residuos producidos durante el año. Estos datos se convirtieron en unidades de GG RSU utilizando como referencia la tabla 3.

Estimación de la cantidad total de metano aprovechable

Se observa el total de cada año.

$$\text{CH}_4 \text{ Emitido durante el año } t \left(\frac{\text{Gg}}{\text{año}} \right) = [\text{CH}_4 \text{ generado durante el año } t - R(t) \times (1 - \text{OX})] \dots (6)$$

Donde:

$R(t)$: CH_4 recuperado durante el año t del inventario (GG/año)

OX: Factor de oxidación (fracción es igual a 0)

Factores de corrección

Los factores de corrección siguientes se emplearon para estimar la generación de metano:

Tabla 5. Factor de ajuste

Datos	Valores	Fuente de información
Carbono Orgánico Degradable (COD)	2 0,5	OBP2000, Capítulo 5, Página 5,10
Fracción de carbón liberado como CH_4	2 0,5	OBP2000, Capítulo 5, Página 5,10
Factor de corrección de Metano (FCM)	0,01	OBP2000, Capítulo 5, Página 5,10
Peso atómico del carbono	12	Tabla periódica de los elementos periódicos

Fuente: MINAM (2016).

Incertidumbre de los datos

Se empleará un factor de corrección para calcular el valor per cápita de la data contable, debido a que la información relevante para utilizar en la ecuación de cálculo de metano tiene un plazo de 12 meses como mínimo. Además, la infraestructura de disposición final temporal de Leoncio Prado comenzó a funcionar en agosto del 2021.

Se proporciona la siguiente descripción del proceso:

Tabla 6. Rango de incertidumbre.

2 Datos de la actividad y factores de emisión	Intervalo de incertidumbre
Total, de los Residuos Sólidos Municipales (TDSM)	En países que recopilan regularmente información sobre la producción de residuos, un valor comúnmente utilizado es el 30%.
Fracción del TDSM enviado a las zonas de disposición final	2 Para los países con datos de baja calidad, se emplea un factor superior que dos.
7 Carbono orgánico degradable (COD)	Para los valores predeterminado del IPCC, se considera un margen del 20% aproximadamente.
La fracción de carbono orgánico degradable que se descompone (CODf).	Para el valor por defecto del IPCC (0,5): ± 20%.
El valor de la fracción de CH ₄ en el gas de vertedero producido es F y tiene un valor de 0,5.	El valor predeterminado del IPCC: ±5%.
Recuperación de metano (R)	6 La manera en que se calculan las cantidades de CH ₄ quemado en antorcha o utilizado estable el rango de incertidumbre: ± 50% en caso de no realizar mediciones.

1
Fuente: MINAM (2016).

3.3.3. Estimación del potencial energético de biogás en las celdas

González (2015) sugiere que se utilice la fórmula siguiente 1 para determinar el potencial energético del biogás producido en la infraestructura de disposición final temporal:

$$P_x = \frac{Q_x \times P_{c(\text{metano})}}{31536000} \times E_c \times \frac{k}{1000} \dots (7)$$

10

Donde:

 P_x : Potencia disponible en cada año [kW] $P_{c(\text{metano})}$: Poder calorífico del metano igual a $35,53 \times 10^6$ [J/m³ CH₄] E_c : Eficiencia de colecta de gases [%]

A fin de calcular el flujo de metano producido, creamos la ecuación siguiente.

$$Q_x = K \times R_x \times L_0 \times e^{-k(x-T)} \dots (8)$$

1

Donde:

 Q_x : Flujo de metano generado en el año x por el RSU depositado en el año T [m³ CH₄/año] R_x : Flujo de residuos en el año x [kg RSU] T : Año de deposición del residuo del relleno sanitario(año) X : Año actual

Se utilizan datos del Banco Mundial, el IPCC y la Oficina de Protección Ambiental Estadounidense (USEPA) a fin de calcular la energía que se puede extraer del metano. La siguiente tabla muestra los valores mencionados, que incluyen las constantes K y L_0 :

Tabla 7. Valores de K y L_0

Variables	Variaciones	Climas		
		Húmedo	Humedad media	Seco
L_0 [m ³ CH ₄ /kg RSU]	0-0,312	0,14-0,18	0,14-0,18	0,14-0,18
$K = [\text{año}^{-1}]$	0,003-0,4	0,10-0,35	0,05-0,15	0,02-0,10

Fuente: Cálculo del potencial energético de los residuos urbanos en tres municipios de la provincia de Luanda, Angola (2015).

Para calcular la producción de biogás, es necesario disponer de información precisa sobre la infraestructura necesaria para su disposición final. En este caso, se utilizó la

información proporcionada por tres municipios de Angola, dado que las celdas transitorias no tienen un sistema para aprovechar la energía del metano. Estos datos se detallan en la tabla 8.

Tabla 8. Datos de eficiencia de colecta de biogás

Datos de relleno sanitario	
Tasa de quema (%)	20
Reemplazo de la energía eléctrica generada a partir de fuentes no renovables con gases de efecto invernadero	0,2782
Eficiencia de recolección de biogás	75
Eficiencia de combustión de biogás	95

Fuente: Cálculo del potencial energético de los residuos urbanos en tres municipios de la provincia de Luanda, Angola (2015).

Según esta tabla, se utilizó un valor del 0,75% para la eficiencia de recolección de biogás para calcular el potencial energético de la infraestructura de disposición temporal en la provincia de Leoncio Prado.

3.4. Análisis estadístico del estudio

En esta investigación, se analizó la distribución de residuos en las celdas transitorias y las emisiones de metano a través del tiempo empleando estadística descriptiva. El uso de histogramas facilitó la identificación de las variaciones en las concentraciones de metano en la celda transitoria en el transcurso de distintos períodos. Estos histogramas proporcionaron una visión preliminar del potencial energético calculado.

3.5. Nivel de investigación

El presente estudio examina la posibilidad de utilizar el metano (CH₄) producido en la Celda Transitoria de Residuos Sólidos Municipales de la provincia de Leoncio Prado como fuente de energía utilizando un enfoque de investigación descriptivo. En este tipo de investigación, según Jacobo (2013), las variables del fenómeno no se modifican ni manipulan; en cambio, el enfoque se centra en la descripción y medición de dichas variables. Aunque es posible hacer predicciones a futuro, estas se consideran aún prematuras o fundamentales.

3.5.1. Tipo de investigación

1 Esta investigación se clasifica como aplicada, porque calcula el potencial energético del metano (CH_4) producido en la Celda Transitoria de la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado utilizando principios de la ciencia ambiental. Jacobo (2013) afirma que la investigación aplicada se enfoca en aplicar el conocimiento adquirido para resolver problemas en el mundo real.

29 3.5.2. Diseño de investigación

Se utilizó un diseño de investigación no experimental para este estudio porque las variables no se modificaron. En lugar de intervenir en el entorno, el enfoque se centró en observar e investigar los fenómenos en su contexto natural.

1 3.5.3. Variables experimentales

Variable dependiente

Potencial de aprovechamiento energético

Variable independiente

Metano (CH_4) de la Celda Transitoria de Residuos Sólidos Municipales.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Estimación de Residuos sólidos depositados en las celdas Transitoria

La Municipalidad Provincial de Leoncio Prado proporcionó los datos necesarios para calcular la cantidad de residuos, abarcando desde el inicio de la operación de la infraestructura hasta febrero de 2024, pero solo tomaremos los datos desde el inicio de su operación hasta el año 2023.

¹
Tabla 9. Residuos sólidos acumulados en las celdas transitorias

Fechas	Volumen de Residuos	Celda transitoria
	sólidos suelto (m ³)	Total (m ³) (Compactación+Confinamiento)
Mes - Año	Total (m ³)	Total (m ³) (Compactación+Confinamiento)
AGO-2021	6457,82	2453,97
SET-2021	8384,41	3186,08
OCT-2021	5247,28	1993,97
NOV-2021	8847,17	3361,92
DIC-2021	9353,4	3554,29
ENE-2022	10385,47	3946,48
FEB-2022	8072,52	3067,56
MAR-2022	11065,31	4204,82
ABR-2022	7245,13	2753,15
MAY-2022	7985,18	3034,37
JUN-2022	7889,05	2997,84
JUL-2022	8386,77	3186,97
AGO-2022	7006,07	2662,32
SET-2022	7904,78	3003,81
OCT-2022	10459,2	3974,5
NOV-2022	9422,5	3580,55
DIC-2022	9453,87	3592,47

Fechas	Volumen de Residuos	Celda transitoria
	sólidos suelto (m ³)	
Mes - Año	Total(m ³)	Total (m ³) (Compactación+Confinamiento)
ENE-2023	3050	3442,8
FEB-2023	3860	1158
MAR-2023	3560	1068
ABR-2023	3300	990
MAY-2023	3200	960
JUN-2023	3120	936
JUL-2023	2569	770,7
AGO-2023	3850	1155
SET-2023	2945	883,5
OCT-2023	2760	828
NOV-2023	3860	1158
DIC-2023	3987	1196,1
TOTAL	189 626,93	69 101,17

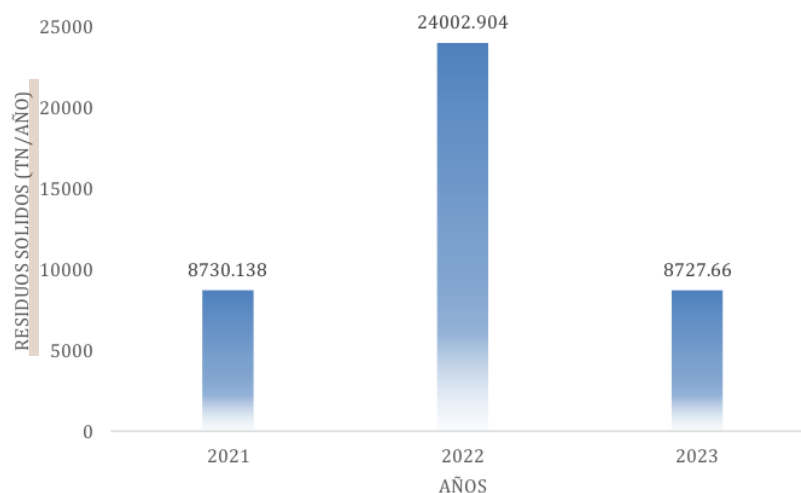
Fuente: Municipalidad provincial de Leoncio Prado

Los datos se recopilieron desde el inicio de la operación de la infraestructura de disposición final hasta el año 2023 para realizar nuestros cálculos. Es importante destacar que esta información es esencial para comprender la complejidad y la cantidad de residuos sólidos producidos en cinco distritos de la provincia de Leoncio Prado y evaluar su impacto en el medio ambiente. Estos hallazgos se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 10. Tasa anual y mensual de los residuos solidos en la celda transitoria

AÑOS	TASA ANUAL (Tn)	TASA MENSUAL (Tn)
2021	8,730.14	1,746.028
2022	2,4002.904	2,000.242
2023	8,727.66	727.305

Las siguientes figuras facilitan la identificación de las variaciones ⁷ de residuos sólidos en la celda transitoria en el transcurso de los 3 años.

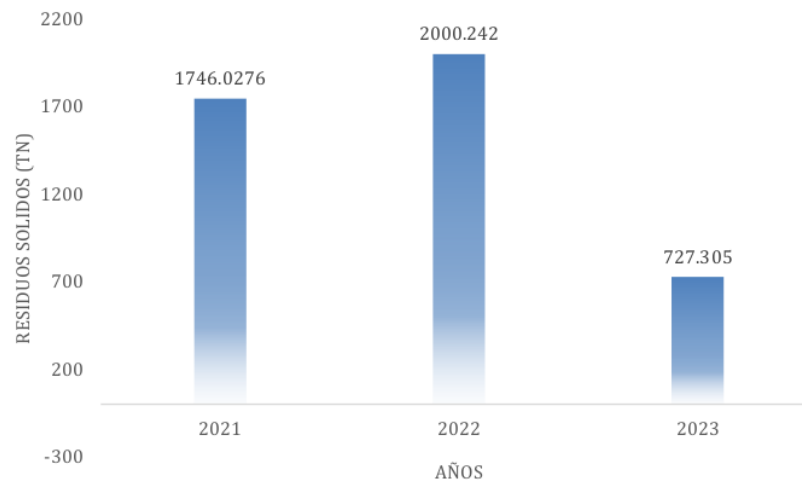


⁵ **Figura 3. Evolución de la disposición de Residuos sólidos**

La evolución de los residuos sólidos depositados en las celdas transitorias desde su creación se muestra en la figura anterior. En 2022, se habían depositado 24,002.90 toneladas en las celdas hasta la fecha de evaluación, mientras que en 2021 se depositaron 8,730.14 toneladas y en el 2023 se depositaron 8727.66 toneladas. Esta distinción se debe a los períodos de funcionamiento de las celdas. Por ejemplo, las celdas operaron todo el año 2022, lo que explica el volumen significativo registrado durante ese período. En contraste, el valor es significativamente menor en 2023 pese a que también funcionaron todo ese año, se observa un gran cambio; según el estudio de Chacca (2023) ¹ encontró una correlación positiva entre ¹ educación ambiental y la reducción de residuos sólidos. Por ejemplo, en el 2023, la implementación del PIGARS en la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado para el período 2021-2025 mostró una reducción significativa. Esto indica que la sostenibilidad ambiental y la gestión de residuos sólidos pueden mejorar significativamente con la educación y prácticas responsables.

Díaz (2023) ⁵ afirma que el clima cálido favorece la producción de biogás debido a la cantidad de residuos orgánicos almacenados en los rellenos sanitarios. Ambuludi et al. (2022) sugieren que se deben tener en cuenta las características específicas del lugar para obtener un

cálculo más preciso. Siguiendo estas directrices, el estudio comenzó evaluando el estado actual de las celdas transitorias y calculando la cantidad total de residuos orgánicos ingresados por año en toneladas.



⁵ **Figura 4. Tasa de generación mensual de Residuos sólidos de la celda transitoria.**

Se observa que ¹³ la tasa de generación mensual para el año 2021 es de 1,746.028 toneladas de residuos sólidos, mientras que para el 2023 la tasa de generación mensual fue 727.305 toneladas operando todo el año, pese a que en el 2021 la celda solo funciono 5 meses, la variación observada en la tasa de generación mensual de residuos sólidos puede ser por la combinación de varios factores sociales, económicos y ambientales. En primer lugar, el aumento en 2022 (2,000.242 toneladas) podría estar relacionado con un incremento en los hábitos de consumo y la recuperación económica tras la pandemia de COVID-19, que generó un aumento temporal en la generación de residuos debido a cambios en el comportamiento de consumo.

³ Pariona y Matos (2022) afirman que la generación de residuos tuvo un comportamiento exponencial, principalmente sobre el uso de plásticos de un solo uso, así como, las mascarillas y guantes. Las directrices emitidas por los organismos internacionales para el manejo de los residuos en este contexto hacen influir en el uso del EPP. La literatura evidencia ³ de que los impactos generados por la Covid-19 con respecto al manejo de los residuos han afectado principalmente a los procesos de segregación, reciclaje y eliminación de residuos sólidos.

La disminución notable en 2023 podría ser una señal de que las políticas de gestión de residuos y los cambios en los patrones de consumo están comenzando a tener un efecto significativo en la reducción de residuos generados, también se sabe que en este año se implementó el PIGARS en la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado.

4.2. Producción total de metano (CH₄) aprovechable en la celda Transitoria

Según la metodología, se debe determinar primero el potencial de producción de metano y luego calcular la cantidad de metano producido en toneladas (t).

$$\text{CH}_4 \text{ Emitido durante el año } t \left(\frac{\text{Gg}}{\text{año}} \right) = [\text{CH}_4 \text{ generado durante el año } t - R(t) \times (1 - \text{OX})] \dots (6)$$

Se utilizó la ecuación siguiente para determinar la cantidad de metano producida en un año:

$$\text{Emisiones de CH}_4 = [(\text{RSU}_T \times \text{RSU}_F \times L_0)] - R \times (1 - \text{OX}) \dots (1)$$

Se debe calcular el potencial de producción de metano utilizando la siguiente ecuación para estimar la producción de metano en un año.

$$L_0 = [\text{FCM} \times \text{COD} \times \text{COD}_f \times F \times 16/12] \dots (4)$$

Después de encontrar las ecuaciones necesarias para estimar la producción anual de metano, el valor se calculó utilizando la guía para la elaboración del reporte anual de gases de efecto invernadero para el sector de residuos. Los hallazgos son los siguientes:

4.2.1. Determinación del factor de corrección para el metano FCM

Según la Tabla 1, las celdas transitorias se clasifican como relleno sanitario controlado, con un FCM de 1; donde se realiza la nivelación de residuos y compactación mecánica o material protector de la cubierta.

$$FCM = 1$$

4.2.2. Cálculo del carbono orgánico degradable

$$COD = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,3 \times D) \dots (5)$$

Para establecer la proporción de cada tipo de carbono degradable, empleamos los datos considerados para la provincia de Leoncio Prado, que se encuentran en los anexos. Los valores porcentuales de la composición de los residuos orgánicos de la casa para el año 2023 se presenta a continuación:

Tabla 11. Valores de porcentaje de residuos en la provincia de Leoncio Prado

	A	B	C	D	E
Provincia	Papel y textiles (%)	Residuos de jardín, residuos de parques u otros (%)	Compuesta de restos de alimentos (%)	Madera o paja (%)	Otros (%)
Leoncio Prado	13,62%	1,8%	63,81%	0,26%	20.51%

Fuente: SIGERSOL (2023), Departamento de Huánuco, provincia de Leoncio Prado.

El cuadro siguiente resulta de reemplazar la ecuación 4 después de determinar la fracción de composición.

$$COD = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,3 \times D) \dots (5)$$

$$COD = (0,4 \times 13,62) + (0,17 \times 1,8) + (0,15 \times 63,81) + (0,3 \times 0,26)$$

$$COD = 5,448 + 0,306 + 9,5715 + 0.078$$

$$COD = 15,40\%$$

4.2.3. Determinación de la fracción de COD no asimilada COD_f

Fracción de carbón orgánico degradable no asimilado (COD _f)	
COD _f	0,5 %

Según los criterios del IPCC, el porcentaje de carbono orgánico degradable asimilado debe ser del 0,5%.

$$COD_f = 0,5\%$$

4.2.4. **Determinación de Fracción de CH₄ en el gas de vertedero generado**

Fracción de CH ₄ en el gas de vertedero generado(F)		
F	0,5	%

Fuente: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2000)

Según los criterios establecidos por el IPCC, la cantidad de metano (CH₄) presente en el gas de vertedero es del 0,5.

$$F = 0,5\%$$

4.2.5. **Determinación del cociente de peso molecular**

El IPCC (2000) afirma que el cociente de pesos moleculares es de 16/12.

$$\text{Cociente de pesos moleculares } CH_4 = 16/12$$

4.2.6. **Cálculo del potencial de generación de metano**

Se estableció el potencial de producción de metano tras obtener los valores de las variables correspondientes.

$$L_0 = [FCM \times COD \times COD_f \times F \times 16/12] \# \dots (4)$$

Donde:

FCM: Factor de corrección para el metano (Fracción) = 1

COD: Carbono orgánico degradable (GG C/GG de residuos) = 15,40

COD_f: Fracción de COD no asimilada = 0,5

F: Fracción de CH₄ en el gas de vertedero generado = 0,5

16/12: Cociente de pesos moleculares CH₄/C = 16/12

Obtenemos el resultado siguiente reemplazando los valores de la ecuación.

$$L_0 = [1 \times 15,40 \times 0,5 \times 0,5 \times 16/12]$$

$$L_0 = 0,0512 (\text{Gg de } CH_4/\text{Gg de residuos})$$

Determinando que 0,0512 GG de CH_4 tiene el potencial de producir metano.

4.2.7. Cálculo de las emisiones de CH_4 generada por los residuos

$$\text{Emisiones de } CH_4 = [(RSU_T \times RSU_F \times L_0)] - R \times (1 - OX)$$

a) Cálculo del RSU_T

Para calcular la cantidad total de residuos sólidos urbanos en toneladas por año (T/Año), se utilizaron los datos anteriores sobre los residuos urbanos totales, que se convirtieron a unidades de GG RSU, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 12. Residuos sólidos dispuestos en las celdas transitorias

AÑOS	Residuos sólidos urbanos totales (t/año)	Total, anual RSU dispuestos (GG RSU)
2021	8,730,14	8,73
2022	24,002,90	24,00
2023	8,727,66	8,73

b) Determinación de CH_4 recuperado

En ausencia de recuperación de metano se muestra un intervalo de incertidumbre de +10%, según los expertos de la Guía para la elaboración del inventario anual de gases.

1	Recuperación de metano (R)	La estimación de las cantidades de CH ₄ recuperado y quemado en una antorcha o utilizado determina el intervalo de incertidumbre: ± 10 % si se mide in situ. ± 50% en caso de no realizar la medición.
---	-------------------------------	---

1 Además, no se recupera metano en las celdas transitorias, por lo que se cree que la cantidad de CH₄ recuperado es igual a cero.

$$R = 0$$

RSU_F: Fracción de RSU eliminado

1 Los datos de las celdas transitorias indican que la fracción total acumulada o eliminada en estas celdas es del 100%, lo que equivale a un valor de 1.

$$RSU_f = 1$$

Para calcular las emisiones de CH₄, se sustituyen los valores necesarios en la siguiente ecuación.

$$\text{Emisiones de CH}_4 = [(\text{RSU}_T \times \text{RSU}_F \times L_0)] - R \times (1 - \text{OX})$$

Donde:

Emisiones de CH₄: CH₄ emitido durante el año base del inventario

RSU_T: Total de RSU generado (GG/año)

L₀: 15,40

R: 0

OX: 0

Se creó una tabla para calcular las emisiones anuales de metano basándose en los resultados de cada año.

1 **Tabla 13. Cálculo de emisiones anuales netas de metano en las celdas transitorias**

	A	B	C	D	E		
AÑO	Generación (Tn/día)	Generación (Tn/año)	Total, anual RSU dispuestos (GG RSU)	Factor de corrección de metano (FCM)	Contenido de carbono orgánico en RSU (COD)	Fracción de COD que se degrada realmente (CODf)	Fracción de carbón liberado como CH ₄ (F)
2021	57,06	8730,14	8,730138	1	0,154	0,5	50,00%
2022	65,76	24002,90	24,002904	1	0,154	0,5	50,00%
2023	23,91	8727,66	8,72766	1	0,154	0,5	50,00%

	F	G	H	J	K	L	M	N	O
		Factor de potencial Generación de CH ₄ por Unidad de Residuos (Lo)	Generación de CH ₄ por Unidad de Residuos	Generación Anual Bruta de CH ₄	Metano Recuperado por año	Generación anual Neta de CH ₄	Uno menos el Factor de Corrección por Oxidación de CH ₄	Emisiones Anuales Netas de CH ₄	Emisiones Anuales Netas de Toneladas CH ₄
AÑOS	(16/12)	(L ₀)	(L ₀)	(GG CH ₄)	(GG CH ₄) por año	(GG CH ₄)		(GG CH ₄)	
		(GG CH ₄ /GG RSU)	(GG CH ₄ / GG RSU)	J=(H x A)	(GG CH ₄)	L=(J - K)		N=(L x M)	
		G=(C x D x E x F)	H=(B x G)	J=(H x A)		L=(J - K)		N=(L x M)	
2021	1,33	0,051	0,051	0,447	0,000	0,447	1,000	0,447	447,027
2022	1,33	0,051	0,051	1,229	0,000	1,229	1,000	1,229	1229,069
2023	1,33	0,051	0,051	0,447	0,000	0,447	1,000	0,447	446,900
				Total					2123,00

c) ¹ Cálculo de la producción total de metano aprovechable

Los resultados obtenidos durante los tres años de operación de las celdas transitorias se compilaron.

$$\text{CH}_4 \text{ Emitido durante el año } t \left(\frac{\text{GG}}{\text{año}} \right) = [\text{CH}_4 \text{ generado durante el año } t - R(t) \times (1 - \text{OX})]$$

Donde:

CH₄: Recuperado durante el año t del inventario (GG/año)

R(t): CH₄ recuperado durante el año t del inventario (GG/año) = 0

OX: Factor de oxidación (fracción) = 0

$$\text{CH}_4 \text{ Emitido durante el año} = [(2021 + 2022 + 2023)]$$

$$\text{CH}_4 \text{ Emitido durante los 3 años} = 2123 \text{ Tn}$$

¹ En la provincia de Leoncio Prado, la celda transitoria de residuos sólidos municipales produce 2,123 toneladas de metano (CH₄). Además, se muestra la cantidad de metano que se libera cada año.

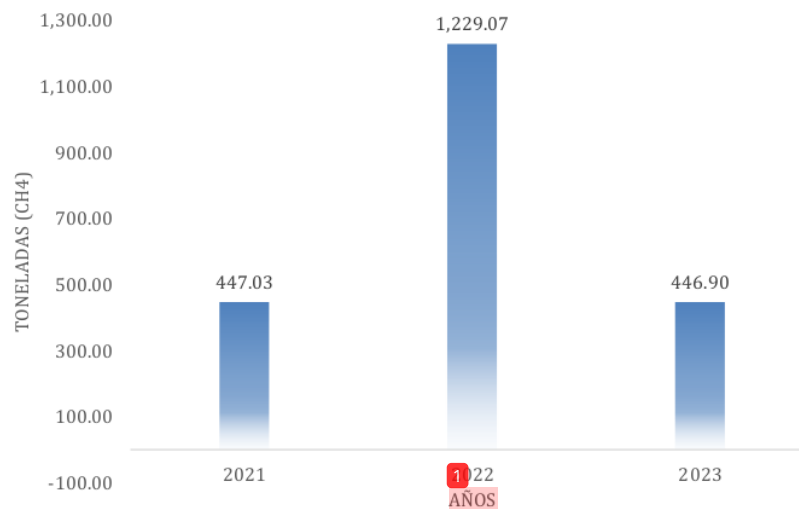


Figura 5. Producción anual de metano en las celdas transitorias

La figura 5 muestra una variación significativa en la cantidad de metano emitido cada año. En 2021, se registró una cantidad de 447.03 toneladas de metano en la celda transitoria en sus 5 meses de funcionamiento, mientras que en 2022 se registró la cantidad más alta de 1,229.07 toneladas y en el 2023 fue 446.90 toneladas siendo la más baja pese a haber operado todo el año. Esta variante está estrechamente relacionada con los meses en los que las celdas operan anualmente. La celda transitoria emitió 2,123 toneladas netas de metano aprovechable en los últimos tres años. Se utilizó la metodología sugerida por el IPCC (2006) y respaldada por el MINAM para esta investigación. Esta metodología incluyó un enfoque detallado en los residuos sólidos y el cálculo de emisiones tanto a nivel nacional como local.

Los hallazgos corroboran el informe del Inventario nacional de gases de efecto invernadero del MINAM (2023), que indica que el sector de residuos contribuyó con el 5% de GEI en 2019. Además, López (2011) señala que los vertederos emiten aproximadamente el 33,9% del metano. Aunque este porcentaje puede parecer bajo a nivel nacional, aumenta significativamente cuando se analiza de manera independiente, como demuestra López (2011). Según la FAO (2011), el metano es el segundo gas con el mayor impacto en el calentamiento global, por lo que es aún más importante reducir estas emisiones.

Es importante destacar que las altas concentraciones de metano pueden representar un peligro directo para la salud porque este gas puede absorberse a través de la exposición a la piel o la inhalación (Red Biogas, 2013). Es fundamental manejar adecuadamente los residuos y vigilar la generación de metano para reducir el impacto del cambio climático y salvaguardar la salud pública.

4.3. Potencial energético de biogás en las Celdas Transitorias

4.3.1. Cálculo del potencial energético

Gonzales (2015) utilizó la ecuación siguiente para calcular la capacidad energética del biogás producido en las celdas:

$$P_x = \frac{Q_x \times P_{c(\text{metano})}}{31536000} \times E_c \times \frac{k}{1000} \# \dots (7)$$

1
Donde:

P_x : Potencia disponible en cada año [kW]

Q_x : Flujo de metano generado en el año x por el RSU depositado en el año T
[m³ CH₄/año]

$P_{c(\text{metano})}$: Poder calorífico del metano igual a 35,53 x 106[J/m³CH₄]

E_c : Eficiencia de colecta de gases [%]

Para ello, se calculó el flujo de metano producido utilizando la siguiente ecuación.

$$Q_x = K \times R_x \times L_0 \times e^{-k(X-T)}$$

1 4.3.2. Cálculo del flujo de metano generado en determinados años

Se determinó el flujo de residuos sólidos en kilogramos para este cálculo.

1
Tabla 14. Flujo de residuos sólidos

AÑOS	Flujo de residuos sólidos (kg RSU)
2021	8,730,138
2022	24,002,904
2023	8,727,660
TOTAL	41,460,702

1 4.3.3. Cálculo del flujo de metano generado

$$Q_x = K \times R_x \times L_0 \times e^{-k(X-T)}$$

1
 Q_x : Flujo de metano generado en el año x por el RSU depositado en el año T
[m³ CH₄/año]

R_x : Flujo de residuos en el año (kg RSU)

T: año de deposición del residuo en el relleno sanitario

x: año actual

k = Valor propuesto por la USEPA para clima de Humedad media es de 0,14

$L_0 = 15,40\%$ convertido en toneladas = 6,573,55 Toneladas

a) **Cálculo para el año 2023:**

$$Q_x = K \times R_x \times L_0 \times e^{-k(X-T)}$$

$$Q_x = 0,14 \times 8\,727.660 \times 6\,573,55 \times e^{-0,14(2023-2021)}$$

$$Q_x = 6\,070\,484\,725 \text{ [m}^3\text{CH}_4\text{/año]}$$

De acuerdo con los resultados, el flujo de metano producido en 2023 es de 6 070 484 725 m³ de CH₄ por año.

b) **Cálculo para el año 2022**

$$Q_x = K \times R_x \times L_0 \times e^{-k(X-T)}$$

$$Q_x = 0,14 \times 24\,002,904 \times 6\,573,55 \times e^{-0,14(2022-2021)}$$

$$Q_x = 19\,203\,950\,020 \text{ [m}^3\text{CH}_4\text{/año]}$$

De acuerdo con los resultados, el flujo de metano producido en 2022 es de 19 203 950 020 m³ de CH₄ por año.

c) **Cálculo para el año 2021**

$$Q_x = K \times R_x \times L_0 \times e^{-k(X-T)}$$

$$Q_x = 0,14 \times 8\,730,138 \times 6\,573,55 \times e^{-0,14(2021-2021)}$$

$$Q_x = 8\,034\,319\,811 \text{ [m}^3\text{CH}_4\text{/año]}$$

De acuerdo con los resultados, el flujo de metano producido en 2021 es de 8 034 319 811 m³ de CH₄ por año.

4.3.4. Cálculo del potencial disponible en el año

Gonzales (2015) sugiere que la siguiente ecuación puede emplearse para establecer el potencial energético del biogás generado en las celdas:

$$P_x = \frac{Q_x \times P_c(\text{metano})}{31536000} \times E_c \times \frac{k}{1000}$$

Donde:

P_x : Potencia disponible en cada año [kW]

Q_x : Flujo de metano generado en el año x por el RSU depositado en el año T [m^3 CH_4 /año]

P_c (metano): Poder calorífico del metano igual a $35,53 \times 10^6$ [J/ m^3 CH_4]

E_c : El potencial energético del biogás ¹ Eficiencia de colecta de gases [0,75%]

k = Valor propuesto por la USEPA para clima de Humedad media es de 0,14

a) Cálculo para el 2023

Sustituimos los valores previamente obtenidos en la ecuación.

$$P_x = \frac{6070484725 * 3,766}{31536000} * 0,75 * \frac{0,14}{1000}$$

$$P_x = 76,12 \text{ kW}$$

De acuerdo con los resultados, el potencial energético producido para en el 2023 es de 76,12 KW por año.

b) Cálculo para el 2022

Sustituimos los valores previamente obtenidos en la ecuación.

$$P_x = \frac{19203950020 * 3,766}{31536000} * 0,75 * \frac{0,14}{1000}$$

$$P_x = 240,81 \text{ kW}$$

De acuerdo con los resultados, el potencial energético producido para en el 2022 es de 76,12 KW por año.

c) Cálculo para el 2021

Sustituimos los valores previamente obtenidos en la ecuación.

$$Px = \frac{8034319811 * 3,766}{31536000} * 0,75 * \frac{0,14}{1000}$$

$$Px = 100,75 \text{ kW}$$

De acuerdo con los resultados, el potencial energético producido para en el 2021 es de 100,75 KW por año.

Tabla 15. Potencial energético disponible en la celda transitoria

AÑOS	Potencial energético (KW)
2021	100,75
2022	240,81
2023	76,12
TOTAL	417,68

Con los resultados obtenidos para el 2021, 2022 y 2023 graficamos, lo que resultó en la figura siguiente.

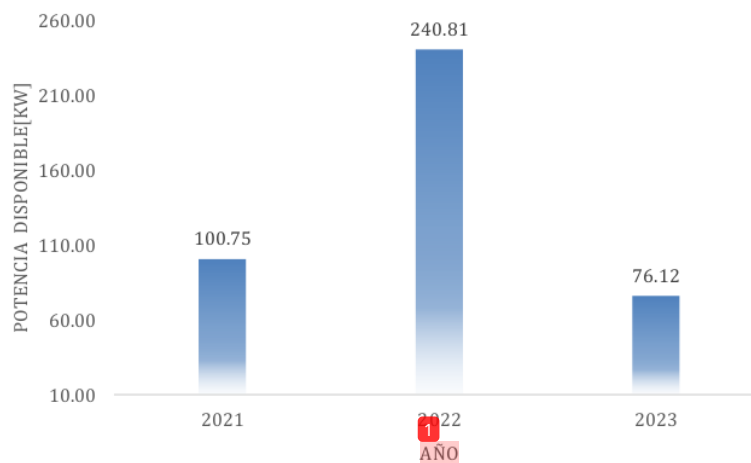


Figura 6. Potencial disponible (kW) por año en las celdas transitorias

Basado en los cálculos realizados en función de la cantidad de residuos sólidos, el potencial energético del biogás en las celdas transitorias es de 417.68 kW. Se empleó el

método sugerido por la USEPA para evaluar este potencial. Tanto a nivel local como nacional, esta metodología permitió analizar y calcular el potencial energético de los residuos sólidos urbanos. La energía que podría generarse a partir de las celdas transitorias se calculó utilizando esta técnica, y los resultados coinciden con los encontrados por Gonzales y Madrigal (2018).

Se ha demostrado que una gestión adecuada de los residuos sólidos puede tener un impacto significativo en la generación de energía, y que después del cierre del relleno sanitario, la producción de energía disminuye de manera exponencial. Este año, las celdas transitorias probablemente dejen de funcionar al final de su vida útil. Además, Pala (2006) afirmó que la producción de energía a partir de residuos sólidos es una opción viable y económica para utilizar turbinas para generar electricidad. Por lo tanto, se podría aprovechar el potencial energético de las celdas transitorias en forma de electricidad tanto durante su operación como después de su cierre.

Díaz (2023) y Hurtado (2023) coinciden en sus investigaciones en que el metano tiene el potencial de proporcionar energía tanto a las familias cercanas como a la propia celda transitoria. Ambos autores resaltan su importante beneficio económico; ya que, con la tecnología adecuada, la inversión inicial puede ser recuperada en alrededor de tres años. Es importante destacar que las celdas transitorias son una oportunidad energética valiosa que ayudaría a las comunidades cercanas y su operación sostenible. Además, esto podría ayudar a que la población de la región perciba estos proyectos de manera positiva y los acepte con mayor facilidad.

Según Nieto et al. (2021), se puede estimar el impacto económico de los residuos calculando la energía producida a partir de los residuos sólidos y utilizando la valorización. Esto contribuye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU y a la Agenda 2030. Este método es consistente con la investigación porque al comprender el potencial energético de los residuos, se pueden tomar decisiones informadas sobre su uso y evaluar su impacto económico.

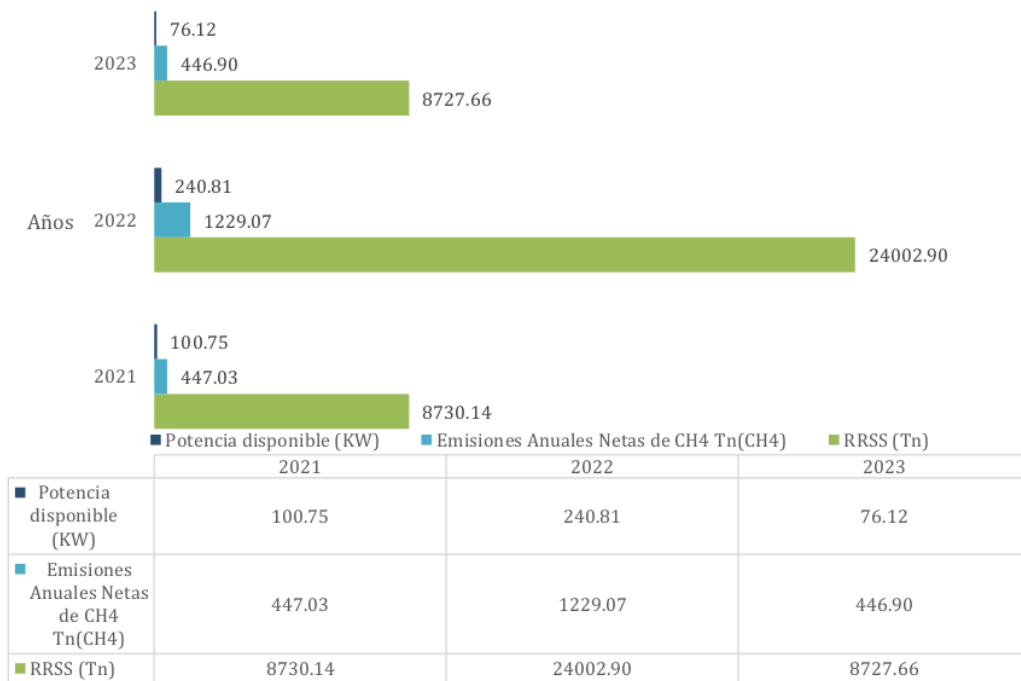


Figura 7. Relación de RRSS, Metano y el potencial disponible anual.

Como se muestra en la Figura 7, la cantidad de residuos sólidos depositados está directamente relacionada con el potencial energético y las emisiones de metano de las celdas transitorias.

La cantidad de residuos sólidos depositados en los rellenos sanitarios tiene una relación directa con el potencial energético y las emisiones de metano generadas durante su descomposición. Diversos estudios han demostrado que el volumen de residuos influye en la cantidad de biogás producido, especialmente metano, un gas con un alto potencial energético, Como lo demuestran López y Pérez (2019). Este metano, si no se captura y utiliza adecuadamente, contribuye significativamente al cambio climático debido a su alto poder de calentamiento global (IPCC, 2014).

V. CONCLUSIONES

1. El potencial energético del metano (CH_4) en la celda transitoria de residuos sólidos municipales de la provincia de Leoncio Prado es de 417,68 kW durante el período 2021-2023.
2. La cantidad máxima acumulada alcanzó las 24 002,90 toneladas en 2022; sin embargo, para 2023, esta cifra se redujo a 8 727,66 toneladas. Este cambio enfatiza la necesidad de gestionar los residuos sólidos de manera eficiente y sostenible para reducir su impacto en el medio ambiente.
3. La celda transitoria de residuos sólidos municipales de la provincia de Leoncio Prado produjo 2 123 Tn de metano aprovechable en 3 años. El volumen más bajo de metano aprovechable fue de 446,90 Tn en 2023, y el más alto de 1 229,07 Tn en 2022, lo que resalta la relación directa entre las emisiones de metano y la cantidad de residuos sólidos depositados.
4. Se calcula que el potencial energético del biogás producido por las celdas transitorias de residuos sólidos municipales de la provincia de Leoncio Prado es de 417,68 kW. El potencial energético alcanzó los 240,81 kW en 2022, superando tanto las máximas como las mínimas registradas de 76,12 kW en 2023.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Se recomienda a los investigadores que exploren y desarrollen nuevos enfoques para mejorar la gestión de residuos sólidos en celdas transitorias.
2. Se recomienda implementación de nuevas tecnologías para capturar y monitorear el metano para maximizar el metano aprovechable.
3. Se sugiere la administración realice una evaluación económica ¹ de la energía generada a partir del metano en las celdas transitorias.
4. Se aconseja llevar a cabo investigaciones para evaluar la viabilidad financiera de utilizar tecnologías para capturar el metano producido en las celdas transitorias.
5. Se invita a realizar un análisis de varios escenarios de cierre y una proyección de la liberación de metano en el tiempo en las celdas transitorias.
6. Se espera que la gerencia ⁸ implemente y analice estrategias de mitigación de impactos ambientales para mejorar la gestión de residuos sólidos en las celdas transitorias.

INFORME DE ORIGINALIDAD

24%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

8%

PUBLICACIONES

19%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad de Huanuco Trabajo del estudiante	17%
2	infocarbono.minam.gob.pe Fuente de Internet	1%
3	www.researchgate.net Fuente de Internet	1%
4	ORIZANO ALCEDO RICHARD JOSUE. "Plan de Recuperación de Áreas Degradadas y Construcción de la Celda Transitoria para la Disposición Final de Residuos Sólidos en el Paraje Izcocusana del Distrito de Sapallanga - Huancayo - Junín-IGA0015513", R.G.S.P. N° 426-2021-MPH/GSP, 2022 Publicación	<1%
5	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
6	docplayer.es Fuente de Internet	<1%
7	siar.regionlima.gob.pe Fuente de Internet	

<1 %

8

issuu.com

Fuente de Internet

<1 %

9

smia.munlima.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

10

scielo.sld.cu

Fuente de Internet

<1 %

11

1library.co

Fuente de Internet

<1 %

12

Submitted to Universidad Continental

Trabajo del estudiante

<1 %

13

BUSTAMANTE BARBOZA OLIVERIO. "PIGARS de la Provincia de Chota 2015-IGA0007204", O.M. N° 063-2015-MPCH, 2020

Publicación

<1 %

14

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

15

DICA CONSULTORES GLOBALES S.A.C - DICACG S.A.C.. "PIGARS de la Provincia de Leoncio Prado 2019-IGA0007777", O.M. N° 018-2019-MPLP, 2020

Publicación

<1 %

16

www.medioambiente.gov.ar

Fuente de Internet

<1 %

17

Fernandes, Joel Pereira. "Modelação numérica da produção de biogás Em Aterros", Universidade de Tras-os-Montes e Alto Douro (Portugal), 2022

Publicación

<1 %

18

RISCO MENDOZA JOSE CARLOS. "DIA del Proyecto Infraestructura de Disposición Final de los Residuos Sólidos de la Ciudad de Cangallo y Comunidades de Mollebamba y Huahuapuquio del Distrito de Cangallo y la Ciudad de Pampa Cangallo y las Comunidades de Coraspampa, Huallchancca, Jatunpampa y Pacopata del Distrito de los Morochucos - Cangallo - Ayacucho-IGA0001219", R.D. N° 165-2013/DSB/DIGESA/SA, 2020

Publicación

<1 %

19

prezi.com
Fuente de Internet

<1 %

20

#N/A. "PIGARS de la Municipalidad Provincial de Churcampa 2021-IGA0013416", O.M. N° 001-2021-MPCH, 2021

Publicación

<1 %

21

AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE SOCIEDAD ANONIMA CERRADA - AMBIDES S.A.C.. "DIA sel Proyecto Relleno Sanitario y Planta de Aprovechamiento de Residuos Sólidos de la Ciudad de La Mar, Provincia de

<1 %

La Mar, Región Ayacucho-IGA0000081", R.D.

Nº 161-2013/DSB/DIGESA/SA, 2020

Publicación

22

repositorio.unc.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

23

unfccc.int

Fuente de Internet

<1 %

24

www.swissinfo.ch

Fuente de Internet

<1 %

25

www.wma.net

Fuente de Internet

<1 %

26

C. Mileto, F. Vegas, V. Cristini. "Rammed Earth Conservation", CRC Press, 2019

Publicación

<1 %

27

www.ipcc-nggip.iges.or.jp

Fuente de Internet

<1 %

28

DICA CONSULTORES GLOBALES S.A.C - DICACG S.A.C.. "Plan de Recuperación de Áreas Degradadas por Residuos Sólidos Municipales de la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado 2021-IGA0013580", R.A. Nº 473-2021-MPLP, 2021

Publicación

<1 %

29

tzibalnaah.unah.edu.hn

Fuente de Internet

<1 %

Submitted to Universidad Politécnica del Perú

30

Trabajo del estudiante

<1 %

31

upc.aws.openrepository.com

Fuente de Internet

<1 %

32

uvadoc.uva.es

Fuente de Internet

<1 %

33

www.scielo.org.mx

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 12 words

Excluir bibliografía

Activo