

Universidad Central
Vicerrectoría Académica

Escuela de Ingeniería Civil

Aprovechamiento del Gas Metano en Rellenos Sanitarios de
Costa Rica

Trabajo Final de Graduación Modalidad de Tesis para Optar
por el Grado Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil

Estudiante: Néstor Quirós Zelada

9-0117-0504

Tutor: Ing. Gloriana Escobar Medina

Sede Metropolitana, Costa Rica

AGRADECIMIENTOS

Debo, primeramente, agradecerle a Dios, por darme todo lo necesario para poder terminar esta etapa de mis estudios profesionales, a pesar de todas las dificultades que se presentaron, siempre me ayudó a continuar luchando para salir adelante.

Todo mi agradecimiento a mi esposa, porque siempre ha estado presente, pendiente de los resultados en mis estudios universitarios y por sus sabios consejos, por enseñarme que con fe y constancia se cumplen las metas, por la lucha incansable a mi lado en este largo proceso.

Agradezco a mi tutora, lector, amigos y compañeros, por ayudarme y apoyarme en este trabajo de investigación y aprender de sus grandes conocimientos, ya que con estos y su guía logre llegar a esta etapa de mi carrera.

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a toda mi familia, a mis hijos Mathew y Bryan, que me han dado esa motivación para seguir adelante y hacer realidad el alcance de esta meta, a mi esposa Natalie que ha sido parte fundamental en todo momento con su confianza y paciencia en este proceso de formación profesional, apoyándome a lo largo de este proceso, siempre pendiente de mis estudios, sus palabras de aliento en algunas ocasiones fueron suficientes para tomar valor y seguirme esforzando para seguir adelante en mis estudios hasta finalizarlos.

EPÍGRAFE

“La lógica te lleva de A a B, pero la imaginación te llevará a todas partes”.

Albert Einstein

GLOSARIO

Biogás

Mezcla gaseosa generada por la descomposición anaeróbica de materia orgánica, compuesta principalmente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), y en menor proporción por otros gases como sulfuro de hidrógeno (H_2S) y vapor de agua. Su poder calorífico lo convierte en una fuente renovable de energía.

Gas metano (CH_4)

Compuesto orgánico volátil e inflamable que constituye entre el 50% y 65% del biogás generado en rellenos sanitarios. Tiene un potencial de calentamiento global 28 veces superior al CO_2 en un período de 100 años, según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

Relleno sanitario

Sistema de disposición final de residuos sólidos urbanos que cumple condiciones técnicas y ambientales para evitar impactos negativos. Está compuesto por celdas impermeabilizadas, capas de cobertura y sistemas de captación de lixiviados y gases. Se diferencia de los botaderos a cielo abierto por su control técnico y normativo.

Captación de biogás

Proceso mediante el cual se recolecta el gas generado en la descomposición anaeróbica de residuos sólidos mediante pozos, tuberías y válvulas de control. Su finalidad es evitar la liberación de gases contaminantes y aprovechar su potencial energético.

Aprovechamiento energético del biogás

Uso del gas metano captado para generar electricidad o calor mediante motores de combustión interna, microturbinas o calderas. Contribuye a la economía circular y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Eficiencia energética

Relación entre la energía útil obtenida y la energía potencial contenida en el combustible. En sistemas de biogás, la eficiencia eléctrica promedio de los generadores suele oscilar entre el 33% y el 45%.

Potencial de calentamiento global (GWP)

Indicador que mide el impacto relativo de un gas de efecto invernadero comparado con el dióxido de carbono. El metano tiene un GWP de 28, lo que implica que, a igual masa, calienta la atmósfera 28 veces más que el CO₂ en un siglo.

Cogeneración (CHP)

Tecnología que permite la producción simultánea de energía eléctrica y térmica a partir de una misma fuente energética, como el biogás. Mejora la eficiencia global del sistema y se utiliza en aplicaciones industriales y municipales.

Motor de combustión interna (ICE)

Dispositivo mecánico que convierte la energía química del biogás en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. Son comunes en sistemas de generación descentralizada para rellenos sanitarios pequeños y medianos.

Turbina de gas

Máquina rotativa que transforma la energía contenida en el gas en energía cinética y luego en electricidad. Son más eficientes en escalas industriales y requieren control avanzado de operación.

Unidad de tratamiento de biogás

Sistema técnico que acondiciona el biogás previo a su combustión. Incluye procesos de deshumidificación, eliminación de partículas, filtrado de compuestos corrosivos como H_2S y adecuación de presión.

Densidad de residuos sólidos

Parámetro físico que representa la masa por unidad de volumen de los residuos dispuestos. Se considera un valor promedio de 650 kg/m^3 para residuos sólidos urbanos compactados en Costa Rica.

Kilovatio hora (kWh)

Unidad de energía equivalente a la energía consumida por un dispositivo de 1000 vatios funcionando durante una hora. Se utiliza para cuantificar la generación eléctrica derivada del aprovechamiento del biogás.

Tonelada de CO₂ equivalente (tCO_{2e})

Unidad que permite comparar las emisiones de diferentes gases de efecto invernadero en función de su impacto climático. Se utiliza para medir el beneficio ambiental de las tecnologías de captación de metano.

Descomposición anaerobia

Proceso biológico mediante el cual microorganismos descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando biogás como subproducto. Es el proceso base en rellenos sanitarios para la formación de metano.

Sistema de captación de biogás

Infraestructura diseñada para recolectar el gas metano generado en un relleno sanitario. Está compuesta por pozos verticales perforados dentro de las celdas de residuos, conectados mediante una red de tuberías de alta densidad (HDPE), válvulas de control, estaciones de vacío y cámaras de condensado. Su correcta implementación permite dirigir el biogás hacia unidades de tratamiento o aprovechamiento energético, evitando su liberación a la atmósfera.

Pozos de extracción de gas

Elementos fundamentales del sistema de captación, contruidos mediante perforaciones verticales dentro del cuerpo del relleno, generalmente con diámetros entre 15 y 30 cm y profundidades variables según el espesor del residuo. Se rellenan con material granular y una tubería perforada en el centro que permite la recolección del gas generado en las capas activas del relleno.

Red de tuberías de biogás

Conjunto de conducciones diseñadas para transportar el gas desde los pozos hasta los puntos de tratamiento o combustión. Generalmente construidas con tubería de polietileno de alta densidad (HDPE), estas redes deben garantizar la estanqueidad del sistema y contar con válvulas de control, trampas de condensado y elementos de inspección.

Condensación del biogás

Proceso físico que permite remover la humedad del biogás mediante enfriamiento, para evitar la acumulación de líquidos en las tuberías y daños a los equipos generadores. Este proceso puede realizarse mediante intercambiadores de calor o cámaras de condensación pasiva, siendo indispensable para garantizar una operación segura y eficiente.

Unidad de generación eléctrica a biogás

Planta que transforma el gas metano captado en energía eléctrica utilizable. Puede estar compuesta por uno o varios motores de combustión interna (ICE), generadores eléctricos, transformadores, sistema de sincronización con red y tableros de control. El diseño depende del volumen de gas disponible, la demanda energética local y el régimen de operación requerido (continuo o intermitente).

Sistema de desulfuración del biogás

Equipo que reduce o elimina el contenido de sulfuro de hidrógeno (H_2S) del biogás, ya que este compuesto es corrosivo y tóxico. Las tecnologías más utilizadas incluyen filtros de carbón activado, sistemas de lavado químico (*scrubbers*) o reactores biológicos. La desulfuración es

crucial para evitar la corrosión prematura de los motores generadores y garantizar la vida útil del sistema.

Ciclo de vida del relleno sanitario

Período operativo total del relleno, que abarca desde su apertura hasta el cierre técnico y la fase postclausura. Incluye la disposición de residuos, monitoreo ambiental, generación de biogás, mantenimiento de estructuras y eventual restauración ambiental. La generación de metano puede continuar hasta 20 o 30 años después de cerrado el sitio.

Balance energético del biogás

Cálculo que compara la energía útil generada con el biogás frente a la energía teórica disponible según el volumen y poder calorífico del metano. Este balance permite evaluar la eficiencia real del sistema de conversión, teniendo en cuenta pérdidas térmicas, paradas técnicas, consumo interno y condiciones de operación.

Sistema de monitoreo ambiental del relleno

Conjunto de instrumentos y procedimientos destinados a vigilar variables clave como la emisión de gases (CH_4 y CO_2), concentración de lixiviados, temperaturas internas, presión del biogás y asentamientos. Permiten anticipar riesgos operativos, garantizar la seguridad del personal y demostrar el cumplimiento normativo ante entes reguladores.

Análisis de Escenarios

Método proyectivo utilizado para evaluar distintas configuraciones técnicas y operativas en función del tamaño del relleno, cantidad de residuos, tasa de generación de biogás, eficiencia

del sistema y demanda energética. Esta herramienta permite estimar impactos ambientales, costos de inversión y número de beneficiarios de forma fundamentada y realista.

Huella de carbono evitada

Indicador ambiental que refleja la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que se dejan de liberar a la atmósfera gracias a la captura y uso del metano. Se expresa en toneladas de CO₂ equivalente por año (tCO₂e/año) y se calcula considerando el GWP del metano captado, la tasa de recuperación del sistema y el volumen total generado.

Energía distribuida renovable

Modelo de generación eléctrica donde múltiples fuentes pequeñas, como plantas de biogás, producen energía cerca del lugar de consumo, reduciendo pérdidas en la red y mejorando la resiliencia energética. Es especialmente útil en zonas rurales o fuera del alcance de la red nacional, y está alineado con políticas de sostenibilidad y descentralización energética.

Aprovechamiento postclausura

Uso productivo del relleno sanitario después de que haya sido cerrado técnicamente. En esta etapa aún puede generarse biogás utilizable, y el sitio puede emplearse para generación energética, zonas verdes, investigación ambiental o parques tecnológicos, siempre que se mantenga el monitoreo estructural y ambiental necesario.

Tabla de contenido

1	CAPÍTULO I. PROBLEMA	1
1.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1.	<i>Objetivo general</i>	3
1.2.2.	<i>Objetivos específicos</i>	3
1.3	JUSTIFICACIÓN	4
1.4	ANTECEDENTES	6
1.4.1.	<i>Antecedentes nacionales</i>	6
1.4.2.	<i>Antecedentes internacionales</i>	7
1.5	PROYECCIONES	8
1.5.1.	<i>Alcances</i>	8
1.5.2.	<i>Limitaciones</i>	9
1.5.3.	<i>Contexto</i>	10
2	CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	14
2.1	HERRAMIENTAS	14
2.1.1.	<i>Generación del Biogás</i>	14
2.2	CARACTERÍSTICAS DEL METANO CH ₄	18
2.3	IMPACTO AMBIENTAL	19
2.4	ETAPAS DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE BIOGÁS	22
2.5	HERRAMIENTA: FODA	26
2.6	DIAGRAMA DE ISHIKAWA (ESPINA DE PESCADO)	28
2.7	MATRIZ DE ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL (MATRIZ DE RIESGOS)	30
3	CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO	37
3.1	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	37
3.2	MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN	38
3.3	FUENTES DE INFORMACIÓN	41
3.3.1.	<i>Sujetos de información</i>	45
3.4	VARIABLES DE ANÁLISIS	45
3.5	INSTRUMENTOS	52
3.6	PROCESO PARA LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	57
3.7	IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA PARA LA RECOLECCIÓN Y APROVECHAMIENTO DEL GAS METANO EN RELLENOS SANITARIOS.	61
4	CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS	90

4.1	RESULTADOS ENERGÉTICOS Y TÉCNICOS	90
4.2	IMPACTO AMBIENTAL ESTIMADO	91
4.3	VIABILIDAD TECNOLÓGICA Y OPERATIVA	91
4.4	CONSIDERACIONES SOCIOECONÓMICAS	92
4.5	SÍNTESIS	93
5	CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
5.1	CONCLUSIONES.....	94
5.2	RECOMENDACIONES	97
6	REFERENCIAS.....	98
	APÉNDICES Y ANEXOS.....	104
6.1	APÉNDICE 1:	105
6.2	APÉNDICE 2:	106
6.3	APÉNDICE 3:	107
6.4	APÉNDICE 4:	108
7	DECLARACIÓN JURADA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
	CÉDULA DE IDENTIDAD	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
8	CARTA DE ENTENDIMIENTO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Tablas

Tabla 1: Variables de la investigación por objetivo específico	49
Tabla 2: Parámetros	75
Tabla 3: Resultados	77
Tabla 4: Escenarios de aprovechamiento de gas metano en rellenos sanitarios en Costa Rica....	79
Tabla 5: Detalles técnico de generadores según escenarios de captación de biogás	81
Tabla 6: Comparación de escenarios	87
Tabla 7: Evaluación económica	89

Ilustraciones

<i>Ilustración 1:</i> Relleno Sanitario Los Pinos	11
<i>Ilustración 2:</i> Zonificación Relleno Sanitario Los Pinos	12
<i>Ilustración 3:</i> Proyección Gases CH ₄ y CO ₂	14
<i>Ilustración 4:</i> Millones de toneladas netas de dióxido de carbono equivalente por sector emitidas en Costa Rica en el 2015	20
<i>Ilustración 5:</i> Proceso de digestión anaerobia	23
<i>Ilustración 6:</i> Componentes de un relleno sanitario	25
<i>Ilustración 7:</i> Diagrama de Ishikawa.....	30
<i>Ilustración 8</i> Modalidad de Rellenos Sanitarios Centroamérica	32
<i>Ilustración 9:</i> Matriz de riesgos	34
<i>Ilustración 10:</i> Aplicaciones por 1 m ³ de biogás.....	62
<i>Ilustración 11:</i> Detalle de tubería para recolección de lixiviado	67
<i>Ilustración 12:</i> GE Jenbacher Type 2 Gas Engine.....	72

RESUMEN

Costa Rica declaró, a inicios de los noventa, emergencia nacional en relación con la problemática del desecho de los residuos sólidos, actualmente sigue siendo prioritario en la agenda ambiental del país, por ser causa de contaminación y deterioro ambiental, así como por ser, en lo que a materia de residuos orgánicos se refiere, un emisor de gases efecto invernadero que contribuyen con el cambio climático.

Según datos del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2001), el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4) han variado en gran medida y son los dos principales gases que generan el calentamiento global y el cambio en el clima. Además, el mal manejo de los residuos sólidos orgánicos acrecienta las concentraciones de CH_4 , los cuales en nuestro país se disponen en rellenos sanitarios.

En Costa Rica, tanto la legislación nacional como las instituciones no propician una gestión integral de residuos eficaz, lo que ha ocasionado problemas ambientales y de salud debido al inadecuado manejo. En general, no existen practicas integrales de revaloración, reciclaje y reutilización de los residuos orgánicos. Ante esta situación, el uso de residuos sólidos orgánicos presenta condiciones interesantes en cuanto a cantidad y condiciones de aprovechamiento que la sitúan en un lugar de potencial aprovechable, para la producción de energía a través de técnicas como la gasificación o también llamado motor de combustión interna (caldera).

El biogás es producido a través de la biodegradación de las materias orgánicas de los residuos sólidos ordinarios por lo cual, gracias a un sistema de generación (caldera) usando el biogás como combustible. Se estima que se podría producir suficiente energía para energizar casi 18 000 hogares costarricenses si se llegara a usar el 100% del potencial energético de los rellenos sanitarios. El sistema de tratamiento para el biogás puede ser activo o pasivo. En el sistema activo

el biogás es extraído con ayuda de un equipo de succión y llevado a un sistema centralizado para su tratamiento. En este punto se busca eliminar el 100 % del metano (CH_4) y los gases que generan olor como el ácido sulfhídrico (H_2S). El tratamiento pasivo tiene un fin similar, pero se hace vía quemadores distribuidos dentro del relleno sanitario como comúnmente se ve en rellenos sanitarios en nuestro país, provocando siempre un grado importante de contaminación al ambiente.

1 CAPÍTULO I. PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los rellenos sanitarios se crean como la respuesta a una problemática generada por la producción de residuos sólidos urbanos, sin embargo actualmente estos lugares de disposición final son considerados fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos como material biológico, gases y otros productos de degradación de desechos orgánicos, constituyendo una importante fuente contaminante de gases de efecto invernadero, representada por el biogás producto de la descomposición biológica de la materia orgánica, que contiene metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y compuestos orgánicos volátiles (COV).

De todos estos gases, el metano es el de mayor interés porque, a pesar de ser inodoro e incoloro, es inflamable y muy explosivo, si se concentra en el aire en una proporción de 5 a 15% en volumen; los gases tienden a acumularse en los espacios vacíos dentro del relleno formando cámaras o burbujas y aprovechan cualquier fisura del terreno o permeabilidad de la cubierta para salir al exterior.

Cuando el gas metano se acumula en el interior del relleno y migra a las áreas vecinas, puede generar riesgos de explosión, su producción varía dependiendo de la antigüedad del lugar de disposición, del avance de los procesos de estabilización de los residuos y de las condiciones ambientales en las que se efectúan ya que cuanto más tiempo, mayor concentración de depósitos de metano.

El potencial de calentamiento global del metano (en un horizonte temporal de 100 años) es 21 veces mayor que el del dióxido de carbono. Las emisiones de metano a largo plazo aumentarían su concentración en el ambiente, de forma que se convertiría en un problema mayor conforme pasa el tiempo por su alta contribución al efecto invernadero.

El Relleno Sanitario Los Pinos de la empresa WPP, ubicado en Cartago, actualmente se encuentra cerrado sin recibir desechos de los cantones de El Guarco y Paraíso, y de los distritos de Tucurrique y Cervantes, así como del cantón central de Cartago debido a la falta de capacidad ya que dicho relleno está agotando su vida útil.

Carecen por completo de un tratamiento adecuado de los desechos ya que anteriormente existía un botadero a cielo abierto que funcionaba en esta propiedad antes de que tomara el control W.P.P., lo cual se ha agravado con el pasar de los años, concluyendo en un cierre por parte del Ministerio de Salud, el cual ha girado una orden sanitaria y su cierre temporal.

Esto ha provocado que los cantones y distritos antes mencionados tengan que llevar sus desechos hasta el relleno sanitario El Huazo en Desamparados, de la empresa EBI, afectando considerablemente los tiempos del servicio, pero aún más crítico, el incremento en el costo elevado por este servicio de recolección, que debe pagar cada uno de los habitantes en sus recibos municipales.

Por lo tanto, se realizará una investigación con base en la utilización del gas metano (CH_4) como fuente de energía alternativa renovable, para sustentar el mismo relleno sanitario dándole más capacidad para recibir desechos, así como tratar los ya existentes que emiten actualmente el gas metano (CH_4), el cual es altamente contaminante para el ambiente e incide directamente en el cambio climático.

Se podría analizar que parte del problema se debe a la falta de interés de los gobiernos locales y demás personal de los diferentes departamentos involucrados en este tema, que más allá de solucionar el problema o proponer posibles soluciones para continuar utilizando el relleno sanitario -ya que es el más cercano a las municipalidades de la provincia, lo cual generaría un menor impacto económico a todos los habitantes- prefieren tomar la opción más fácil: emitir orden de cierre y obligar a los municipios a buscar otro relleno aunque signifique pagar más y tener trayectos más largos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Analizar la técnica con motor de combustión interna (caldera), la generación de energía a partir del uso de diferentes fuentes de desechos sólidos dispuestos en el relleno sanitario y en consecuencia en la reducción de potenciales contaminantes ambientales.

1.2.2. Objetivos específicos

- Documentar el manejo de los residuos sólidos en Costa Rica, en función de la normativa aplicable a la materia y el impacto ambiental tomando en consideración la Agenda 2030 de la ODS.
- Describir la técnica de combustión interna en la generación de energía a partir de residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios.

- Establecer el proceso adecuado para el aprovechamiento de esta fuente renovable de los desechos sometidos a la técnica de combustión interna con el propósito de generar energía.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En el nivel global, los rellenos sanitarios constituyen la tercera fuente global, de mayor producción de metano en el mundo, siendo las minas de carbón y la agricultura las principales fuentes, razón por la cual el aprovechamiento del gas metano se establece como una iniciativa internacional con el fin de promover la recuperación del gas CH₄ y su uso como fuente de energía limpia y viable.

El metano es un hidrocarburo (CH₄) y es el componente primario del biogás, forma parte de los gases de efecto invernadero y su presencia en la atmósfera contribuye al cambio climático, es derivado de los rellenos sanitarios y se sabe que es producido por la biodegradación en condiciones anaerobias de la fracción orgánica de los residuos sólidos depositados en los rellenos sanitarios o sitios de disposición final.

El Gobierno de Costa Rica, ante la amenaza de cambio climático, posiciona en el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2006 – 2010, la Agenda de Cambio Climático como prioritaria a nivel nacional e internacional, priorización que se refleja en la Iniciativa de Paz con Naturaleza. La meta en el sector energético es reducir la dependencia de combustibles importados, aprovechar mejor las fuentes de energía renovable del país y llegar a producir el 100% de la electricidad del país a partir de fuentes de energía renovables (Plan Nacional de Desarrollo 2006 – 2010: 78-80), y según la Estrategia Nacional de Cambio Climático algunos de los sectores que se identifican como sectores principales que causan contaminación del ambiente y que deben reducir

prioritariamente sus emisiones de gases corresponden a Energía, Transporte y Residuos Sólidos (MINAE, ENCC, 2007).

Ante esta situación, se plantea la necesidad de investigar acerca de fuentes alternas para la producción de energía eléctrica en nuestro país, como es el caso del biogás, esta fuente permite sustituir derivados del petróleo por fuentes de energía que han sido producidas a partir del proceso de la fotosíntesis, por lo que su producción prácticamente no tiene efecto neto en la emisión de CO₂ (MINAE, DSE 2006). Por otra parte, reduce significativamente el problema de la disposición de basura, particularmente en áreas municipales y es un recurso disponible en Costa Rica, que no está afectado por fluctuaciones de precio a nivel mundial o por las incertidumbres producidas por las fuentes de combustibles importados (Textos científicos, 2005). Además, permite la búsqueda de nuevas opciones energéticas con un menor impacto en el medio y económicamente rentables.

La presente investigación hace referencia al cierre de rellenos sanitarios a cielo abierto, problemática presente no solo en Costa Rica, sino también en América Latina y el Caribe, donde la existencia de estos espacios debe darse en conjunto con una adecuada gestión de residuos sólidos y en concordancia con el artículo 50 de la Constitución Política de Costa Rica que indica que: "Toda persona tiene derecho a un ambiente sano y ecológicamente equilibrado".

Es importante señalar que se considera que el país se acerca a una etapa delicada por la capacidad de vida útil de estos sitios, por lo que se espera que esta información sirva de herramienta para la toma de decisiones ante la apertura de proyectos para la gestión de residuos en las diversas localidades del país.

Este tipo de proyectos ha sido de preocupación, especialmente para las municipalidades, que son las responsables directas de brindar el servicio de recolección de residuos sólidos en las

diferentes localidades, en las cuales se agotan las opciones disponibles, pero no se presta atención a solucionar la problemática de los ya existentes.

1.4 ANTECEDENTES

1.4.1. Antecedentes nacionales

1. En el libro *Gestión Ambiental y Energías Renovables en Costa Rica* de Martínez y Solano (2019), se aborda la evolución de la gestión de residuos en el país y el aprovechamiento del biogás como un recurso energético en rellenos sanitarios. El texto discute casos de estudio en la Gran Área Metropolitana, destacando los desafíos y beneficios ambientales.

2. En un artículo de la *Revista de Energía y Medio Ambiente* de Costa Rica, Rodríguez y Vargas (2021) presentan un estudio sobre la captura de metano en rellenos sanitarios en la región de Guanacaste. Este trabajo analiza el impacto de estas prácticas en la reducción de emisiones y en la mitigación del cambio climático.

3. En su tesis de maestría, Pérez Aguilar (2020), de la Universidad de Costa Rica, explora los sistemas de aprovechamiento de biogás en los rellenos sanitarios del Valle Central y su potencial como fuente de energía limpia. Su investigación examina la viabilidad técnica de implementar proyectos de captura y conversión de biogás en electricidad.

4. Un estudio realizado por Calderón y Esquivel (2019), publicado en la *Revista Costarricense de Ingeniería Ambiental*, analiza el potencial del biogás en rellenos sanitarios de la Gran Área Metropolitana (GAM) para generar energía eléctrica. Los autores discuten la eficiencia de los sistemas de captura de metano y su impacto en la reducción de emisiones de CO₂.

5. La tesis de Brenes Jiménez (2020) en el Instituto Tecnológico de Costa Rica aborda un análisis comparativo de los sistemas de captura de metano en rellenos sanitarios costarricenses y su viabilidad económica. Este estudio profundiza en los costos de implementación y los beneficios a largo plazo de los proyectos de aprovechamiento de biogás.

1.4.2. Antecedentes internacionales

1. El artículo "Aprovechamiento energético del gas metano en rellenos sanitarios en el norte de México", de González, P., & Ramírez, C. (2020), analiza casos específicos de rellenos sanitarios en el norte de México, donde se implementaron sistemas de captura y aprovechamiento del metano, mostrando resultados positivos en términos de reducción de gases de efecto invernadero y generación de energía.

2. En el libro *Gestión de residuos y aprovechamiento de biogás en México*, los autores Hernández, J., & López, M. (2018) explican el impacto ambiental del gas metano generado en los rellenos sanitarios, además de presentar tecnologías y procesos para su aprovechamiento energético en México.

3. En la tesis *Evaluación de la eficiencia en la captura y aprovechamiento de gas metano en rellenos sanitarios en el Estado de México*, de Torres, L. A. (2019), se evalúa la eficiencia de distintos métodos de captura y aprovechamiento del gas metano en rellenos sanitarios, destacando los beneficios ambientales y económicos observados en el Estado de México.

4. En el libro *Gestión de residuos sólidos y energías renovables* de García Martínez (2018), se analiza cómo los residuos sólidos urbanos en los rellenos sanitarios pueden transformarse en

una fuente de energía mediante el aprovechamiento del biogás, enfocándose en las políticas mexicanas y casos de éxito en algunas ciudades del país.

5. Un artículo de la Revista de Energías Renovables publicado por Pérez y López (2020) examina las estrategias de captura y utilización de metano en los rellenos sanitarios del estado de Jalisco. Este estudio detalla los beneficios de la reducción de gases de efecto invernadero y la generación de electricidad a través del biogás.

1.5 PROYECCIONES

La eficiencia del sistema de recolección depende del diseño y mantenimiento de la infraestructura, como pozos de extracción, tuberías y sistemas de ventilación. Esta proyección evalúa cómo mejorar la eficiencia del sistema y optimizar la captura de metano.

1. Evaluar la eficiencia del sistema de recolección de gas, incluyendo pozos verticales.
2. Ajustar la eficiencia proyectada con base en estudios de literatura existente sobre sistemas de captura de metano en rellenos sanitarios.
3. Implementar el sistema de transformación del gas metano en energía aprovechable.

1.5.1. Alcances

El alcance de esta tesis está enfocado en el aprovechamiento del gas metano y la elección de un proceso adecuado de su recolección, con especial atención a su aplicabilidad en el entorno costarricense. Este análisis se realizará tomando en cuenta factores de eficiencia, seguridad y economía, con el objetivo de proporcionar una guía útil para ingenieros, en la toma de decisiones para este tipo de obras.

La investigación se centrará en los rellenos sanitarios ubicados en zona urbana, donde los desafíos para el tratamiento adecuado y responsable se vuelven cada vez más complicados, así como la necesidad de optimización de costos y aprovechamiento del terreno que son aún más relevantes. Resulta de gran interés continuar con el desarrollo de los biocombustibles con el objetivo de obtener mejores prácticas de aprovechamiento y tratamiento, reduciendo a su vez la contaminación ambiental producida y así continuar originando el desarrollo de tecnologías y de igual forma la transferencia de estas al sector privado, social y público.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, el aprovechamiento del biogás se convierte en un proyecto de importancia significativa para el relleno sanitario, debido a que ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, elimina el desarrollo de la actividad basada en la quema del biogás (tipo antorchas encendidas día y noche), la cual anteriormente era la solución más simple a la reducción de las emisiones de metano.

1.5.2. Limitaciones

Se limitará a una propuesta que se hará pensando en la problemática actual vivida en la provincia de Cartago con el botadero Los Pinos de WPP, el cual se encuentra cerrado, para poder realizar una investigación y así evaluar la eficiencia de un sistema de recolección de gas para lograr captarlo, incluyendo pozos verticales, esto con base en literaturas existentes con lo cual dicho botadero pueda mejorar el tratamiento de sus desechos y a la vez generar recursos económicos, volviéndose autosustentable.

Este estudio se basará en los registros de recolección y cobertura en el nivel nacional, así como el mantenimiento requerido en el botadero.

1.5.3. Contexto

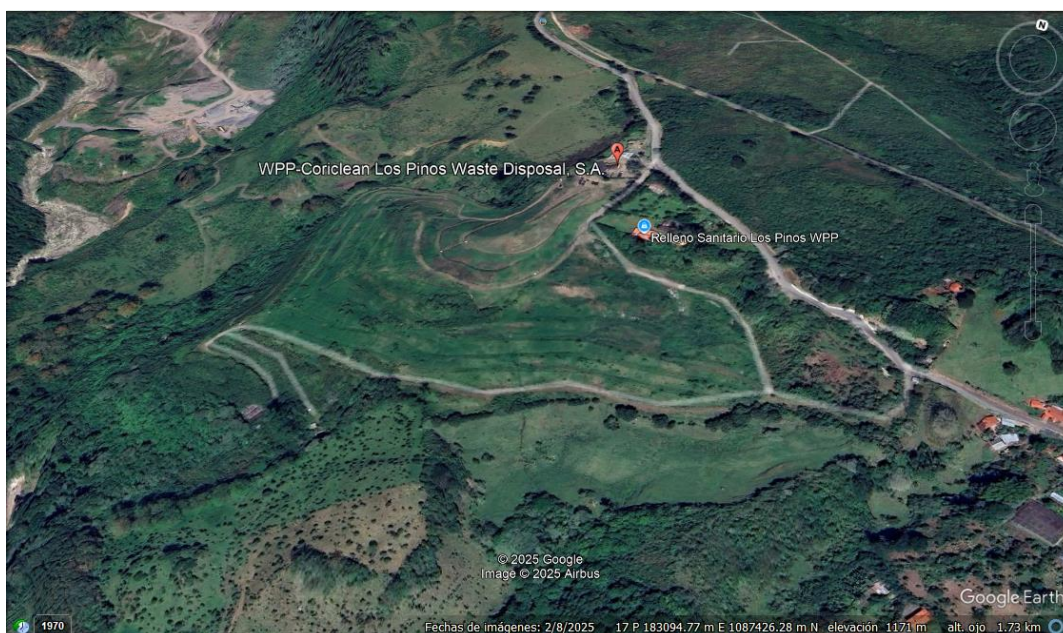
La producción de biogás en las primeras etapas de vida de un relleno sanitario puede ser mínima durante varios meses; sin embargo, en rellenos sanitarios con una vida útil media o recientemente clausurado, la producción se puede encontrar en su máxima capacidad, tardando varios años en dejar de producir este biogás, incluso aun después de clausurado el relleno. Se estima de forma teórica que la cantidad de biogás generado a partir de una tonelada de carbono biodegradable equivale a 1868 m³.

Se desea incentivar a las entidades gubernamentales, para que se unan a la iniciativa y colaboren para desarrollar proyectos de captura y uso de metano, con el fin de reducir las emisiones de CH₄, propiciar el crecimiento económico, fortalecer la disponibilidad de energía, mejorar la calidad del aire, mejorar la seguridad industrial y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Es importante mencionar que el gas recuperado puede utilizarse de diferentes maneras, por ejemplo: producción de energía eléctrica a través del uso de generadores de combustión interna, o puede utilizarse como combustible en calentadores de agua u otras instalaciones, incluso, con el tratamiento y las medidas adecuadas, puede destinarse para el uso del consumidor final, en el hogar, en sustitución de las fuentes de energía empleadas en la cocción de alimentos.

En la Ilustración 1 se aprecia la ubicación aproximada mediante Google Earth del relleno sanitario Los Pinos, administrado por la empresa WPP.

La razón de la escogencia de este lugar es que se caracteriza por ser vulnerable a nivel físico y biológico. Por ejemplo, existen sectores que poseen un nivel alto freático, y con estratos compuestos principalmente por suelos limo arcillosos, los cuales son muy comunes en el cantón de Paraíso. Además, se encuentran elementos hidrogeológicos: nacientes, ríos y quebradas que pueden ser impactados por la ejecución del proyecto.

Ilustración 1: Relleno Sanitario Los Pinos



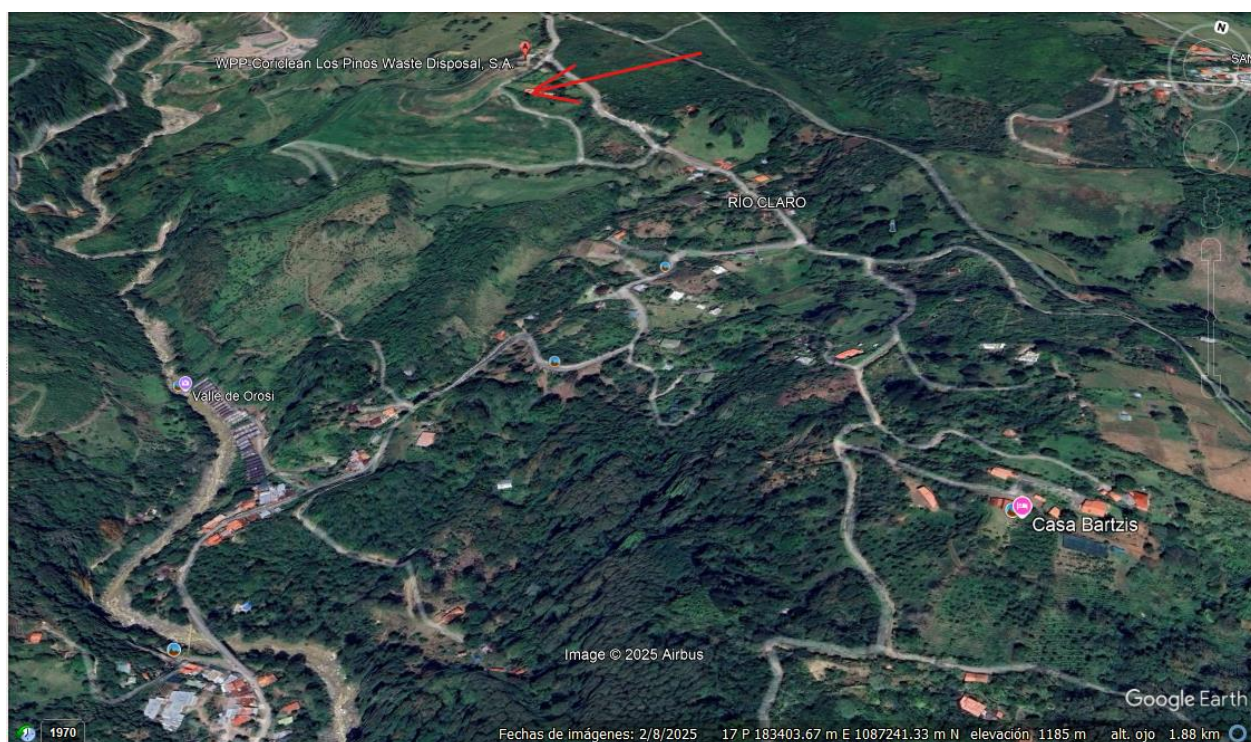
Fuente: Google Earth

Se puede observar en la Ilustración 2 que se tiene una considerable cobertura vegetal dentro del sitio de interés, incluyendo la conformación de bosques.

De acuerdo con la Ley Forestal, n.º 7575, el bosque se define como: Ecosistema nativo o autóctono, intervenido o no, regenerado por sucesión natural u otras técnicas forestales, que ocupa una superficie de dos o más hectáreas, caracterizada por la presencia de árboles maduros de diferentes edades, especies y porte variado, con uno o más doseles que cubran más del setenta por

ciento (70 %) de esa superficie y donde existan más de sesenta árboles por hectárea de quince o más centímetros de diámetro medido a la altura del pecho (DAP). Este tipo de ecosistema es altamente vulnerable, lo cual dificulta, considerablemente, la aprobación de proyectos de infraestructura por parte de las autoridades.

Ilustración 2: Zonificación Relleno Sanitario Los Pinos



Fuente: Google Earth

Además del bosque, se encuentran zonas de potrero y algunos sitios donde aflora el nivel freático, produciendo zonas pantanosas en la propiedad. Estas zonas pantanosas son indicadores de posibles humedales, áreas protegidas también por la Ley Forestal n.º 7575, haciendo que el terreno sea todavía más vulnerable.

Existen algunos poblados, principalmente al sureste del área del proyecto y aprovechamiento turístico. No se observan comunidades con densa población. Entre las más cercanas, se tiene Puente Negro, Orosi. Por lo anterior y en términos generales, se tiene que es un área con más vulnerabilidad hacia los componentes físico y biológico, y menos al social ya que se encuentra retirado de los centros poblacionales.

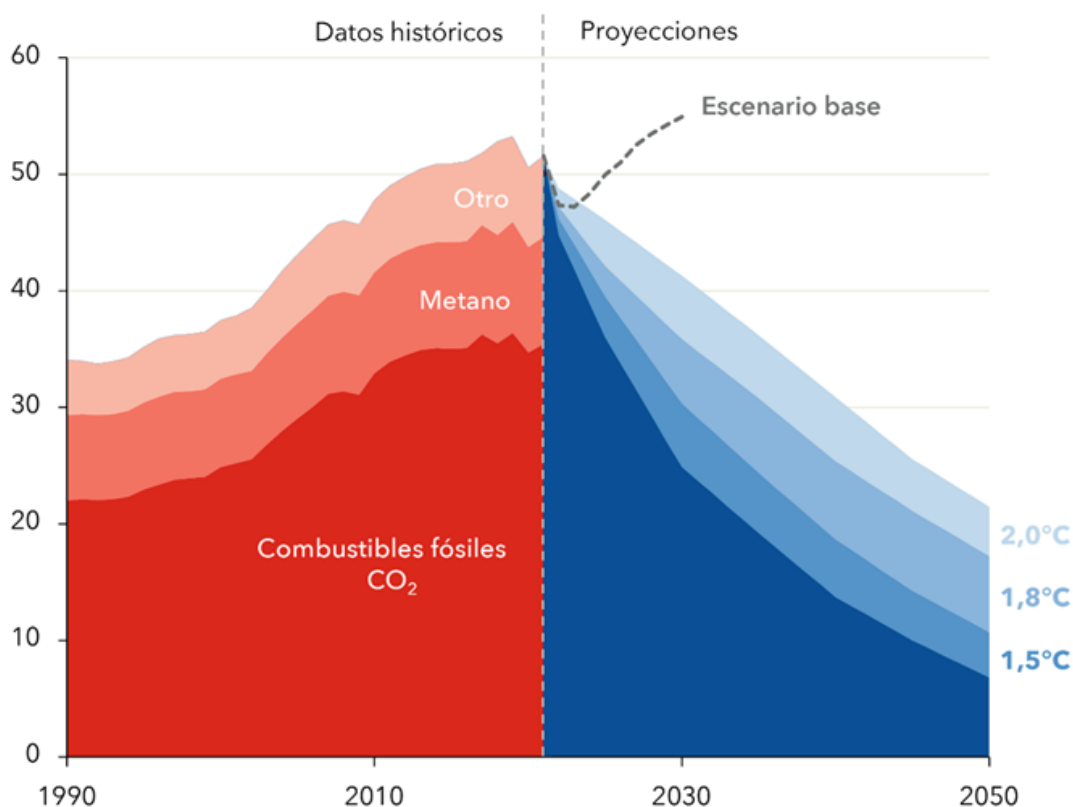
2 CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 HERRAMIENTAS

2.1.1. Generación del biogás

Es de suma importancia disminuir las emisiones del gas metano, entre otras razones, porque el efecto de calentamiento global a corto plazo del metano es mucho mayor que el del CO₂, y la reducción de las emisiones de metano tendrían un impacto instantáneo en el clima mejorando las condiciones, como se observan en la Ilustración 3.

Ilustración 3: Proyección Gases CH₄ y CO₂



Fuente: FMI Acuerdos 2030-2050.

Como se puede observar en el gráfico, para limitar el calentamiento global a 1,5-2 °C, el objetivo central del Acuerdo de París, agenda 2030 firmada por Costa Rica, las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero deben reducirse entre un 25% y un 50% respecto de los niveles de 2019 de aquí al 2030.

La reducción de las emisiones de metano podría disminuir el *stock* de gases de efecto invernadero en la atmósfera y reducir los riesgos alarmantes de “puntos de inflexión”, momento en el que el cambio climático pasa a autoperpetuarse. Esto se debe a que el metano permanece en la atmósfera durante solo 12 años en promedio, en comparación con los miles de años del CO₂.

Para que un relleno sanitario genere biogás se necesita que los residuos sólidos depositados contengan materia orgánica, lo cual es muy común en la mayoría de los hogares costarricenses, ya que aún no contamos con una cultura de reciclaje estricta donde se realicen procesos de separación y compostaje, además se necesita que haya condiciones para la descomposición anaerobia, es decir, que los gases que allí se encuentren incluyan: amoníaco (NH₃), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S), metano (CH₄), nitrógeno (N₂) y oxígeno (O₂) para que este proceso ocurra de manera paulatina y se genere esta materia prima.

Sin embargo, los dos principales gases formados son metano (CH₄) y bióxido de carbono (CO₂). El gas metano puede aprovecharse como fuente de energía, lo que haría una producción limpia y una energía renovable siendo amigable con el medio ambiente y creando conciencia ciudadana. Hay numerosos modelos disponibles para calcular la producción del gas de un relleno sanitario, no obstante, el parámetro de entrada que es más común a todos ellos es el de la cantidad de residuos que son degradables.

El aprovechamiento del metano se considera un principio de cambio de postura hacia posiciones más racionales sobre el uso de los recursos naturales, además de mitigar el incremento del consumo de gastos fijos en los rellenos sanitarios para su debida operación. Este sistema de tratamiento viene impuesto por el nuevo concepto actual de gestión de los residuos que debe tender a lograr los siguientes objetivos:

1. Ahorro de energía.
2. Ahorro de recursos naturales.
3. Disminución del volumen de residuos por eliminar.
4. Protección del medio ambiente.

Costa Rica desecha aproximadamente 1.6 millones de toneladas de residuos ordinarios al año, los cuales se componen principalmente de residuos que son materia orgánica (55,9%), plásticos (10,2%), papel y cartón (10,4%), entre otros. Además, se generan alrededor de 69 000 toneladas de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, según datos del Ministerio de Salud.

Este número ha aumentado constantemente hasta en un 11% entre un año y otro, lo cual significa que alrededor del 66,3% de toda la basura que desechan las personas en el país es biodegradable, por consiguiente, estos desechos generan gas metano en su proceso de descomposición, esto nos indica con claridad que tenemos una gran fuente de producción de energía que puede ser aprovechable en lugar de ser contaminante para el ambiente.

Hay muchas razones por las que es necesario buscar nuevas soluciones en la gestión de los residuos. Por una parte, los elevados costos que generan al año la recolección y gestión de los residuos, los cuales, de mantenerse, harán que el sistema no pueda ser financiado a largo plazo.

Por otra parte, ni por razones económicas ni de otro tipo, se puede continuar tratando la basura indiscriminadamente ya que los daños pueden ser irreversibles, provocando a la misma población el sufrimiento de las consecuencias que esto pueda provocar.

Los costarricenses día con día aumentan su nivel de vida, su poder adquisitivo, y, por lo tanto, las empresas se dedican a fabricar más productos que son consumidos por los ciudadanos. Si para esta producción que crece con el nivel de vida de los consumidores hay que aumentar el consumo de materias primas necesarias para la fabricación, la curva de producción de residuos sería exponencial.

En nuestra sociedad, la mejor opción para el tratamiento de los residuos es la de prevenir, reducir, reutilizar, reciclar lo más que podamos. La combinación de la reducción, el reciclaje, la reutilización y la valorización energética del metano producido es la configuración óptima de un concepto de gestión integral de residuos. Lo correcto no es solo la valorización energética que se le pueda proporcionar al metano, sino la valorización más las tres "R" ya que muchos de los desechos de los que se dispone y que no son productores del biogás, pueden tener un mejor tratamiento siguiendo esta regla de las tres "R".

2.2 Características del metano CH₄

Los principales componentes del biogás generado en los residuos sólidos son el metano y el dióxido de carbono, además en bajas concentraciones se tiene nitrógeno y ácido sulfhídrico; también existen otros componentes que son importantes por sus posibles efectos sobre la salud humana.

En lo que respecta a los demás compuestos, estos provienen de dos posibles fuentes:

a) Los generados por el proceso de biodegradación natural que se presenta en los sitios de disposición final. En esta fuente se tiene a los siguientes grupos:

- Compuestos oxigenados.
- Compuestos de azufre.
- Hidrocarburos.

b) Los generados artificialmente por el hombre y que son depositados con los residuos sólidos. En esta fuente se tiene a los siguientes grupos:

- Hidrocarburos aromáticos.
- Hidrocarburos clorados.

2.3 Impacto Ambiental

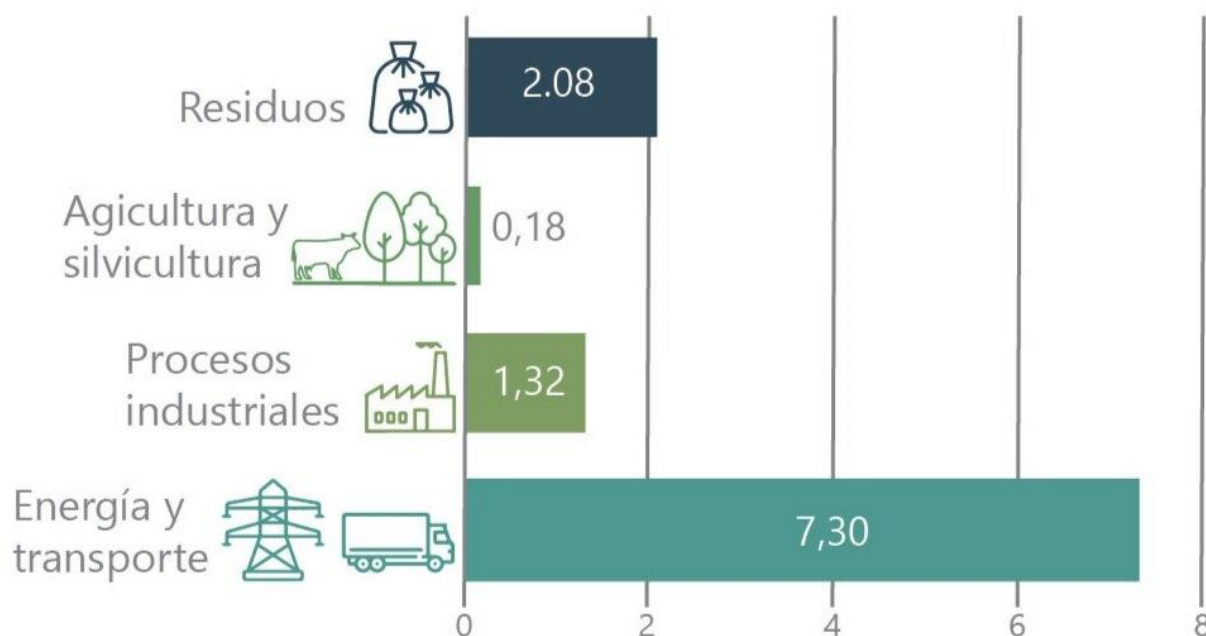
¿Cuál es el impacto de nuestros residuos?

En el nivel ambiental, específicamente en el contexto del cambio climático, los residuos constituyen una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el inventario nacional de gases de efecto invernadero indica que el sector de residuos o disposición de desechos sólidos es el segundo que más emisiones netas representa en Costa Rica, solo superado por el sector de energía y transportes.

En el 2015, este sector generó en Costa Rica 2 084 610 toneladas de dióxido de carbono equivalente (Ilustración 4), para poner esta cantidad en contexto, un automóvil promedio debe darle 103 600 vueltas a la Tierra para emitir esa cantidad de dióxido de carbono, y se requieren casi 61 millones de árboles para poder mitigar las emisiones anuales de nuestros desechos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios.

El 98 % de las emisiones de gases de efecto invernadero del sector de residuos sólidos se debe principalmente a la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos, dado que la compactación y apilado de los residuos orgánicos en los rellenos sanitarios generan un ambiente libre de oxígeno, al descomponerse los residuos orgánicos bajo estas condiciones generan grandes cantidades de metano, un GEI 21 veces más potente que el dióxido de carbono. Si estos residuos se gestionaran mediante el compostaje -el cual es un proceso aeróbico (con presencia de oxígeno)- se generarían casi siete veces menos emisiones de dióxido de carbono equivalente.

Ilustración 4: Millones de toneladas netas de dióxido de carbono equivalente por sector emitidas en Costa Rica en el 2015



Fuente: MINAE, 2019.

La producción del biogás crea en el nivel interno del relleno una sobrepresión que provoca su escape a través de las fisuras o grietas en los estratos hasta alcanzar la atmósfera, la cual es controlada por la variación meteorológica de la presión atmosférica del exterior como la lluvia ejerciendo una especie de control biológico, sin embargo, también la filtración del agua de lluvia puede provocar acumulación de lixiviados que pueden contaminar afluentes aguas abajo.

La instalación de sistemas de captación, de acuerdo con lo investigado, los cuales han sido implementados en otros países, pueden provocar la introducción de aire en el interior del relleno, modificando así los procesos de fermentación y provocando que el biogás generado se libere a la atmósfera.

En relación con ello, los principales impactos provocados por los gases son:

- Efectos sobre la salud humana por frecuente explosión, debido a la presencia de compuestos orgánicos.
- Emisión de olores por efecto de mercaptanos y compuestos orgánicos.
- Deterioro de la vegetación colindante, debido a la migración lateral del biogás.
- Riesgos de explosión o asfixia en lugares cerrados, tales como pozos de visita, ductos, sistemas de alcantarillado, por efecto de la migración lateral.

Las consecuencias ambientales por emisión de GEI en Costa Rica han sido ampliamente estudiadas y documentadas, pero se debe recordar que casi una cuarta parte de los residuos que se genera en el país no son recolectados por las municipalidades o gobiernos locales, es decir, todos los días se producen 880 toneladas de residuos cuyo paradero concreto es desconocido, lo que se sabe es que estos residuos son quemados, depositados en lotes baldíos, enterrados o botados en quebradas ríos u océanos, lo cual produce una gran contaminación del aire, los suelos y el agua que aún no ha sido meticulosamente cuantificada o por lo menos clasificada dentro de parámetros de estudio de las municipalidades. En vista de lo anterior, no es una casualidad que contemos con el río más contaminado de todo Centroamérica, siendo así un indicador de que hay una gran parte de desechos sólidos contaminantes que no se están controlando o captando.

Además de los costos ambientales de nuestra problemática de residuos, se debe contemplar los costos de salud, originados por epidemias y enfermedades derivadas de una mala gestión de residuos como la sucedida actualmente en el relleno sanitario Los Pinos de WPP, como la

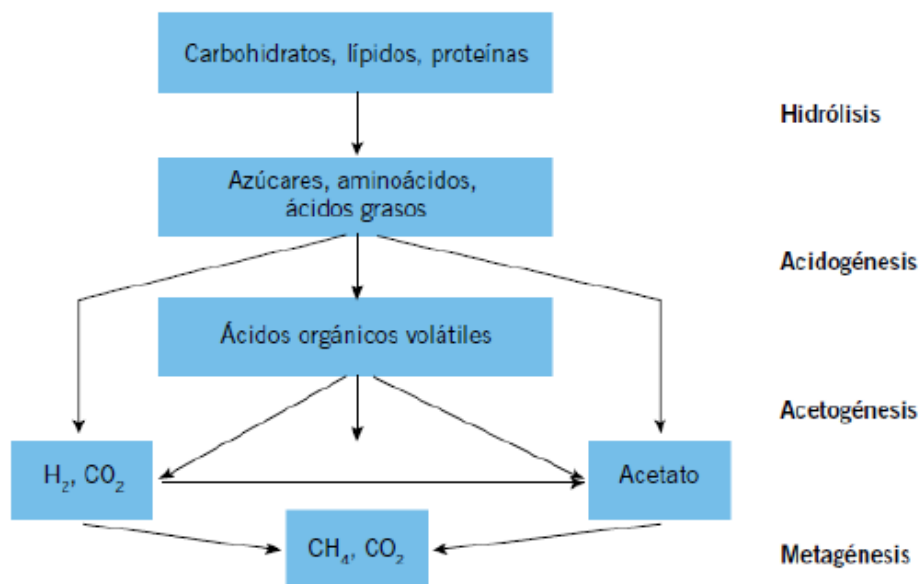
proliferación de mosquitos que transmiten enfermedades, moscas (lo cual ya ha sucedido en el cantón de Paraíso) , aves de carroña, etc. También los costos económicos, donde todos los años las municipalidades invierten más de 75 millones de dólares en la recolección, transporte y disposición de residuos, los cuales van en aumento por largos trayectos y diferentes logísticas por la ausencia de rellenos sanitarios.

Existen, a su vez, costos difíciles de contabilizar, como los relacionados con la pérdida de valor del patrimonio paisajístico y su impacto negativo en actividades inmobiliarias, comerciales, de ocio y de turismo o los costos que implican los fenómenos meteorológicos extremos ocasionados por el cambio climático en la infraestructura y en la pérdida de productividad en la agricultura, así como en carreteras, puentes, deslizamientos y demás situaciones que generan problemas a la comunidad.

2.4 Etapas del proceso de generación de biogás

El proceso de producción de biogás se da por diferentes factores, y lo más importante de su producción es que el metano sea el de mayor contenido ya que es el que proporciona la combustión necesaria como fuente de energía. En la Ilustración 5 se muestra las etapas que componen el proceso de digestión anaerobia.

Ilustración 5: Proceso de digestión anaerobia



Fuente: Silva, 2002.

Hidrólisis

En esta etapa, las bacterias hidrolíticas actúan sobre los compuestos orgánicos de gran tamaño del sustrato, tales como celulosa, almidones, proteínas y grasas; transformándolos por hidrólisis en compuestos orgánicos solubles. Este término indica la conversión de compuestos orgánicos complejos e insolubles (lípidos, proteínas y carbohidratos) en otros compuestos más sencillos y solubles en agua. Esta etapa es fundamental para suministrar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaerobia en forma que pueden ser utilizados por las bacterias responsables de las dos etapas siguientes.

Acidogénesis

Los compuestos orgánicos sencillos generados en la etapa anterior son utilizados por las bacterias generadoras de ácidos. Como resultado se produce su conversión en ácidos orgánicos volátiles (acetato, propionato, butirato), alcoholes y otros subproductos importantes para etapas posteriores (amoníaco, hidrógeno y dióxido de carbono). Esta etapa la pueden llevar a cabo bacterias anaerobias o facultativas.

Acetogénesis

Los productos finales de la etapa anterior son transformados en acetato, hidrógeno y dióxido de carbono por un grupo de bacterias que aportan el 54% del hidrógeno que se utilizará en la formación de metano. La función de estos microorganismos en el proceso de digestión anaerobia es generar los sustratos (hidrógeno, dióxido de carbono y acetato) para las bacterias metanogénicas. Las bacterias acetogénicas son microorganismos que viven en estrecha colaboración con las archaeas metanogénicas. Estos microorganismos son capaces de transformar los ácidos grasos resultantes de la etapa anterior en los sustratos propios de la metanogénesis.

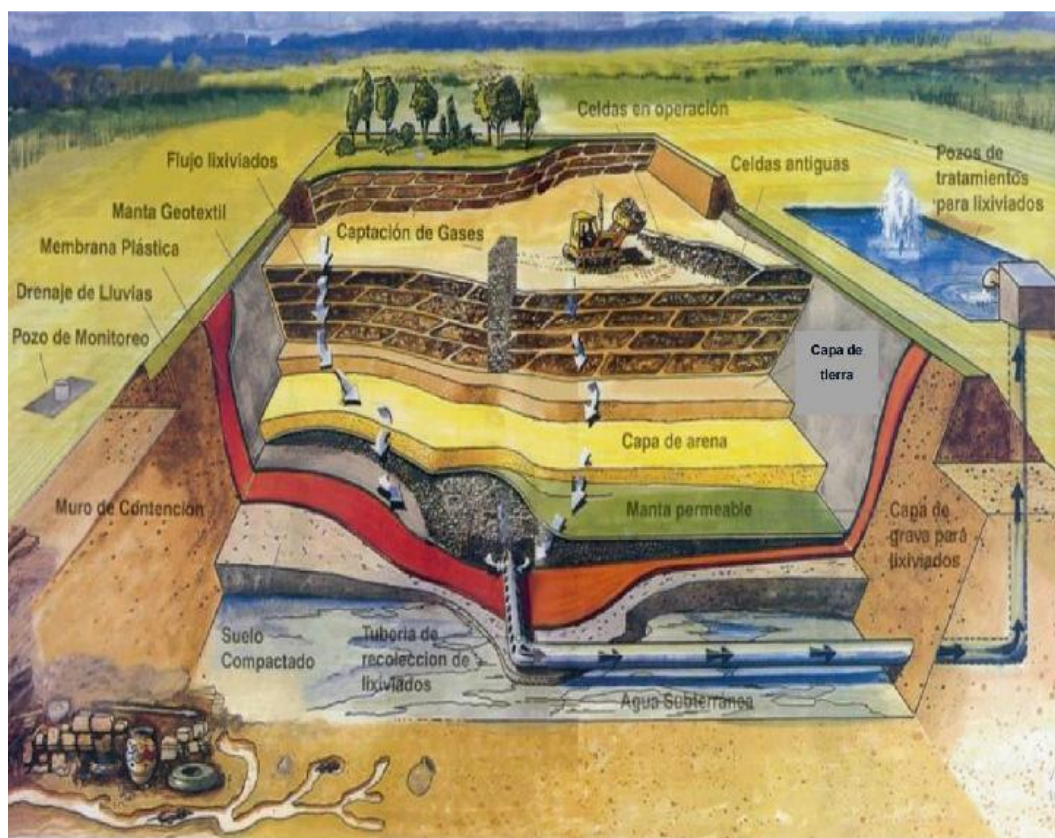
Metanogénesis

Una vez formados los ácidos orgánicos, dos nuevas categorías de bacterias entran en acción, aquellas que convierten el acetato en metano y dióxido de carbono (acetoclásticos) y aquellas que combinan el dióxido de carbono y el hidrógeno para producir metano y agua (hidrotróficos). A diferencia de lo que ocurre con la fase acidogénica, el metabolismo de estas bacterias es más lento y, además, son mucho más sensibles a distintas condiciones ambientales, tales como pH y temperatura. Actúan las bacterias especializadas, degradando estos ácidos y

alcoholes, obteniéndose como productos finales del proceso metabólico gas metano, principal componente del biogás.

En la Ilustración 6 se puede observar los diferentes componentes de un relleno sanitario con las características y regulaciones que normalmente se deben cumplir, de acuerdo con las normativas y leyes que rigen la materia en nuestro país; cabe resaltar que en el proceso de aprovechamiento del metano se producen los lixiviados, los cuales son parte del proceso anaerobio descrito anteriormente y como tal los mismos deben ser canalizados y tratados en su respectiva PTA.

Ilustración 6: Componentes de un relleno sanitario



Fuente: Ministerio del Ambiente, 2013.

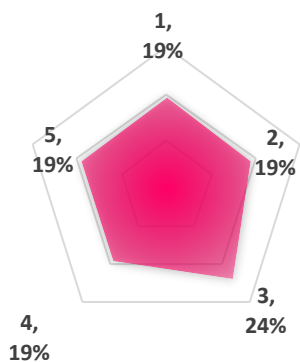
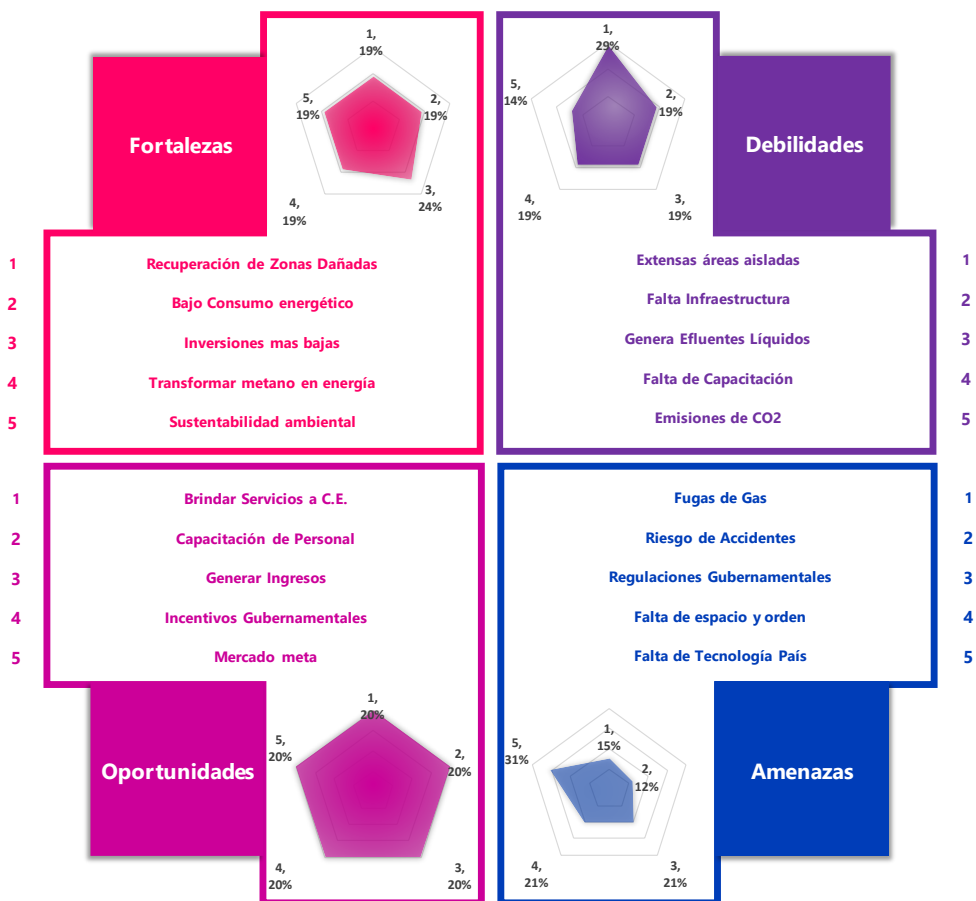
2.5 Herramienta: FODA

Se elabora una matriz de estrategias FODA, que tal como las siglas lo indican, se realiza para analizar las diferentes Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas, que se puedan obtener al aplicar el sistema de recolección para el aprovechamiento del gas metano. Como se muestra a continuación:

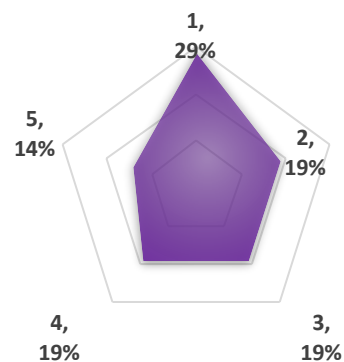
- **Objetivo:** Identificar los factores internos y externos que impactan el aprovechamiento del gas metano en un relleno sanitario.

Análisis Interno			
Fortalezas		Peso	
1	Recuperación de Zonas Dañadas	5	
2	Bajo Consumo energético	5	
3	Inversiones mas bajas	4	
4	Transformar metano en energía	5	
5	Sustentabilidad ambiental	5	
Debilidades		Peso	
1	Extensas áreas aisladas	2	
2	Falta Infraestructura	3	
3	Genera Efluentes Líquidos	3	
4	Falta de Capacitación	3	
5	Emisiones de CO2	4	
Análisis Externo			
Oportunidades		Peso	
1	Brindar Servicios a C.E.	5	
2	Capacitación de Personal	5	
3	Generar Ingresos	5	
4	Incentivos Gubernamentales	5	
5	Mercado meta	5	
Amenazas		Peso	
1	Fugas de Gas	4	
2	Riesgo de Accidentes	5	
3	Regulaciones Gubernamentales	3	
4	Falta de espacio y orden	3	
5	Falta de Tecnología País	2	

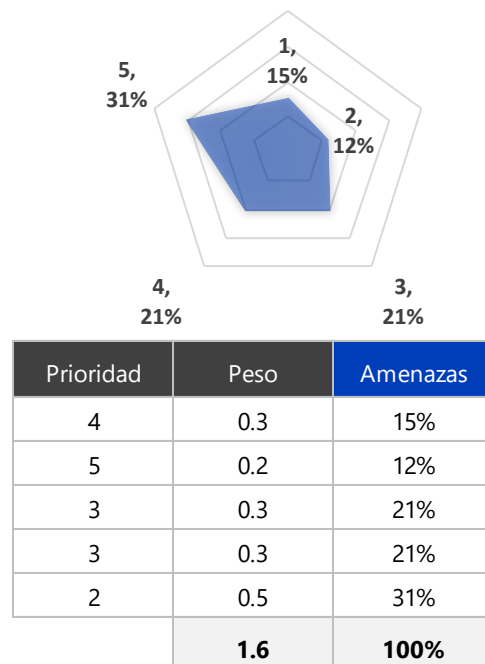
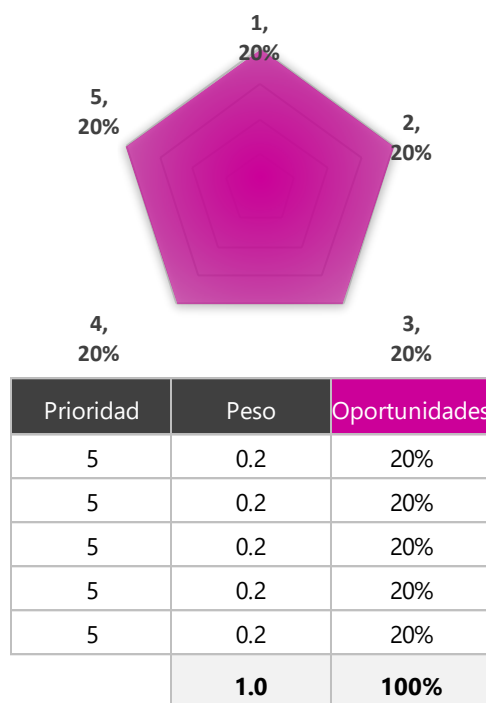
Peso	Concepto
1	Nula importancia
2	Poco Importante
3	Importante
4	Muy Importante
5	Completamente Importante



#	Prioridad	Peso	Fortalezas
1	5	0.2	19%
2	5	0.2	19%
3	4	0.3	24%
4	5	0.2	19%
5	5	0.2	19%
		1.1	100%



Prioridad	Peso	Debilidades
2	0.5	29%
3	0.3	19%
3	0.3	19%
3	0.3	19%
4	0.3	14%
		1.8
		100%



2.6 Diagrama de Ishikawa (espina de pescado)

Se realiza un diagrama de Ishikawa para definir las principales causas y efectos que generan la manera como actualmente se tratan los desechos en los rellenos sanitarios; para desarrollarlo se toma en consideración las causas sobre el medio ambiente, mano de obra, materiales, métodos, maquinaria y medición.

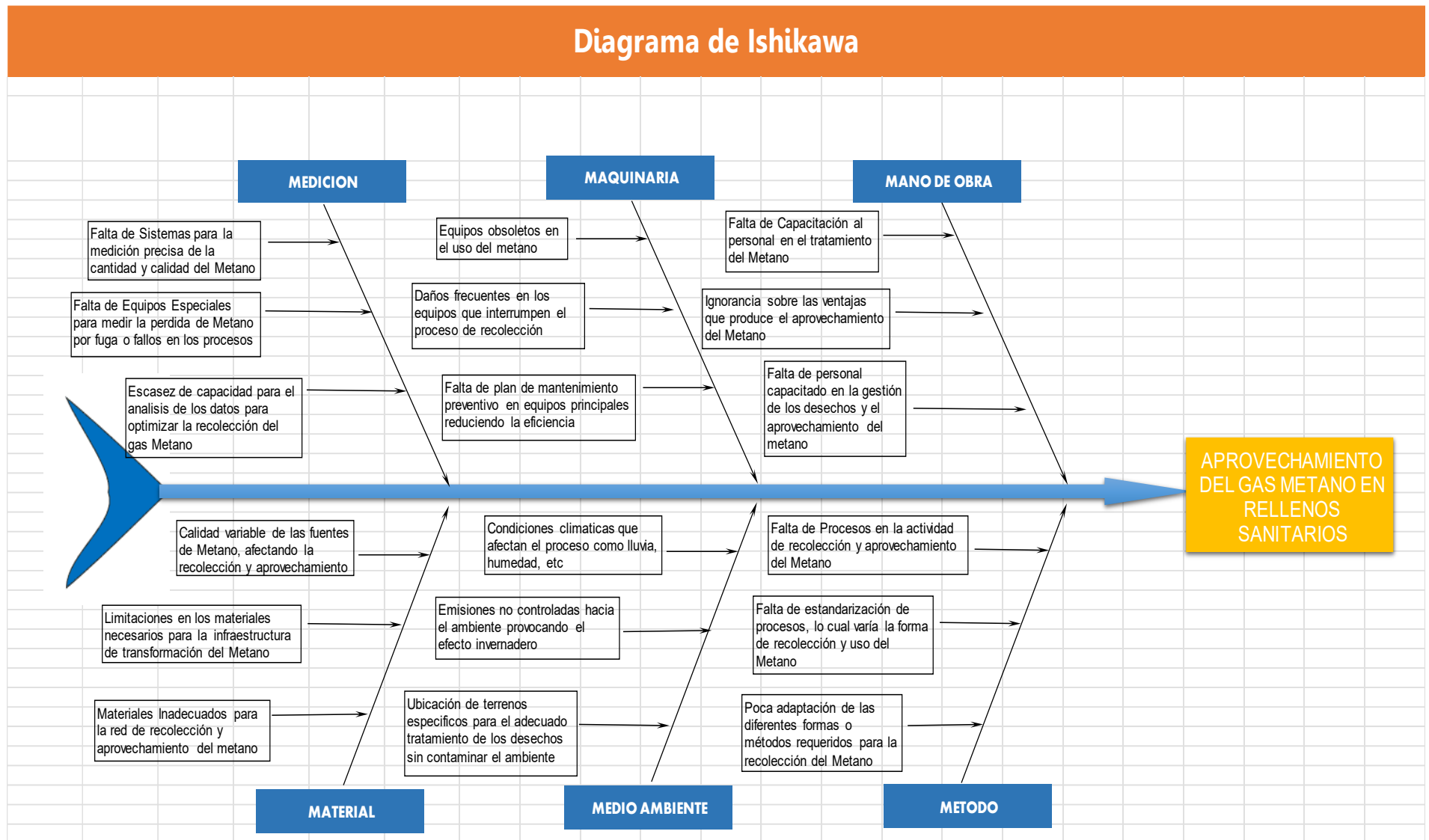
Es una herramienta valiosa para la resolución de problemas porque ayuda a identificar las causas raíz, facilita la comprensión del problema, fomenta la colaboración y permite la implementación de mejoras efectivas.

- Objetivo principal del diagrama: De esa forma, el diagrama tiene como objetivo ayudar al equipo de trabajo u organización a llegar a las causas reales de cuellos

de botella que acometen los procesos operativos y organizacionales del relleno sanitario, por ejemplo, un proceso operativo normal que se da en el proceso de recolección del gas como lo es un escape o fuga de gas metano. En otras palabras, se puede decir que su propósito es desenmascarar situaciones no deseadas exponiendo su verdadero motivo, para lo cual, al conocer los problemas reales, se podrá asociar contingencias y posibles soluciones inmediatas, además de tomar mejores decisiones.

Este diagrama se muestra a continuación:

Ilustración 7: Diagrama de Ishikawa



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Matriz de Análisis de Impacto Ambiental (Matriz de Riesgos)

En los rellenos sanitarios existen muchos riesgos por accidentes y desastres que conllevan, por ejemplo, explosiones debido a la acumulación del gas metano, producido por la descomposición natural de los desechos sólidos en forma anaeróbica.

El gas metano tiende a acumularse en los espacios vacíos dentro del relleno, por lo cual podría migrar a áreas vecinas, lo cual hace de suma importancia que estos vertederos estén aislados de zonas pobladas ya que de no ser así implicaría el peligro de explosión. Estos riesgos deben evaluarse y abordarse con planes de contingencia apropiados para evitar posibles daños y un impacto mayor al ambiente.

En el relleno sanitario también se deben considerar los aspectos socioculturales de la zonificación, especialmente en relación con las dimensiones de las instalaciones, que deben estar en conformidad con la regulación vigente en el país, así como el uso del suelo urbano.

Los impactos estéticos y sonoros (ruidos de tránsito) deben ser evaluados especialmente en las áreas próximas a comunidades o pueblos. La migración de gases y polvo (olor y humo) según la dirección prevaleciente de los vientos, el flujo de las aguas subterráneas (que pueden contaminar a los pozos de agua potable o ríos) y las características de los cuerpos de aguas superficiales como las pluviales que generan escorrentías con algunos lixiviados son elementos importantes de considerar dentro del análisis de riesgos.

Ilustración 8 Modalidad de Rellenos Sanitarios Centroamérica



Fuente: Fabián Campos Suplemento C+T UCR.

- Objetivo de la Matriz de Riesgos: Evaluar los efectos ambientales de las actividades en el proyecto.
- Pasos:
 - Listar las actividades del proyecto en las filas y los factores ambientales (suelo, aire, agua, biodiversidad) en las columnas.
 - Evaluar la magnitud y la importancia de cada impacto, marcándolo en la matriz.
 - Identificar las actividades de mayor impacto para diseñar medidas de mitigación.

MATRIZ DE RIESGO APROVECHAMIENTO DEL GAS METANO EN RELLENOS SANITARIOS

	SEVERIDAD					
PROBABILIDAD	1 Insignificante	2 Menor	3 Moderada	4 Importante	5 Catastrófica	Medida Mitigación
	5	10	15	20	25	
5 Muy probable	Impacto sobre los hogares de vecinos colindantes	Impacto en la flora y fauna del entorno	Contaminación estética y ambiental	Alteración en áreas de interés ecológico por el impacto ambiental	Los desechos mal gestionados significan un riesgo a la salud pública y de los trabajadores	Se requiere un plan de gestión ambiental para mitigar los impactos descritos.
	4	8	12	16	20	
4 Probable	Pérdida de vegetación predominante de la zona en el área ocupada	No cuentan con personal profesional permanente en sitio encargado de controles	Tala de árboles para abarcar más espacio de disposición	No cuentan con personal capacitado en la gestión de los desechos	Desequilibrio de ecosistemas	Se requiere inversión en capacitación integrada para el manejo de desechos
	3	6	9	12	15	
3 Posible	Mantenimiento de equipos pesados	No tienen manuales de procesos	Restricción en la recepción de cierto tipo de desechos	Falta de personal en campo para el control de fugas	Escapes o fugas no controladas de gas metano	Generar planes mantenimiento preventivo a nivel general
	2	4	6	8	10	
2 No es probable	Generación de polvo por trasiego de desechos	Contaminación de calles con lixiviados	Generación de ruido por maquinaria pesada	Inestabilidad de las capas de suelo	Contaminación de acuíferos	Limpiezas y horarios programados diarios
	1	2	3	4	5	
1 Muy improbable	Muerte de fauna por ingerir basura del relleno	Erosión de terrenos aledaños	Deterioro de la calidad de las aguas	Desfiguración del paisaje	Problemas de salud por contacto con basura	Campañas de reforestación y siembra controlada

Ilustración 9: Matriz de riesgos

Criterios de la matriz de riesgos

Gravedad	×	Probabilidad	=	Impacto del riesgo
Insignificante		Muy probable		Bajo
Menor		Probable		Mediano
Moderada		Posible		Alto
Importante		No es probable		
Catastrófica		Muy improbable		

Fuente: Elaboración Propia, 2025

Muy probable (5):

Puedes estar bastante seguro de que este riesgo ocurrirá en algún momento.

- Probable (4):

Existe una gran probabilidad de que este riesgo ocurra.

- Posible (3):

Este riesgo podría ocurrir o no. Las probabilidades de que suceda son 50/50

- No es probable (2):

Existe una gran probabilidad de que este riesgo no ocurra.

- Muy improbable (1):

El hecho de que este riesgo ocurra es una posibilidad remota.

Cuando se coloca un riesgo en la matriz en función de su probabilidad y gravedad, se obtendrá el nivel de impacto del riesgo. El impacto del riesgo está codificado por color verde a rojo y clasificado en una escala de 1 a 25.

- Bajo (1-6): Es probable que los eventos de bajo riesgo no sucedan y, si suceden, no tendrán consecuencias significativas para el proyecto o empresa. Se puede etiquetar como de baja prioridad en el plan de gestión de riesgos.

- Medio (7-12): Los eventos de riesgo medio son una molestia y pueden causar contratiempos en el proyecto, pero si se toman las medidas correspondientes para prevenir y mitigar estos riesgos durante la planificación del proyecto, se estará labrando el camino hacia el éxito del proyecto. No se deben ignorar estos riesgos, pero tampoco es necesario que sean la principal prioridad.

- Alto (13-25): Si no se tiene en cuenta durante la planificación del proyecto, los eventos de alto riesgo pueden hacer que el proyecto descarrile. Dado que es probable que estos riesgos ocurran y tengan consecuencias graves, son lo más importante en el plan de gestión de riesgos.

La última parte de la ecuación de análisis de riesgos es calcular el impacto del riesgo, lo cual se describe a continuación.

Probabilidad x gravedad = impacto del riesgo

Con esto se obtendrán las cantidades observadas en la tabla, para lograr tener un margen del impacto de los riesgos que se puedan presentar en el proyecto con el objetivo de crear planes de contingencia y así solucionar o reducir el impacto de este.

3 CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El enfoque de esta investigación se centra en el análisis del aprovechamiento del gas metano en rellenos sanitarios, con el objetivo de evaluar métodos y estrategias para capturar, procesar y utilizar este biogás como fuente de energía, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y económica. En este contexto, la investigación busca identificar y comprender los factores que afectan la recolección eficiente de metano, los impactos ambientales, los costos y beneficios, y la percepción de los actores involucrados (como autoridades locales, operadores de rellenos sanitarios y comunidades cercanas).

Esta investigación es de enfoque mixto, combinando tanto métodos cuantitativos como cualitativos para obtener una visión integral del problema y de las posibles soluciones.

Justificación del enfoque mixto:

1. Cuantitativo: Se utilizarán métodos cuantitativos para medir aspectos objetivos, como:

- Cantidad de metano producido y capturado en los rellenos sanitarios.
- Análisis de costos y beneficios financieros.
- Evaluación de indicadores ambientales, como reducción de emisiones y eficiencia de captura.

Estos datos serán recogidos a través de registros bibliográficos, proporcionando datos numéricos que permitirán análisis estadísticos.

2. Cualitativo: La investigación también analizará aspectos cualitativos para explorar:

- Barreras y facilitadores en la implementación de tecnologías de captura de metano.
- Contexto social y regulatorio que puede afectar la viabilidad del proyecto.

Estos datos se obtendrán mediante análisis de documentos, proporcionando un entendimiento profundo de las dinámicas sociales y ambientales.

Este enfoque mixto se alinea con los objetivos de identificar, medir y analizar tanto los datos objetivos como los factores subjetivos que inciden en el aprovechamiento del gas metano en rellenos sanitarios.

3.2 MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN

Método de investigación utilizado: DMAIC

1. Definir

Objetivo del Proyecto: Mejorar la eficiencia en la recolección y aprovechamiento del gas metano en rellenos sanitarios.

Problema por Resolver: Identificar las barreras y las oportunidades en el proceso actual de captura de metano para maximizar su uso como fuente de energía.

Alcance del Estudio: Se centrará en rellenos sanitarios en general a nivel país, considerando aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales.

Partes Interesadas: Operadores de rellenos sanitarios, autoridades ambientales, comunidades locales, investigadores y empresas de tecnología.

2. Medir

Recolección de Datos:

Cuantitativos:

Medir la cantidad de metano producido y capturado.

Evaluar los costos operativos y de mantenimiento de las tecnologías de captura.

Calcular la eficiencia de captura de metano ($\text{volumen de metano capturado} / \text{volumen total de metano producido}$).

Cualitativos:

Realizar una comparación de estudios realizados, para lograr comprender el aprovechamiento del gas metano.

Recolectar información sobre las regulaciones existentes y las mejores prácticas en otros rellenos sanitarios.

Establecimiento de líneas base: Documentar las condiciones actuales del sistema de recolección y aprovechamiento del metano para comparación futura.

3. Analizar

Análisis de datos:

Utilizar herramientas estadísticas para evaluar la eficiencia de captura y el impacto de los costos en la viabilidad del sistema.

Realizar un análisis FODA para identificar fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas en el sistema actual.

Analizar las entrevistas y encuestas para identificar patrones, barreras y oportunidades de mejora desde la perspectiva de los actores involucrados.

Identificación de causas raíz: Usar un diagrama de Ishikawa para identificar las causas que afectan la eficiencia en la recolección y aprovechamiento del gas metano.

4. Mejorar

Desarrollo de soluciones:

Proponer mejoras en la infraestructura de captura y almacenamiento del gas metano, basadas en las mejores prácticas identificadas.

Diseñar programas de capacitación para operadores de rellenos sanitarios sobre el manejo y aprovechamiento del gas metano.

Sugerir ajustes en las políticas y regulaciones para facilitar la implementación de tecnologías de captura.

Implementación de cambios: Presentar soluciones propuestas sobre su impacto al relleno sanitario.

Análisis de resultados: Comparar los datos obtenidos después de las mejoras con la línea base establecida para evaluar el impacto.

5. Controlar

Monitoreo de resultados:

Establecer un sistema de monitoreo continuo para medir la eficiencia de captura de metano y su aprovechamiento como fuente de energía.

Implementar indicadores de desempeño ambiental y económico para evaluar la sostenibilidad de las mejoras realizadas.

Plan de sostenibilidad: Diseñar un plan para mantener y mejorar continuamente el sistema de captura y aprovechamiento de gas metano, asegurando que se sigan las mejores prácticas y se adapten a futuros cambios en el entorno regulatorio y tecnológico.

3.3 FUENTES DE INFORMACIÓN

Libros

Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction.

Autor: Brian A. P. McKendry.

Este libro ofrece una introducción completa al biogás, su producción y uso, con un enfoque en su aprovechamiento en rellenos sanitarios.

Landfill Gas Handbook: A Guide to Landfill Gas Management.

Autor: David A. L. Levenstein.

Este libro proporciona una guía exhaustiva sobre la gestión del gas de vertedero, incluyendo métodos para su captura y utilización.

Anaerobic Digestion: Methods and Technology.

Autor: R. M. S. Ferreira.

Este texto detalla las tecnologías y métodos para la digestión anaeróbica, que es fundamental para el aprovechamiento del metano en rellenos sanitarios.

Artículos Académicos

"Landfill Gas Recovery: A Review of Current Technologies".

Autores: K. L. Stinson, D. D. Fenton.

Revista: *Waste Management*.

Año: 2020.

Este artículo revisa las tecnologías actuales para la recuperación de gas de vertedero y su eficacia en diferentes contextos.

"The Role of Landfill Gas in Climate Change Mitigation".

Autores: J. Smith, A. D. Brown.

Revista: *Environmental Science & Policy*.

Año: 2019.

Este artículo analiza cómo el aprovechamiento del gas metano de rellenos sanitarios puede contribuir a la mitigación del cambio climático.

"Assessment of Biogas Production Potential from Landfills: A Case Study".

Autores: M. P. Ochoa, R. G. Santamaría.

Revista: *Renewable Energy*.

Año: 2021.

Se estudia el potencial de producción de biogás en rellenos sanitarios mediante un análisis de caso específico.

Normas Técnicas

- ISO 14064:2006 - Greenhouse Gases.

La norma internacional proporciona directrices para la cuantificación y reporte de emisiones de gases de efecto invernadero, incluyendo el metano producido en rellenos sanitarios.

- ASTM D-6230: *Standard Guide for the Collection and Measurement of Landfill Gas*

La Norma establece procedimientos para la recolección y medición de gas de vertedero, crucial para la evaluación del aprovechamiento del metano.

- CSCR 2010 (Código Sísmico de Costa Rica): Aplicable a obras civiles del sistema.
- Lineamientos de Generación Distribuida del ICE (2019).

Normativa Ambiental de Costa Rica

Leyes y regulaciones relacionadas con la gestión de residuos sólidos y la captación de gas metano en rellenos sanitarios en Costa Rica.

- Decreto 38914-S-MINAE: Gestión integral de residuos sólidos.
- Guía Técnica para la Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios (MINAE, 2011).
- Ley de Protección al Ambiente (Ley 7554).

Revistas

Waste Management

Revista que publica investigaciones y artículos relacionados con la gestión de residuos y el aprovechamiento de recursos, incluyendo el gas metano.

Renewable Energy

Esta revista incluye investigaciones sobre energías renovables, con artículos específicos sobre la utilización del biogás proveniente de rellenos sanitarios.

Journal of Environmental Management

Publica estudios sobre la gestión ambiental, que incluyen el análisis del impacto del aprovechamiento del gas metano en la sostenibilidad de los rellenos sanitarios.

3.3.1. Sujetos de información

Otras fuentes

- Informes de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La FAO produce informes sobre el uso de biogás y su relación con la gestión de residuos y la sostenibilidad agrícola.

- Estudios del Banco Mundial sobre Energía y Residuos

Proporciona datos y estudios sobre el aprovechamiento de residuos sólidos y el desarrollo de tecnologías para la captura de gas metano.

- Guías de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA)

La EPA ofrece guías sobre la gestión de gas de vertedero y las mejores prácticas para su aprovechamiento.

3.4 VARIABLES DE ANÁLISIS

Variables Cuantitativas

Estas variables se pueden medir numéricamente y se utilizan para realizar análisis estadísticos:

1. Volumen de Gas Metano (m^3): Cantidad total de metano producido en un relleno sanitario durante un período determinado.

2. Porcentaje de Captura de Metano (%): Porcentaje del metano que se captura respecto al total producido.

3. Costos de Instalación de Sistemas de Captura (C): Inversión inicial requerida para implementar tecnologías de recolección de metano.

4. Costos Operativos Anuales (C): Gastos anuales para el mantenimiento y operación del sistema de captura de metano.

5. Producción de Energía (kWh): Cantidad de energía generada a partir del metano capturado.

6. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) reducidas (toneladas): Cantidad de emisiones de GEI evitadas mediante la captura y utilización del metano.

7. Número de Rellenos Sanitarios en operación: Cantidad de rellenos sanitarios que cuentan con sistemas de captura de metano en el país.

8. Superficie del Relleno Sanitario (hectáreas): Área total del relleno sanitario donde se produce el gas metano.

Variables Cualitativas

Estas variables se describen mediante categorías y cualidades, y se utilizan para explorar percepciones, actitudes y experiencias.

1. Eficiencia Percibida de la Tecnología de Captura: Evaluación subjetiva por parte de los operadores sobre la eficacia de los sistemas de captura de metano.

2. Impacto Social del Aprovechamiento del Metano: Cambios en la comunidad debido a la implementación de proyectos de aprovechamiento del metano (empleo, salud, etc.).

3. Actitudes hacia el Uso de Energías Renovables: Opiniones de la comunidad sobre la importancia de utilizar biogás como fuente de energía.

4. Nivel de Conocimiento sobre el Metano y sus Beneficios: Conocimientos de los residentes locales y gobiernos locales sobre el gas metano y su aprovechamiento expresado en reportajes.

5. Barreras percibidas para la implementación de sistemas de captura: Obstáculos identificados por las partes interesadas que dificultan la implementación efectiva de tecnologías.

Variables Mixtas

Estas variables combinan aspectos cuantitativos y cualitativos, permitiendo un análisis más completo.

Relación entre el Volumen de Metano Capturado y la Satisfacción de la Comunidad: Cuantificar el volumen de metano capturado y correlacionarlo con la satisfacción de la comunidad a través proyecciones.

Costos vs. Beneficios Sociales de los Proyectos de Captura de Metano: Medición de costos operativos y evaluación cualitativa de los beneficios sociales percibidos por la comunidad.

Efectividad de la Captura de Metano y su Impacto en la Salud Pública: Datos sobre la eficiencia de los sistemas de captura y estudios de caso sobre mejoras en la salud pública reportadas por los residentes.

Nivel de Inversión en Tecnología de Captura y Resultados Ambientales: Análisis del monto invertido en tecnologías de captura y la reducción cuantitativa de emisiones de gases de efecto invernadero.

Tabla 1: Variables de la investigación por objetivo específico

Objetivo específico	Variable	Definición conceptual	Operacionalización	Instrumentalización
Documentar el manejo de los residuos sólidos en Costa Rica, en función de la normativa aplicable a la materia y el impacto ambiental.	Evaluación de la infraestructura disponible para la gestión de residuos en Costa Rica.	La infraestructura de gestión de residuos se refiere al conjunto de instalaciones, equipos, sistemas y procesos diseñados para la recolección, transporte, tratamiento, reciclaje y disposición final de los residuos sólidos generados en Costa Rica. Esta infraestructura es fundamental para asegurar una gestión eficiente y sostenible de los residuos, minimizando su impacto ambiental y promoviendo el desarrollo de prácticas económicas.	➤ Rellenos sanitarios ➤ Centros de reciclaje ➤ Plantas de compostaje ➤ Sistemas de recolección ➤ Equipos de tratamiento ➤ Normativas y regulaciones	➤ Ley de Gestión Integral de Residuos ➤ Normativa ambiental local ➤ Regulaciones sobre residuos peligrosos ➤ Auditorías realizadas sobre gestión de residuos ➤ Existencia de registros de generación de residuos ➤ Capacitación al personal en gestión de residuos
Describir la técnica de gasificación en la generación de energía a partir de residuos sólidos dispuestos en rellenos sanitarios.	Se refiere al proceso de convertir el metano, que es un componente principal del biogás producido por la descomposición anaeróbica de residuos sólidos en rellenos sanitarios, a través de un proceso termoquímico.	La gasificación permite aprovechar la energía contenida en el metano de manera más eficiente, al generar syngas que puede ser utilizado para la producción de electricidad.	➤ Identificación y caracterización de residuos sólidos en rellenos sanitarios ➤ Preparación de residuos para gasificación ➤ Aplicación de la técnica de gasificación ➤ Producción de gas de síntesis (syngas) ➤ Purificación del syngas para generación de energía ➤ Generación de energía a partir del syngas	➤ Tipo de residuos disponibles (% orgánicos, % inorgánicos), contenido energético de los residuos (MJ/kg) ➤ Nivel de trituración de residuos (tamaño de partículas en mm), reducción de humedad (%) previa a la gasificación ➤ Temperatura alcanzada en el gasificador (°C), cantidad de oxígeno

➤ Evaluación de impacto ambiental y reducción de residuos en rellenos sanitarios	controlado en el proceso (%), tiempo de retención de residuos en el gasificador (minutos)
	➤ Volumen de syngas generado (m^3 por tonelada de residuo), composición del syngas (% de H_2 , CO , CH_4)
	➤ Pureza del gas después de la purificación (% de contaminantes eliminados), eficiencia del proceso de purificación (% de syngas convertido en energía utilizable)
	➤ Cantidad de electricidad generada (kWh por m^3 de syngas), eficiencia del generador (% de conversión de syngas en electricidad)
	➤ Reducción del volumen de residuos en relleno sanitario (%), reducción de emisiones de metano (toneladas de CH_4 evitadas), toneladas de CO_2 equivalente evitadas

Establecer el proceso adecuado para el aprovechamiento de esta fuente renovable de los desechos sometidos a la técnica de gasificación con el propósito de generar energía.	Los desechos preparados se introducen en un gasificador, donde, a alta temperatura y en un ambiente con bajo contenido de oxígeno, se produce la descomposición de los materiales orgánicos. Este proceso genera un gas de tipo metano.	Diseño e implementación de un conjunto de etapas y procedimientos optimizados que permitan transformar de manera eficiente los desechos orgánicos en energía utilizable, empleando la técnica de gasificación. Este proceso convierte los desechos en un gas rico en energía, como el metano, mediante la descomposición térmica controlada en un ambiente de bajo oxígeno, con el fin de reducir residuos y generar energía sostenible a partir de una fuente renovable.	➤ Recolección y clasificación de desechos orgánicos ➤ Preparación y tratamiento de los desechos ➤ Gasificación de los desechos ➤ Purificación y metanación del syngas ➤ Almacenamiento y distribución del gas metano ➤ Generación de energía ➤ Evaluación del impacto ambiental y reducción de residuos	➤ % de desechos orgánicos aptos para gasificación ➤ Tamaño promedio de partículas (en milímetros), humedad residual ➤ Volumen de syngas producido (m³ por tonelada de desecho), % de CO e H₂ en el syngas ➤ % de metano (CH₄) en el gas final, eficiencia del catalizador ➤ Volumen de gas almacenado (m³), pérdida de metano en almacenamiento (%) ➤ Energía generada (kWh por m³ de metano).
--	--	--	---	--

Fuente: Autor.

3.5 INSTRUMENTOS

1. Revisión Bibliográfica

- Recopilar y analizar información teórica existente sobre el aprovechamiento del gas metano a partir de diferentes fuentes de información, que contengan referencias veraces de la situación en el nivel mundial y en el nivel país, tomando en consideración la situación actual en torno a la problemática que enfrenta nuestro país, así como revisión de propuestas de desarrollo en la atención a dicha problemática, ya que es el enfoque de este proyecto.

- Procedimientos:

- Identificación de fuentes: Libros, artículos académicos, informes técnicos y normas relevantes.

- Análisis de contenido: Resumir las teorías principales, resultados de estudios previos y recomendaciones en relación con el gas metano en rellenos sanitarios.

- Comparativa: Evaluar las diferencias y similitudes en enfoques y hallazgos de diferentes estudios.

2. Análisis FODA

- Esta herramienta es de gran utilidad y diversidad de usos para el proyecto, mediante la cual se reúnen las ideas, según la agrupación dada. Tomando en consideración los siguientes aspectos que arroja este tipo de herramienta:

Conocer la situación actual:

Permite identificar los factores internos (fortalezas y debilidades) y externos (oportunidades y amenazas) que impactan en el proyecto.

Identificar áreas de mejora:

Al analizar las debilidades y amenazas, se pueden establecer acciones para minimizarlas o eliminarlas, mientras que, al identificar fortalezas y oportunidades, se pueden potenciar en pro del éxito del proyecto.

Tomar decisiones estratégicas:

Proporciona información clave para definir planes de acción maximizando las oportunidades y minimizando los posibles riesgos que se tengan que enfrentar en el proyecto.

Facilitar la toma de decisiones:

Al tener una visión clara de la situación, se pueden tomar decisiones más acertadas y efectivas ya que se consideran todas las aristas posibles de las cuales se toman las mejores opciones.

3. Análisis Diagrama de Ishikawa (Espina de Pescado)

- Objetivo: Ayudar a identificar las causas raíz de un problema, facilitando la búsqueda de soluciones efectivas. Su estructura visual permite analizar diferentes factores que pueden contribuir a un problema, promoviendo la comprensión de este en múltiples

niveles y fomentando la colaboración en la búsqueda de soluciones o alternativas que nos ayuden en el desarrollo del proyecto.

- Elementos por analizar:
 - Identificación de regulaciones relevantes a nivel nacional e internacional.
 - Evaluación de su impacto en la implementación de tecnologías de captura de metano.
 - Análisis de recomendaciones y mejores prácticas propuestas por estas normativas.
 - Permite visualizar las diferentes causas que contribuyen a un problema, en lugar de enfocarse solo en los síntomas.
 - Facilita un análisis profundo de las causas, considerando factores como métodos, máquinas, mano de obra, materiales, medición y medio ambiente
 - Al comprender las causas raíz, se pueden tomar decisiones más informadas para abordar el problema de manera efectiva.
 - Su estructura visual facilita la discusión y el intercambio de ideas entre diferentes equipos o departamentos, promoviendo la participación y la colaboración.

- Permite identificar áreas de mejora en los procesos productivos, operativos o administrativos de una empresa, contribuyendo a la eficiencia y la calidad.
- Al resolver problemas de manera efectiva, se pueden reducir los costos asociados a desperdicios y errores.
- El proceso de creación del diagrama puede ser una herramienta de capacitación para los equipos, enseñándoles cómo analizar y abordar problemas de manera sistemática.

4. Matriz de Riesgos

- La matriz de riesgos es muy importante en el aprovechamiento del gas CH₄ que se emite en los rellenos sanitarios ya que ayuda a identificar, evaluar y mitigar los peligros potenciales asociados con la captura y uso de este gas, minimizando así los riesgos para la salud humana, el medio ambiente y la seguridad del proyecto. La matriz permite tomar decisiones informadas sobre las medidas de control y prevención necesarias, garantizando una operación segura y sostenible del sistema de aprovechamiento de biogás.
- Criterios por considerar:
 - Permite reconocer los posibles riesgos asociados con la captura, transporte, almacenamiento, tratamiento y utilización del gas metano, como fugas, explosiones, inhalación de gases tóxicos y contaminación del suelo y agua.

- Cuantifica la probabilidad y el impacto de cada peligro identificado, permitiendo priorizar los riesgos más significativos y enfocar los esfuerzos de mitigación en ellos.
- Facilita la selección e implementación de medidas de control y prevención adecuadas, como sistemas de ventilación, detección de fugas, sistemas de seguridad contra incendios y explosiones, y equipos de protección personal.
- Contribuye a crear un entorno de trabajo seguro para los operarios y minimizar los riesgos para la salud pública y el medio ambiente.
- Al abordar los riesgos de manera proactiva, asegura la viabilidad a largo plazo del proyecto de aprovechamiento de biogás y evita posibles interrupciones en la operación.
- Ayuda a garantizar que el proyecto cumpla con las regulaciones ambientales y de seguridad aplicables, evitando sanciones y problemas legales.

5. Análisis de Casos de Estudio Documentados

- Objetivo: Examinar estudios de caso publicados que describan la implementación de sistemas de captura de metano.
- Estructura del informe:
 - Contexto del caso: descripción del relleno sanitario, tipo de residuos.
 - Tecnología utilizada y proceso de captura.

- Lecciones aprendidas y recomendaciones teóricas.

6. Análisis de Datos Secundarios

- **Objetivo:** Recopilar y analizar datos disponibles sobre producción de metano y su aprovechamiento a partir de fuentes secundarias ya que permite comprender mejor el proceso de descomposición de la materia orgánica y la generación de biogás, identificar las fuentes y patrones de emisión, evaluar la viabilidad técnica y económica de la captura y uso del biogás, y estimar el potencial de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

- **Fuentes:**

- Estadísticas oficiales sobre gestión de residuos y producción de biogás.
- Informes de organismos internacionales sobre energías renovables y biogás.

3.6 PROCESO PARA LA RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

1. Definición del Objetivo del Estudio

- Evaluar el potencial de aprovechamiento del gas metano generado en rellenos sanitarios y su impacto en la sostenibilidad ambiental.

2. Revisión Bibliográfica

- Investigar estudios previos, artículos científicos, normativas y reportes sobre:

- Generación de biogás en rellenos sanitarios.
- Métodos de captura y aprovechamiento del metano.
- Impacto ambiental del metano y su mitigación.

3. Selección del Área de Estudio

- Elegir uno o más rellenos sanitarios representativos para el análisis, considerando:

- Características geográficas y climáticas.
- Tipo y cantidad de residuos gestionados.
- Sistemas actuales de gestión de residuos.

4. Diseño del Método de Recolección de Datos

- Tipos de datos por recolectar:

Datos cuantitativos:

- Cantidad de residuos sólidos recibidos y su composición.
- Volumen y flujo de gas metano producido.

- Eficiencia de los sistemas de captura de metano.

Datos cualitativos:

- Prácticas de gestión en el relleno sanitario.
- Opiniones de expertos y operadores sobre el proceso de captura y utilización del gas.

5. Recolección de Datos

- Monitorear la producción de gas metano mediante estudios técnicos elaborados para las mediciones en el relleno.
- Documentar cuidadosamente cada paso y los resultados obtenidos.

6. Análisis de Datos

- Análisis cuantitativo:
 - Utilizar *software* estadístico para analizar los datos numéricos (por ejemplo: SPSS, Excel).
 - Calcular promedios, medianas y otras métricas relevantes para la producción de metano.
 - Realizar gráficos y tablas que representen la producción de metano en relación con la cantidad de residuos.
- Análisis cualitativo:

- Utilizar análisis de contenido para evaluar las percepciones sobre la captura y aprovechamiento del metano.

7. Evaluación de Tecnologías de Aprovechamiento

- Investigar y evaluar las diferentes tecnologías utilizadas para el aprovechamiento del gas metano, como:

- Generación de electricidad: Plantas de biogás que convierten metano en electricidad.
- Inyección a la red: Sistemas que permiten inyectar biogás a la red de gas natural.

8. Conclusiones y Recomendaciones

- I. Elaborar un informe que resuma los hallazgos, conclusiones y recomendaciones para el aprovechamiento del gas metano.
- II. Proponer estrategias para mejorar la captura y uso del metano en los rellenos sanitarios, considerando aspectos técnicos y económicos.

9. Difusión de Resultados

- Presentar los resultados del estudio a través de publicaciones, conferencias o talleres con partes interesadas (gobierno, empresas de gestión de residuos, comunidades locales).

3.7 IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA PARA LA RECOLECCIÓN Y APROVECHAMIENTO DEL GAS METANO EN RELLENOS SANITARIOS

El sistema que se propone de recolección para el aprovechamiento del gas metano se plantea pensando en implementarlo en el Relleno Sanitario Los Pinos de la empresa WPP. Por razones como la ubicación geográfica, la topografía actual y al contar con un cierre total emitido por el Ministerio de Salud, ha dejado de recibir desechos sólidos durante aproximadamente un año, por lo cual, los desechos actuales se han mantenido en reposo y sin movimiento, favoreciendo un panorama idóneo para la descomposición controlada y la generación del gas metano.

Además, parte de los alegatos de la empresa mencionada anteriormente es que no poseen los recursos económicos suficientes para seguir con las operaciones y el tratamiento adecuado de los desechos sólidos, lo cual a su vez sería una posible solución a esta situación económica actual, con la generación y venta de la energía a través del biogás. Debido a las condiciones actuales y la necesidad de rehabilitar este relleno que es de suma importancia para la provincia de Cartago, es que se indica específicamente la aplicación en él.

Sin embargo, cabe recalcar que el sistema de recolección propuesto para el aprovechamiento del gas metano es aplicable a los pocos rellenos sanitarios que están en funcionamiento actualmente en el país ya que están al borde del colapso, por capacidad y por el tratamiento indebido e indiscriminado de los desechos sólidos, generando a su vez todos los impactos ambientales mencionados en párrafos anteriores.

Los rellenos sanitarios en Costa Rica cuentan con las condiciones climáticas y ambientales como altura, temperaturas, precipitaciones, lo que hace un ambiente óptimo para el proceso de descomposición anaerobia y aumentando la producción de biogás en el relleno.

En la Ilustración 10 se muestran aplicaciones que se pueden obtener expresando en volumen la cantidad de biogás para la generación de energía.

Ilustración 10: Aplicaciones por 1 m³ de biogás



Fuente: Bueso, Samayoa y Viquez, 2012.

Entre los diversos subproductos generados durante la descomposición anaerobia de los residuos, el gas metano (CH₄) destaca por su potencial energético y su contribución al cambio climático. Su adecuada captura y posterior aprovechamiento representan una solución estratégica que integra sostenibilidad ambiental, eficiencia energética y reducción de emisiones nocivas, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7 y 13) de la agenda 2030 firmada por nuestro país.

Las fases generales necesarias para el diseño del sistema de recolección de gas en nuestro país por implementar tanto para un relleno sanitario nuevo como para un relleno sanitario existente, con el objetivo del aprovechamiento del biogás se describen a continuación.

FASE PRELIMINAR: DISEÑO Y PLANIFICACIÓN

1. Estudio de Viabilidad Técnica

- ✓ Análisis de la tasa de generación de residuos (> 100 ton/día como referencia mínima rentable).

- ✓ Estimación del potencial de metano (según contenido orgánico).

- ✓ Evaluación del régimen pluviométrico y tipo de suelo.

- ✓ Estudio de vientos dominantes (para prever dispersión de gases).

2. Elaboración del Diseño Técnico

- ✓ Diseño del sistema de pozos (verticales u horizontales).

- ✓ Distribución de tuberías de captación y succión.

- ✓ Selección de ubicación de estación de aprovechamiento y generador.

- ✓ Cumplimiento con la Guía Técnica para Rellenos Sanitarios del MINAE (2011) y Decreto 38914-S-MINAE.

FASE DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN

El sistema de recolección se compone de distintos elementos constructivos diseñados para maximizar la recuperación del biogás y garantizar la estabilidad ambiental del relleno. El volumen de biogás generado determina la vía de aprovechamiento por elegir, entre las más eficaces se encuentra la generación de energía eléctrica. Los porcentajes varían en función de la composición del residuo, la edad del relleno y temperaturas ambientales o precipitaciones.

Según Tchobanoglous et al. (2002), en condiciones óptimas (temperaturas de 30–37 °C, humedad > 40%), el contenido de metano en el biogás puede alcanzar hasta un 60%, generándose entre 100–200 m³ de gas por tonelada de residuo orgánico dispuesto.

3. Preparación del Terreno y Subbase

- ✓ Excavación y nivelación de la celda.
- ✓ Colocación de una subbase compactada (mín. 90% proctor modificado).
- ✓ Instalación de geomembrana de HDPE de 1.5 mm, termosoldada en sitio.

Se emplea para prevenir la filtración de lixiviados hacia el subsuelo. Debe ser instalada sobre una subbase compactada y ser sometida a pruebas de hermeticidad por ultrasonido y vacío (SCS Engineers, 2020).

- ✓ Pruebas de vacío y chispa para verificar integridad de las uniones.
- ✓ Colocación de capa drenante (grava o piedra bola de 2”-4”) sobre la membrana. Facilita la recolección de lixiviados y sirve como protección mecánica de la membrana.

- ✓ Instalación de tuberías de drenaje de lixiviados (PVC o HDPE perforado, DN 150–200 mm). Red de tuberías perforadas de alta densidad (PVC SDR 17), que canalizan el líquido percolado hacia sistemas de tratamiento o tanques de almacenamiento.

4. Colocación de Residuos y Compactación

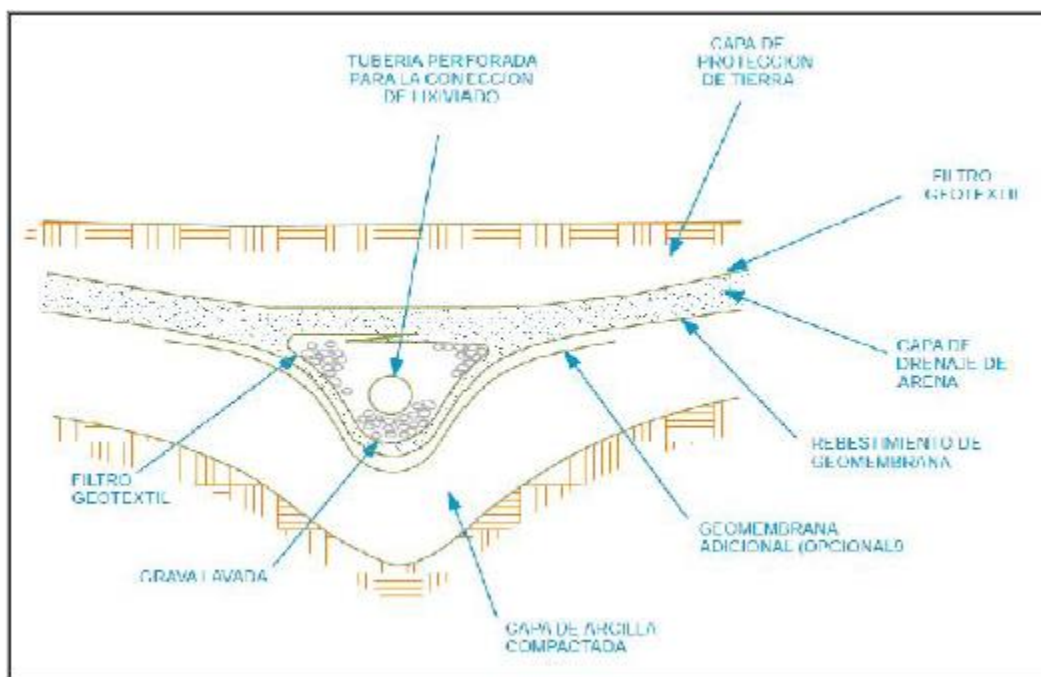
- ✓ Disposición de residuos en capas de 1.5 m máximo.
- ✓ Compactación con equipo pesado (compactador de bota o rodillo liso).
- ✓ Monitoreo de humedad (> 35%) para asegurar actividad metanogénica.
- ✓ Cierre temporal con cobertura intermedia (arcilla compactada o tierra).
- ✓ Residuos sólidos son dispuestos por capas de 1.5–2.5 m de espesor y compactados al 80–85% del proctor estándar.
- ✓ Los lixiviados de rellenos sanitarios se producen por la disolución de uno o más compuestos de los residuos sólidos urbanos, en contacto con un disolvente líquido (agua) o por la propia dinámica de descomposición de los residuos. Este lixiviado contiene una gran cantidad de sólidos en suspensión y materia orgánica altamente contaminante.
- ✓ En un relleno sanitario, se obtiene en promedio que por una tonelada de residuos sólidos se generan 88.98 kg de lixiviado. Considerando un 20% adicional por el drenaje de humedad y lluvias, entonces se tiene una cantidad de lixiviados aproximada de 106.77 kg por tonelada de residuos sólidos.
- ✓ El sistema de colección de lixiviado se conforma de tuberías en la base del relleno sanitario, donde se coloca una serie de tuberías perforadas de recolección de

lixiviado, directamente sobre la geomembrana. Comúnmente, las tuberías para la recolección de lixiviado son perforadas y tienen un diámetro de 4" PVC.

✓ El espacio entre las tuberías para la colección de lixiviado es de 10 a 20 m y ellas están cuidadosamente cubiertas con una capa de arena (capa de drenaje). El espacio entre las tuberías determina la profundidad del lixiviado que se permitirá acumular en la base del relleno sanitario. En general, la capa de drenaje tiene 60 cm de espesor y se coloca en las tuberías antes que cualquier residuo sólido sea dispuesto en el sitio. Se puede colocar geotextil de filtro sobre la capa de drenaje para evitar obstrucciones. Generalmente, la primera capa de residuos sólidos (cerca de 1 m de espesor) colocada sobre la capa de drenaje no se compacta. La base de relleno sanitario se inclina entre 1% y 2% para promover el flujo del lixiviado hacia los puntos de recolección. Las tuberías para la colección de lixiviado deben estar instaladas de manera tal que sean drenadas por gravedad.

✓ Este método también permite el uso de tuberías para la colección de lixiviados, así como para eliminar el agua proveniente de las lluvias o aguas pluviales, esto en la porción de relleno sanitario que no recibe residuos sólidos. En esta forma, las tuberías para la recolección de lixiviado están conectadas directamente a las tuberías para la recolección del agua proveniente de las lluvias, la cual se canalizará a la PTA.

Ilustración 11: Detalle de tubería para recolección de lixiviado



Fuente: Ministerio del Ambiente, 2010.

✓ El lixiviado se drena con las pendientes antes indicadas o se bombea directamente a la PTA para su tratamiento. Los requisitos de almacenamiento dependen del tamaño del relleno sanitario, de la cantidad de lixiviado generado y del tratamiento final o de la opción de disposición final para el lixiviado.

✓ Se mantienen niveles óptimos de humedad mediante recirculación controlada de lixiviados.

✓ El contenido orgánico debe superar el 35% para asegurar una producción significativa de metano.

5. Instalación de Pozos de Captación Vertical

- ✓ Perforación vertical mediante entibados o entubados a profundidad de 8–12 m.
- ✓ Colocación de tubería perforada de HDPE (6" a 8"), envolviendo con grava lavada.
- ✓ Relleno lateral y compactado con material granular no cohesivo.
- ✓ Instalación de válvula de purga y cabezal de extracción en la superficie.
- ✓ Pozos de biogás: Tuberías verticales de HDPE de 6" a 8" con perforaciones en su tercio inferior. Estas se instalan cada 15–25 metros en retícula.
- ✓ Material envolvente: Los pozos se rodean de grava o piedra para permitir el paso del gas.
- ✓ Cabezal de extracción: Incluye válvulas de cierre, medidores de flujo y presión, y conexión a la red horizontal de transporte.

6. Red Horizontal de Conducción de Biogás

- ✓ Tuberías HDPE (4"–8") conectando los pozos con la línea principal.
- ✓ Colocación en zanjas de 60 cm profundidad con pendiente $\geq 2\%$.
- ✓ Instalación de trampas de condensado (cada 50–60 m).
- ✓ Verificación de hermeticidad (ensayos de presión con nitrógeno o aire).

- ✓ Tubería externa de biogás: De HDPE o acero galvanizado, aislada térmicamente si supera los 50 metros de longitud.

- ✓ Pendiente mínima: 1–2% para evitar acumulación de condensados en los tramos horizontales.

- ✓ Trampas de condensado: Instaladas a intervalos regulares para evitar daños por agua acumulada.

- ✓ Realizar monitoreo continuo de presión, temperatura y humedad del gas.

- ✓ Mantenimiento anual con cámaras de inspección y lavado por presión.

- ✓ Para evitar la condensación en tuberías instalar trampas de condensado cada 50 m lineales.

7. Línea Principal y Trampa de Condensado

- ✓ Tubería de conducción principal hasta la estación de aprovechamiento.

- ✓ Aislamiento térmico si el tramo es > 100 m o en zonas frías.

- ✓ Instalación de válvulas de corte, medidores de flujo y sensores de presión.

FASE DE TRATAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS

Proceso y transformación del biogás en energía (planta de generación)

La planta de tratamiento y aprovechamiento del biogás cumple funciones clave para transformar este subproducto en una fuente útil de energía.

La mayoría de los proyectos en operación utilizan motores de combustión interna (reciprocantes o calderas, como se les conoce en nuestro país), turbinas y microturbinas.

Estas últimas se aplican en rellenos sanitarios pequeños o aplicaciones en nichos para desechos en menores cantidades aplicables, por ejemplo, en fincas ganaderas.

Por lo tanto, se puede llevar a cabo un cálculo de emisiones en sitios de disposición en forma individual y realizar una predicción de la generación de biogás durante la vida útil del relleno sanitario utilizando datos de entrada específicos, donde se puede establecer el aporte ambiental en un proyecto de esta categoría.

$$T = CO_{2eq} = \%V_{CH_4} * 21 * QBG * PCH_4$$

Donde:

T CO_{2eq} = Toneladas totales generadas de CO₂ equivalente.

%V CH₄ = Porcentaje del volumen estimado de metano en el biogás.

QBG= Cantidad total de biogás estimado [Ton/año].

ρCH₄= Densidad del metano = 0.0007168 [Ton/m³ CH₄].

Es de notar que con la aplicación del modelo planteado se obtiene un valor estimado de la generación de metano, pero ese resultado no implica que sea el total de metano que puede ser captado, ya que depende de la eficiencia del sistema de recuperación en el momento de la recolección y extracción del biogás. Los valores típicos de eficiencia de los sistemas de recuperación de biogás se encuentran entre el 50% y 80%.

Los motores reciprocantes de combustión interna son los más utilizados ya que presentan alta eficiencia en comparación con las turbinas de gas y microturbinas (LMOP, 2015). Son de bajo costo por kW en comparación con las turbinas de gas y microturbinas, y existen en varios tamaños adecuados a los flujos de biogás. La eficiencia de estos motores varía entre 25 y 35%, aunque se pueden alcanzar mayores rendimientos en aplicaciones de cogeneración, cuando se recupera el calor residual que puede ser utilizado para otras aplicaciones.

También presenta la ventaja de permitir añadir o quitar los motores según las tendencias de recuperación de gas. Como desventajas se encuentran sus costos de mantenimiento -que son relativamente altos- y la generación de emisiones a la atmósfera. Si los costos de electricidad del mercado son bajos, la rentabilidad de estos equipos resulta marginal. El rango de tamaño para proyectos típicos, asumiendo 50% de captación del metano en el relleno sanitario, es de entre 8 y 30 m³/min de biogás, y capacidades entre 800 kW y 3 MW; es importante analizar que para proyectos de mayor escala se pueden combinar varios motores y así tener mayores capacidades de generación eléctrica.

Ilustración 12: GE Jenbacher Type 2 Gas Engine



Fuente: <https://powergen.gepower.com/products/reciprocating-engines/jenbacher-type-2.html>

8. Instalación de Estación de Captación y Tratamiento

- ✓ Todos los pozos y redes confluyen en una estación central de succión, equipada con un sistema de vacío (*blower*) que mantiene presión negativa dentro del sistema.
- ✓ Se monitorean caudales, temperaturas, composición del gas y puntos de fuga.
- ✓ Construcción de cuarto de máquinas con drenaje de piso y ventilación natural, abierta.
- ✓ Instalación de *blower* o bomba de vacío (presión negativa: -5 a -10 cm H₂O).
- ✓ Colocación de biofiltro o torre de lavado (para remover H₂S).

- ✓ Sistema de deshumidificación mediante enfriador y carbón activado.
- ✓ Almacenamiento del gas en tanqueta de hierro.

9. Filtración Biológica

- ✓ El biogás pasa por biofiltros formados por capas de compost, carbón activado y astillas vegetales.
- ✓ Se eliminan compuestos corrosivos como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y siloxanos.

10. Deshumidificación

- ✓ El gas se enfría mediante intercambiadores o sistemas de refrigeración forzada.
- ✓ Se emplean trampas de condensado y secadores desecantes si la humedad relativa supera el 60%.

11. Generación de Energía

El biogás limpio alimenta motores generadores (capacidad entre 100–1000 kW). Para evitar la corrosión de equipos generadores es importante utilizar sistemas de desulfuración y filtración avanzados como los propuestos en los puntos anteriores.

12. Sistema de Generación Eléctrica o Térmica

- ✓ Instalación de generador de biogás (motor de combustión interna o microturbina).

- ✓ Conexión a red eléctrica local (CNFL, ICE o uso interno).
- ✓ Paneles de control y protecciones térmicas/acústicas.
- ✓ Registro ante SETENA y ARESEP si hay inyección a red pública.

FASE OPERATIVA Y MANTENIMIENTO

13. Puesta en Marcha y Monitoreo

- ✓ Pruebas de encendido y extracción.
- ✓ Calibración de sensores de flujo, temperatura y CH₄/CO₂.
- ✓ Control de emisiones fugitivas con cámara infrarroja.

14. Mantenimiento y Evaluación

- ✓ Inspección semanal de válvulas, trampas y sistemas eléctricos.
- ✓ Limpieza de biofiltros cada 6 meses.
- ✓ Reposición de grava en pozos cuando sea necesario.
- ✓ Informes semestrales de eficiencia, conforme a normativa MINAE–

SETENA.

Ejemplo de aplicación en la generación de energía con biogás: Se tomará como ejemplo un relleno sanitario activo en Costa Rica, como podría ser el de La Carpio (San José) o Santa Cruz (Guanacaste).

Parámetros asumidos:

Tabla 2: Parámetros

Parámetro	Valor asumido / Justificación
Área del relleno (superficie útil)	100.000 m ² (10 hectáreas)
Profundidad media del residuo	15 m
Densidad compactada de residuos	650 kg/m ³ (valor típico compactado, según Tchobanoglous et al., 2002)
% materia orgánica promedio	50% (basado en residuos domésticos costarricenses, según MINAE, 2022)
Producción de metano (CH ₄)	100 m ³ de CH ₄ por tonelada de residuos (valor conservador con materia orgánica significativa)
Poder calorífico inferior del metano (PCI)	35.8 MJ/m ³ (o 9.94 kWh/m ³)
Eficiencia del generador eléctrico	35% (motores de biogás estándar, según EPA, 2018)
Consumo eléctrico hogar promedio Costa Rica	250 kWh/mes (datos de ARESEP 2022)

Fuente: Elaboración Propia, 2025

Cálculo de Volumen y Masa de Residuos

1) Volumen total de residuos

$$V = \text{Área} \times \text{Altura}$$

$$V = 100.000\text{m}^2 \times 15\text{m} = 1.500.000 \text{ m}^3$$

2) Masa total de residuos

$$M = V \times \text{Densidad}$$

$$M = 1.500.000 \text{ m}^3 \times 650 \text{ Kg/m}^3 = 975.000.000 \text{ Kg}$$

$$M = 975.000.000 \text{ Kg} / 1000 \text{ Kg/T} = 975.000 \text{ ton}$$

Producción Total de Metano Estimada

$$\text{CH}_4 = M \times \text{Producción específica}$$

$$\text{CH}_4 = 975.000 \text{ ton} \times 100 \text{ m}^3/\text{ton}$$

$$\text{CH}_4 = 97.500.000 \text{ m}^3 \text{ de metano}$$

Energía Bruta Potencial

$$E = \text{CH}_4 \times \text{PCI}$$

$$\text{Energía Térmica} = 97.500.000 \text{ m}^3 \times 9.94 \text{ kWh/m}^3$$

$$\text{Energía Térmica} = 969.150.000 \text{ kWh}$$

Energía Bruta Potencial

$$E_{\text{útil}} = E \times \eta$$

$$\text{Energía Eléctrica Útil} = 969.150.000 \text{ kWh} \times 0.35$$

$$\text{Energía Eléctrica Útil} = 339.202.500 \text{ kWh}$$

Número de hogares beneficiados

$$N = \frac{E_{\text{útil}}}{\text{Consumo anual por hogar}}$$

$$\text{Consumo anual por hogar} = 250 \text{ kWh/mes} \times 12$$

$$\text{Consumo anual por hogar} = 3,000 \text{ kWh/año}$$

$$\text{Hogares beneficiados} = \frac{339.202.500 \text{ kWh}}{3000 \text{ kWh}} = 113,067 \text{ hogares}$$

Con el cálculo anterior, estimando un panorama óptimo se puede observar la magnitud del impacto positivo que se puede producir con una fuente de energía limpia como el biogás y la gran cantidad de personas beneficiadas en el país si se logra implementar y concientizar al gobierno para que obtenga el financiamiento para este tipo de proyectos con empresas que estén certificadas en el tratamiento adecuado de los desechos sólidos.

Resumen de Resultados

Tabla 3: Resultados

Indicador	Resultado aproximado
Superficie del relleno	100.000 m ²
Toneladas de residuos acumuladas	975.000 toneladas
Producción total de metano	97.5 millones de m ³
Energía eléctrica generada	339 millones de kWh
Hogares beneficiados (por año)	≈ 113.000 hogares costarricenses

Fuente: Elaboración Propia, 2025

Consideraciones y Ajustes Realistas

- a. Si el sistema de captura tiene una eficiencia del 75%, se beneficiarían unos 85.000 hogares (aún un número significativo).
- b. El aprovechamiento puede escalonarse anualmente si el relleno sigue creciendo.

c. Si el gas se utiliza para calefacción de procesos industriales (como secado de café o biocombustibles), el impacto puede cambiar de tipo, pero sigue siendo alto.

Además, ante los cálculos mostrados la energía producida también puede utilizarse en:

- Autoconsumo del propio relleno (bombas, luminarias, etc.).
- Inyección a la red eléctrica pública (en Costa Rica: CNFL, ICE, etc.)

como se vio en el ejemplo antes descrito.

- Calefacción de procesos industriales o digestores.
- Según la EPA (2018), por cada 1000 m³ de biogás se pueden generar aproximadamente 1.8 MWh de electricidad, dependiendo del contenido de metano y el tipo de motor empleado.

Instalar un sistema de aprovechamiento de gas metano en un botadero grande o relleno sanitario en Costa Rica podría cubrir el consumo energético de más de 100.000 hogares al año. Este dato demuestra el altísimo valor energético de los residuos mal gestionados y destaca la urgencia de cerrar los botaderos a cielo abierto en favor de soluciones integradas, ambientalmente responsables y con beneficio económico-social.

Tabla 4: Escenarios de aprovechamiento de gas metano en rellenos sanitarios en Costa Rica

Escenario	Área (m ²)	Altura (m)	Toneladas de residuos	CH ₄ generado (m ³)	Energía útil (kWh)	Hogares beneficiados/año
 Pequeño	25.000	10	162.500	16.25 millones	56.6 millones	18.875 hogares
 Mediano	50.000	12	390.000	39.0 millones	135.6 millones	45.200 hogares
 Grande	100.000	15	975.000	97.5 millones	339.2 millones	113.067 hogares
 Mega sitio	150.000	20	1.950.000	195 millones	678.5 millones	226.167 hogares

Fuente: Elaboración Propia, 2025

Supuestos técnicos basados en la Tabla 4 para todos los escenarios:

Densidad de residuos compactados: 650 kg/m³

CH₄ producido por tonelada: 100 m³/ton

Poder calorífico del CH₄: 9.94 kWh/m³

Eficiencia de generación eléctrica: 35%

Consumo eléctrico anual por hogar: 3000 kWh

Interpretación de la Tabla 4

Un relleno  pequeño (como los municipales de zonas rurales) podría abastecer energía a casi 19.000 hogares por año, lo que es suficiente para una comunidad pequeña completa.

Un relleno  mediano, como el de Santa Cruz o Grecia, puede beneficiar a más de 45.000 hogares, o una ciudad intermedia.

Un relleno  grande, como La Carpio o Río Azul (en operación o clausura), tendría potencial de dar energía a más de 113.000 hogares, equivalente a toda la población de Desamparados o Cartago centro.

Un  mega sitio regional, proyectado a futuro o como consolidación de varios sitios, tendría capacidad de beneficiar a más de 225.000 hogares, lo cual, para ponerlo en contexto de su magnitud de impacto, representaría una provincia completa como Guanacaste.

Según los escenarios planteados (pequeño, mediano, grande y mega sitio), la selección del tipo de generador para el aprovechamiento del gas metano debe ajustarse según estas condiciones a:

- El volumen de biogás disponible.
- El caudal diario estimado de CH₄.
- La eficiencia energética esperada.
- Los requerimientos operativos y de mantenimiento.
- Las condiciones técnicas del entorno costarricense.

Con base en la investigación realizada, se detallan los tipos de generadores más adecuados para cada escenario, basados en especificaciones técnicas reales y literatura aplicada (EPA, 2018; SCS Engineers, 2020; Wärtsilä, Jenbacher y Capstone Turbine Corporation).

Tabla 5: Detalles técnico de generadores según escenarios de captación de biogás

Escenario	CH ₄ estimado (m ³ /día)	Potencia requerida (kW)	Tipo de Generador Recomendado	Marca/Tecnología típica	Eficiencia eléctrica (%)	Observaciones técnicas
 Pequeño	~45.000	600–800 kW	Motor de combustión interna (ICE)	Jenbacher J208 / Wärtsilä 3V	33–38%	Compacto, bajo mantenimiento, ideal para sitios rurales.
 Mediano	~107.000	1.5–2.5 MW	Motor de combustión interna (modular)	Jenbacher J320 / Caterpillar CG170	36–40%	La modularidad facilita ampliaciones. Permite cogeneración térmica.
 Grande	~268.000	5.0–7.0 MW	Motores sincronizados a red o microturbinas múltiples	Wärtsilä 34SG / Capstone C1000x	35–41%	Requiere subestación, mayor infraestructura de control.

●	~537.000	10–14	Turbinas a gas Siemens SGT-300, 38–45%	Compatible con
Megasitio		MW	de ciclo abierto GE Jenbacher J920	inyección a red
			o motores	nacional. Viable
			multicilíndricos	integración con
			en banco	calderas
				industriales.

Fuente: Elaboración Propia, 2025

Cálculo para la estimación de la Tabla 5

Producción diaria de CH₄= Estimado con base el escenario (total de CH₄ generado dividido entre 20 años de operación y días al año).

Potencia eléctrica requerida

$$\text{Potencia} = \frac{\text{Volumen CH}_4 \text{ diario} \times 9.94 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \times \text{Eficiencia}}{24}$$

Tipo de generador

- 1) Para ≤ 1 MW: Motores reciprocantes (de combustión interna) son más económicos y fáciles de operar.
- 2) Para ≥ 2 MW: Sistemas modulares permiten escalabilidad.
- 3) Para > 10 MW: Turbinas a gas o bancos de motores sincronizados a subestación eléctrica.

Recomendaciones técnicas adicionales por escenario

- Escenario pequeño (gobiernos rurales)

- a) Grupo electrógeno preensamblado, con *skid* de montaje.
- b) Sistema de refrigeración por aire o intercambiador de placas.
- c) Automatización básica (controlador local).

 Escenario mediano (municipalidades por cantón)

- a) Módulos de 500 kW a 1 MW, en operación alterna.
- b) Sistema SCADA para monitoreo remoto.
- c) Posibilidad de cogeneración de vapor o agua caliente.

 Escenario grande (provincia donde se encuentra la capital y la mayoría de empresas)

- a) Central generadora con hasta 4 unidades de 1.5 MW.
- b) Subestación de 34.5 kV y bancos de capacitores.
- c) Integración con sistema de energía distribuida.

 Escenario mega sitio (consorcio entre provincias con gran cantidad de zonas francas)

- a) Uso de turbinas a gas con ciclo combinado (CHP).
- b) Sincronización con red nacional del ICE.
- c) Centro de control digital (con respaldo UPS y redundancia).

Efectos de la implementación del sistema de aprovechamiento del gas metano

¿Cuánto ayudaría aplicar un sistema de esta magnitud en Costa Rica?

1. Reducción de gases de efecto invernadero (GEI)

El metano (CH_4) tiene un potencial de calentamiento global 28 a 36 veces superior al CO_2 en un horizonte de 100 años (IPCC, 2013). Los rellenos sanitarios sin sistema de captación permiten que este gas escape libremente a la atmósfera, esto tiene severas repercusiones en el ambiente, por lo cual el impacto estimado en Costa Rica se puede describir de la siguiente manera:

Según datos del Inventario Nacional de GEI del MINAE (2022), los residuos sólidos municipales representan aproximadamente el 7,2% del total de emisiones nacionales, con el metano como el principal gas emitido.

Se estima que un relleno promedio de 500 toneladas/día puede generar entre 3500 y 7000 toneladas de metano al año. Captar el 70–90% de ese metano permitiría reducir de unas 95.000 a 180.000 toneladas de CO_2 equivalente por año, solo en un sitio de tamaño medio.

Eso equivale a eliminar las emisiones anuales de más de 35.000 vehículos particulares (EPA, 2020).

También el aprovechamiento del biogás en rellenos sanitarios ofrece beneficios significativos:

- Reducción de emisiones: El metano tiene un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el CO_2 .

- Mejora de calidad del aire: Disminución de olores, riesgos de incendio y explosiones.
- Cumplimiento regulatorio: En Costa Rica, el Decreto Ejecutivo n.º 38914-S-MINAE establece directrices sobre emisiones de rellenos sanitarios.
- Generación de empleo local: Diseño, operación y mantenimiento del sistema involucra mano de obra calificada.

2. Eliminación de riesgos ambientales y sanitarios

La implementación de un sistema técnico de captación reduce directamente:

- ❖ Riesgos de incendios subterráneos (por acumulación de metano).
- ❖ Emisiones de gases nocivos como compuestos orgánicos volátiles (COV), amoníaco y sulfuro de hidrógeno (H_2S), responsables de enfermedades respiratorias.
- ❖ Proliferación de vectores y malos olores, mejorando la calidad de vida de las comunidades cercanas (ej. zonas aledañas a Río Azul o Santa Cruz).

3. Sustitución energética y generación de energía verde

El metano captado puede utilizarse para generar electricidad o calor industrial, lo cual provoca que se disminuya considerablemente el consumo de combustibles fósiles, los cuales tienen un gran impacto ambiental por la cantidad de emisiones que generan al quemarse.

Además, permite la autonomía energética del relleno sanitario (bombas, maquinaria, oficinas) todo lo que el relleno sanitario pueda aprovechar con la energía generada será un ahorro en los costos fijos de funcionamiento de la empresa.

Todavía aún más importante, permite inyectar electricidad limpia a la red nacional (según normativa del ICE y CNFL), lo cual beneficia a miles de hogares costarricenses disminuyendo el costo que se paga actualmente por los usuarios, el cual ya es considerablemente elevado.

Prueba de lo anterior y considerado un pequeño ejemplo de lo que se puede lograr en nuestro país, aunque de menor escala, fue el proyecto de captación de biogás en el antiguo relleno de Río Azul (Desamparados), gestionado por el Ministerio de Salud y financiado con cooperación internacional, que permitió generar energía durante varios años mediante microturbinas (MINAE, 2017).

4. Cumplimiento de objetivos internacionales y nacionales

Implementar este tipo de sistema permitiría a Costa Rica cumplir con compromisos como el firmado con la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) al Acuerdo de París.

También se podría lograr la meta de descarbonización total al 2050, donde se prioriza el cierre técnico de sitios a cielo abierto y el aprovechamiento energético de residuos. Además del cumplimiento de la Ley de Gestión Integral de Residuos n.º 8839 y su reglamento. La Estrategia Nacional de Bioeconomía (2020) y la Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible respaldan este tipo de soluciones tecnológicas que transforman residuos en energía.

En vista de lo anterior, se realiza una comparación de escenarios con y sin captación del gas metano.

Tabla 6: Comparación de escenarios

Indicador	Sin Captación (Cielo Abierto)	Con Sistema de Captación
Emisiones de CH ₄	Altas (fugas constantes)	Reducción del 70–90% del CH ₄ generado
Riesgo de explosiones/incendios	Alto	Muy bajo
Emisiones de olores y contaminantes	Altas	Controladas
Valor energético del biogás	Desperdiciado	Aprovechado como electricidad o calor
Cumplimiento normativo y ambiental	Nulo o parcial	Completo
Imagen institucional / Responsabilidad ESG	Negativa	Muy positiva

Fuente: Elaboración Propia, 2025

Evaluación de los costos de producción de energía eléctrica a partir de biogás

Se analizan los costos involucrados, tanto de inversión como de operación y mantenimiento, para un escenario medio y un escenario alto, analizados anteriormente. Se calcula también para cada escenario el costo de producción a valor presente de la energía eléctrica por generar.

Para los dos escenarios se asume:

- Una vida útil del proyecto de 20 años, más un año para la instalación y puesta en marcha.
- Una tasa de descuento anual del 10%.

- Se consideran las inversiones vinculadas a la planta de captura de biogás.

Costos de inversión

Los costos de inversión considerados fueron el costo de los moto-generadores (combustión interna), el sistema de recolección y tratamiento de biogás mediante tanque de carbón activado, y la conexión a la red eléctrica, considerando un tendido de 1.8 km y una estación transformadora de 380 V a 13.2 kV. Se consideraron también los costos de ingeniería y de mano de obra.

Costos de mano de obra fijos

Se consideraron el costo de dos técnicos dedicados a tiempo completo a la operación y mantenimiento del sistema de generación.

Costos mano de obra variables

Se consideraron el costo del mantenimiento de los moto-generadores (cambios de aceite, filtros, etc.), el costo de mantenimiento de la instalación eléctrica y conexión a la red (5% del costo inicial de la instalación) y el costo de reemplazo del carbón activado.

Amortización de equipos

Se consideraron la amortización lineal de los moto-generadores para una vida útil de 20 años. La Tabla 7 detalla los costos de inversión, mano de obra y el costo de producción de energía eléctrica para los dos escenarios considerados. Todos los costos han sido actualizados a valor presente según la tasa de descuento utilizada.

Tabla 7: Evaluación económica Fuente: Elaboración Propia, 2025

DESGLOSE DE COSTOS DE INVERSIÓN						
Tipo de Costo	Descripción de Actividad o Equipo	Costo Unitario	Unidad	Costo Total		
Costos de Inversión	Servicios de Ingeniería y Diseño	₡14 400 000	glb	₡14 400 000		
	Generador de Combustión Interna	₡353 500	₡ x Kw de generación	₡106 050 000		
	Sistema de Recolección y Tratamiento de Biogás	₡453 175 200	glb	₡453 175 200		
	Conexión a la Red Eléctrica	₡65 975 800	glb	₡65 975 800		
TOTAL DE COSTOS DE INVERSIÓN				₡ 639 601 000		
PROYECCIÓN DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA						
Escenario	Área del Relleno (m²)	Altura (m)	Toneladas de residuos	CH₄ generado (m³)	Energía Útil (kWh)	Hogares beneficiados/año
Pequeño	25,000	10	162,500	16.25 millones	56.6 millones	18.875 hogares
PROYECCIÓN VENTA DE ENERGÍA PRODUCIDA						
Energía Útil (kWh)	Costo Energía (kWh)	Total de kWh vendidos por año				
56600000	₡73	₡4 131 800 000				
56600000	\$0.15	\$8 181 782				

4 CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo tiene como finalidad presentar y analizar los resultados obtenidos a partir de la simulación y evaluación técnica del potencial de captación y aprovechamiento del gas metano (CH_4) en rellenos sanitarios de diferentes escalas en Costa Rica. Esta evaluación incluye aspectos energéticos, ambientales, tecnológicos y socioeconómicos, contextualizados en el marco de la gestión integral de residuos sólidos y las políticas nacionales de descarbonización.

Se diseñaron cuatro escenarios representativos (pequeño, mediano, grande y megasitio), con variaciones en el área disponible, profundidad del relleno y volumen total de residuos, a fin de comprender la magnitud del impacto que podría generarse a nivel nacional si se implementaran tecnologías de recuperación de biogás para generación eléctrica.

4.1 Resultados energéticos y técnicos

De acuerdo con los cálculos realizados, el potencial energético derivado del aprovechamiento del CH_4 generado por residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios es considerablemente alto. Por ejemplo, en un escenario “grande” (100.000 m^2 de área y 15 metros de profundidad), se estima una masa de residuos de aproximadamente 975.000 toneladas, lo que puede generar alrededor de 97.5 millones de metros cúbicos de metano.

Dado que el poder calorífico inferior del CH_4 es de 9.94 kWh/ m^3 , y considerando una eficiencia de conversión eléctrica del 35 %, se obtendría una energía útil cercana a los 339 millones de kilovatios hora (kWh). Esta cantidad de energía sería capaz de abastecer las necesidades anuales de aproximadamente 113.000 hogares costarricenses, tomando como base un consumo promedio de 3,000 kWh/año por vivienda (ARESEP, 2022).

En vista de lo anterior, se puede afirmar que se cuenta con los sitios de disposición de ese tamaño actualmente en el país, por lo cual se tendría la proyección del beneficio que significaría si se implementa dicho sistema.

Incluso en un escenario pequeño (25.000 m² y 10 m de altura), la energía generada podría beneficiar a cerca de 18.800 hogares, evidenciando que estas soluciones pueden aplicarse tanto a nivel regional como local, con altos niveles de eficiencia y viabilidad.

4.2 Impacto ambiental estimado

Desde el punto de vista ambiental, la captación y aprovechamiento del biogás representa una de las medidas más efectivas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el sector de residuos sólidos. El metano es un gas con un potencial de calentamiento global 28 veces superior al dióxido de carbono (CO₂) en un horizonte de 100 años (IPCC, 2013), por lo que su liberación no controlada representa una amenaza considerable.

Se estima que, en un relleno sanitario de tipo mediano, la captura efectiva del CH₄ podría evitar la emisión de entre 120.000 y 180.000 toneladas de CO₂ equivalente anualmente. Esta cifra equivale a las emisiones anuales promedio de más de 35.000 vehículos particulares, según factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, 2018). Además, se reducirían los riesgos de incendios espontáneos, olores molestos y lixiviados contaminantes, mejorando las condiciones ambientales y sanitarias de las comunidades colindantes.

4.3 Viabilidad tecnológica y operativa

En función de la escala de los escenarios, se evaluaron las tecnologías generadoras más apropiadas. Para instalaciones menores a 1 MW de capacidad, se recomiendan motores de

combustión interna con sistemas de enfriamiento por aire, de fácil mantenimiento y operación. Estos son ideales para comunidades rurales o sitios con recursos técnicos limitados.

Para escenarios medianos y grandes (hasta 7 MW), la opción más viable son motores modulares sincronizados a la red o sistemas de cogeneración (CHP), los cuales pueden proporcionar simultáneamente electricidad y calor, optimizando el uso del biogás. En el caso de mega sitios (>10 MW), la opción más robusta es el uso de turbinas a gas de ciclo abierto o combinado, con eficiencia superior al 40% y capacidad de integración con subestaciones y redes nacionales.

Estas tecnologías presentan altos niveles de confiabilidad y una vida útil estimada de entre 15 y 20 años, con mantenimientos preventivos y predictivos documentados.

4.4 Consideraciones socioeconómicas

Desde la perspectiva económica y social, la implementación de sistemas de aprovechamiento del biogás implica una revalorización de los residuos y la transformación de pasivos ambientales en activos energéticos. A nivel municipal o regional, se reduce la dependencia de fuentes externas de energía, se generan empleos directos e indirectos en áreas como operación, mantenimiento, monitoreo y gestión administrativa, y se mejora la percepción pública sobre la gestión de residuos.

Además, al incluir mecanismos de participación comunitaria y alianzas público-privadas, es posible financiar la infraestructura requerida y desarrollar proyectos escalables que beneficien tanto a gobiernos locales como a poblaciones vulnerables.

4.5 Síntesis

Los resultados obtenidos permiten analizar que la captación y valorización energética del gas metano en rellenos sanitarios es una estrategia integral, viable y alineada con los principios de sostenibilidad. Desde el punto de vista técnico, los volúmenes de CH₄ generados por los residuos sólidos urbanos son suficientes para justificar la inversión en sistemas de generación energética.

A nivel ambiental, esta práctica contribuye directamente con las metas de reducción de GEI del país, mientras que, en el plano social, genera empleo, promueve la inclusión energética y mejora las condiciones de vida de las comunidades cercanas.

En este sentido, se recomienda promover políticas públicas que incentiven la recuperación energética de residuos, fortalecer la capacidad técnica de las municipalidades y fomentar la innovación en tecnologías limpias para la transición energética de Costa Rica.

5 CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación, se detallan las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas en el desarrollo del presente estudio.

5.1 Conclusiones

Los rellenos sanitarios son imprescindibles para el tratamiento actual de las miles de toneladas de desechos sólidos que se producen en el país; sin embargo, el sitio final para su creación por lo general presenta varias limitantes desde el punto de vista ambiental, lo cual afecta directamente la viabilidad de los proyectos.

Este tipo de actividades se caracterizan por ser de alto impacto, razón por la cual, en la medida de lo posible, se instalan en terrenos con vegetación que no tenga algún estatus de protección importante, con vulnerabilidad baja a la contaminación, con una profundidad considerable del nivel freático, con bajo riesgo de amenazas naturales y lejos de poblaciones, actividades comerciales y turísticas.

De igual manera es de suma importancia entender que aunque los rellenos sanitarios existan y sean una opción, nuestra consciencia debe jugar un papel muy importante y primordial en la disposición de los desechos, por medio de técnicas como la reducción, la reutilización, el reciclaje, el rechazo, la recuperación (5 erres) y el compostaje, las cuales, mediante una debida administración del Estado, avanzan hacia una sociedad con un desarrollo equilibrado y sostenible, además de una economía circular, dándonos cuenta de que la mayor parte de los desechos, pueden ser previamente tratados antes de llegar a estos sitios antes mencionados.

Además, es necesario considerar la legislación ambiental en cuanto a retiros por nacientes, quebradas, ríos, arroyos, lagos, embalses naturales o artificiales, áreas de recarga y acuíferos de manantiales establecidos por art. 33 de la Ley Forestal n.º 7575; Manual de Instrumentos Técnicos para el Proceso de Evaluación de Impacto Ambiental, Decreto n.º 32966-MINAE; Reglamento General sobre los Procedimientos de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), Decreto n.º 31849-MINAE-S-MOPT-MAG-MEIC; Reglamento sobre condiciones de operación y control de emisiones de instalaciones para residuos sólidos ordinarios, Decreto n.º 39136-S-MINAE; Reglamento sobre Rellenos Sanitarios, Decreto n.º 27378-MINAE.

La implementación de sistemas de captación de gas metano en rellenos sanitarios no solo representa una solución ambientalmente responsable, sino también una herramienta estratégica para la mitigación del cambio climático, el desarrollo energético local y el cumplimiento de las políticas públicas de sostenibilidad en Costa Rica, ya que la gestión y aprovechamiento del metano se alinea con los ODS estipulados en la agenda 2030 como lo son el objetivo #7 y el objetivo #13, los cuales representan una estrategia prometedora para la mitigación del cambio climático debido a que Costa Rica, al ser un país con compromisos firmes en la reducción de emisiones y la transición hacia una economía baja en carbono, puede beneficiarse significativamente de esta iniciativa.

En vista de lo anterior, se debe recalcar que el aprovechamiento del metano no solo disminuye la cantidad de este gas liberado a la atmósfera, reduciendo así el calentamiento global, sino que también genera energía limpia y contribuye a la economía circular.

Adoptar la tecnología, el sistema de recolección y aprovechamiento propuesto permitiría transformar uno de los pasivos ambientales más significativos del país en una fuente activa de energía renovable, alineando al país con su compromiso de ser un líder global en descarbonización.

La caracterización permitió identificar que el biogás que se genera en el relleno sanitario está conformado principalmente por metano, dióxido de carbono y oxígeno y se puede decir que las concentraciones del CH_4 se encuentran en valores de 17% a excepción de los Niveles de CO_2 que se encuentran en rangos de 18,5%, valores que pueden variar debido a que el metano al ser incinerado da como resultado de su combustión el dióxido de carbono, estos valores han ido aumentando con el transcurso del tiempo, los niveles más altos de estos gases se registran en el año 2018, por eso al realizar la proyección de generación del biogás hasta el tiempo de vida útil del relleno se puede garantizar una producción de estos gases en valores de 24.000-33.544 $\text{m}^3/\text{año}$, razón por la cual se decidió aprovechar estos gases mediante una propuesta para la implementación de la recolección y producción de energía eléctrica.

Se logra evidenciar cambios importantes en las propiedades físico, químicas, estructurales y mecánicas de los suelos por la presencia de lixiviados de residuos sólidos durante un periodo de tiempo prolongado. En términos generales, el mayor efecto generado por la presencia de lixiviados en las propiedades del suelo se presenta en las propiedades químicas del suelo.

Dichos cambios afectan notoriamente la estructura del material y por ende se ven afectadas las propiedades mecánicas y demás propiedades del suelo; sin embargo, en el sistema de recolección y aprovechamiento del biogás indirectamente se realiza el tratamiento de los lixiviados, canalizados hacia la PTA, mejorando todas las condiciones y contaminación que sufren los suelos en los sitios de disposición de desechos.

En la socialización, el impacto positivo que se puede presentar a la comunidad y a los funcionarios de los gobiernos locales es que la utilización del biogás como fuente de energía local se presenta como una oportunidad de contribución adicional al desarrollo sustentable y como una fuente de generación de empleo, inversión extranjera y desarrollo local. La venta de energía puede generar ingresos adicionales para rentabilizar la operación de un relleno sanitario y la recolección de biogás más allá del mínimo que se supone se “trata” actualmente. La energía generada con base en biogás puede ser distribuida a localidades aledañas a precios subsidiados para compensarlas por los efectos ambientales que la localización de rellenos sanitarios les puede generar.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda evaluar los beneficios económicos y ambientales que se obtendrían de la implementación y puesta en marcha de los biodigestores propuestos para el tratamiento de la materia orgánica generada, ya que la inversión inicial no se recupera al cabo de los ocho meses de operación.

Se recomienda -si se desea implementar la propuesta- evaluar técnica y económicamente la posibilidad de importar de los municipios residuos sólidos para aumentar la capacidad del digestor y, por ende, la generación de biogás.

Se recomienda realizar estudios técnicos que permitan depurar la magnitud de los impactos, así como para implementar medidas de mitigación, prevención y compensación ambiental y social, realizada por un equipo interdisciplinario.

6 REFERENCIAS

- Abarca Guerrero, L., Maas, G., & Hogland, W. (2016). *Residuos sólidos: gestión y tecnologías para América Latina*. Universidad de Borås.
- Altuna, L. y Alva, I. (2018). *Lead time y su influencia en el nivel de servicio de las empresas de servicio de entrega rápida para las importaciones de Estados Unidos*. (Trabajo de graduación para optar por el título de Negocios Internacionales). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Perú.
- ARESEP. (2022). *Informe de Tarifas y Consumo Eléctrico Residencial*. Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos.
- Asamblea Legislativa de Costa Rica. (s.f.).
- Asesor de Calidad. (2015). *Herramienta de Planificación: Diagrama de Gantt*. Recuperado de http://asesordecalidad.blogspot.com/2016/12/herramienta-de-planificacion-diagrama.html#.Xu_GzGhKjIU
- Asq Org. (2005). *El Retorno de Inversión*. Recuperado de <http://asq.org/quality-progress/2005/05/problem-solving/el-retorno-de-inversion.html>
- Barrantes Echavarría, R. (2014). *Investigación: Un camino al conocimiento un enfoque cualitativo, cuantitativo y mixto*. San José, Costa Rica: EUNED.
- Bernal Torres, C. (2010). *Metodología de la investigación: administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. Bogotá D.C., Colombia: Pearson Educación Ltda.

- Black, S., Parry, I., Vernon, N. (2022). *Las emisiones de metano deben reducirse para que el mundo logre alcanzar sus metas de temperatura*. IMF Blog. <https://www.imf.org/es/Blogs/Articles/2022/11/02/methane-emissions-must-fall-for-world-to-hit-temperature-targets>
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., & Levy, A. (2017). *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos*. Argentina: BID. Recuperado el, 5.
- Blanco, G., Santalla, E., Córdoba, V., y Levy, A. (2017). *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico*. <https://doi.org/10.18235/0009630>
- Blandón, J. (2017). *Disminución del tiempo de ensamble del cuello de botella en las líneas de producción de fórceps*. (Trabajo de graduación de Ingeniería Industrial). Universidad Central. Costa Rica.
- Capstone Turbine Corporation. (2019). *Landfill Gas Application Guide*.
- Chavarría Acuña, O. A. (2022). Comparación de los impactos ambientales ocasionados por la técnica de incineración y rellenos sanitarios para la gestión de residuos sólidos. *Ingeniería*, 32(2), 135-148.
- Coronado García, E. N., & Siesquen Álvarez, K. C. (2017). *Proyecto de Prefactibilidad de Instalación de una Planta de Tratamiento de Residuos Sólidos con Relleno Sanitario Mecanizado y Recuperación de Biogás, para la Ciudad de Chiclayo*.

- EPA. (2018). *Landfill Gas Energy Project Development Handbook*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-development-handbook>
- EPA. (2020). *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- Guaca, G., & Litsy, C. (2019). *Estudio de preinversión para el diseño de un sistema que permite el aprovechamiento de gas metano originado en el relleno sanitario Buchelli del municipio de Tumaco-Nariño* (Doctoral dissertation). Uniautónoma del Cauca. Facultad de Ciencias Ambientales y Desarrollo Sostenible. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria).
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, M. (2014). *Metodologías de la investigación*. Sexta Edición, México: . McGraw Hill.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2019)., *Factores de Emisión de Gases de Efecto Invernadero* (9na edición). Obtenido de: <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/factores-de-emision-gei-noveno-edicion-2019/>
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jenbacher. (2021). *Biogas Engine Selection Guide for CHP Systems*.
- Ley 8839. *Ley para la Gestión Integral de Residuos*.

MINAE. (2011). *Guía técnica para la construcción y operación de rellenos sanitarios*. Ministerio de Ambiente y Energía.

MINAE. (2017). *Proyecto de cierre y aprovechamiento energético del Relleno de Río Azul*. Ministerio de Ambiente y Energía.

MINAE. (2022). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero*. Dirección de Cambio Climático.

Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2019). *Costa Rica. Tercer Informe Anual de Actualización ante la Convención Marco de Las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Obtenido

de: https://www4.unfccc.int/sites/SubmissionsStaging/NationalReports/Documents/7160385_Costa%20Rica-BUR2-1-IBA-2019.pdf

Ministerio de Salud. (2016). *Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos*. Obtenido de: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/biblioteca-de-archivos/sobre-el-ministerio/politcas-y-planes-en-salud/estrategias/3026-estrategia-nacional-de-reciclaje-2016-2021/file>

Ministerio de Salud (MINSAL). (2016). *Plan Nacional para la Gestión Integral de residuos 2016-2021*. Obtenido de: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/biblioteca-de-archivos/sobre-el-ministerio/politcas-y-planes-en-salud/planes-en-salud/3025-plan-nacional-para-la-gestion-integral-de-residuos-2016-2021/file>

Ministerio de Salud. (2023). *Separa y vencerás*. <https://www.ministeriodesalud.go.cr/separayvenceras/#:~:text=%20En%20Costa%20Ri>

ca%20generamos%20al%20a%C3%B1o,pl%C3%A1sticos%20puede%20generar%20hasta%204%20empleos%20 (ACIPLAST)

Molina, Z. (1997). *Planeamiento Didáctico: Fundamentos, principios, estrategias y procedimientos para su desarrollo*. Primera edición, EUNED: San José, Costa Rica.

Posligua Solís, J. G. (2020). *Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de una propuesta de generación y aprovechamiento del gas metano a partir de los residuos sólidos en el Cantón Mocache, Provincia de Los Ríos*.

Project Management Institute, Inc. (2020). *¿Qué es un Project Charter?* Recuperado de <https://www.pmi.org/learning/library/project-charter-template-improving-planning-process-1986>

Psicología y Mente. (s.f.). *Registro anecdótico: qué es y cómo se usa en psicología y educación*. Recuperado de <https://psicologiaymente.com/clinica/registro-anecdótico>

Rabanales Ortiz, M.R. (2016). *Diseño de la investigación del desarrollo de un modelo de pronósticos por medio del método ABC para la reducción de merma por daño de productos cárnicos en un supermercado*. (Tesis para Ingeniería Mecánica Industrial). Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3334_IN.pdf

Rudín, V., Soto, S., & Linnenberg, C. (2019). *Primer informe Situación de la gestión de los residuos sólidos para la determinación de la NAMA residuos Costa Rica. Proyecto Acción Clima II*. Obtenido de: <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/07/Primer-informe-Situaci%C3%B3n-de-la-Gesti%C3%B3n-de->

los-Residuos-S%C3%B3lidos-para-la-determinaci%C3%B3n-de-la-NAMA-residuos-Costa-Rica.pdf

SCS Engineers. (2020). *Landfill Design and Operation Manual*. <https://www.scsengineers.com>

Soto, S. (2019). *Gestión de los residuos sólidos en Costa Rica. Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible 2019*. Obtenido de: <http://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/7818>

Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (2002). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill Education.

Teoría General del Sistema. (2010). *Diagramas causales*. Recuperado de <http://teoriageneralsistema.blogspot.com/2010/11/diagramas-causales-un-diagrama-causal.html>

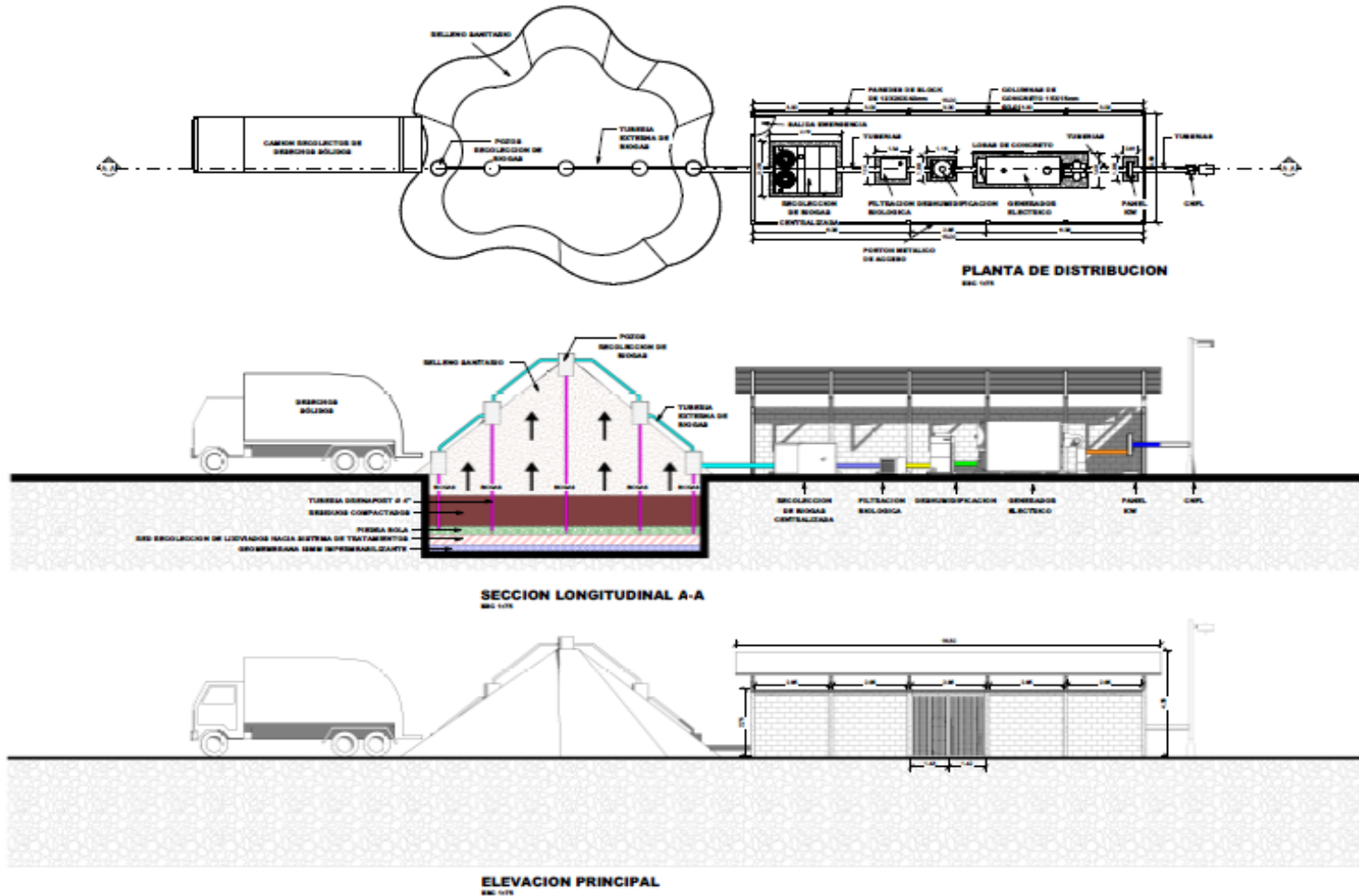
Valerio-García, M. A. (2010). *Diseño y evaluación de un sistema para la purificación de metano producido mediante biogestión en el ITCR*. (Bachillerato en Ingeniería en Biotecnología). Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6312>

Wärtsilä. (2022). *Gas Power Plants Technical Datasheets*.

APÉNDICES Y ANEXOS

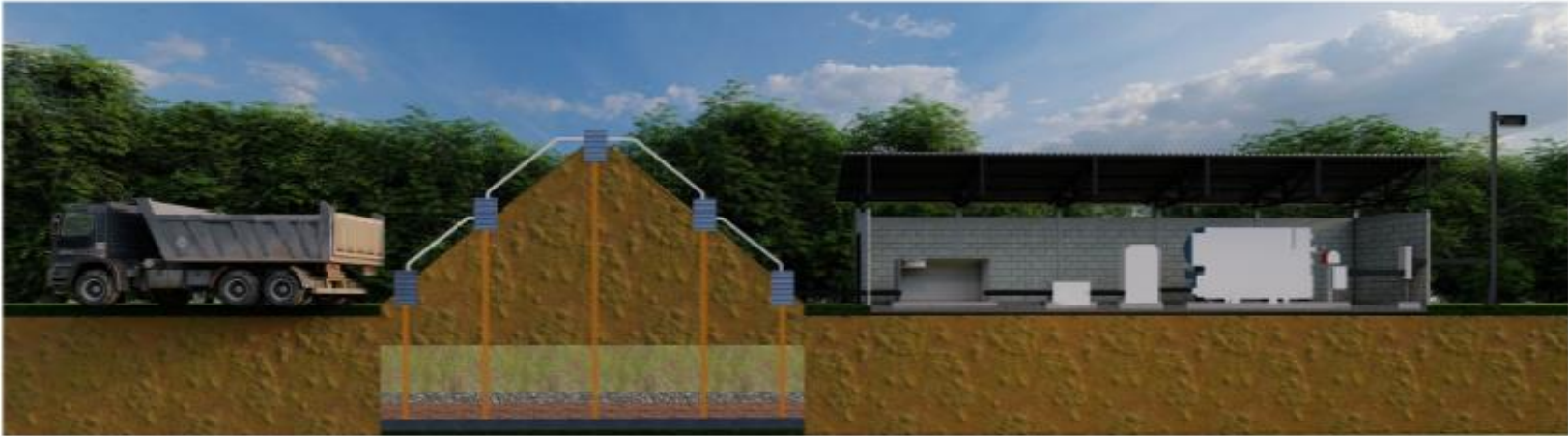
6.1 APÉNDICE 1

SISTEMA DE RECOLECCION Y APROVECHAMIENTO DE GAS METANO EN RELLENOS SANITARIOS



PROFESIONAL RESPONSABLE DISEÑO		
NOMBRE: Ing. VICTOR QUIROGA DE OLIVERA		
INFORMACION PROPIETARIO		
UNIVERSIDAD CENTRAL DE COSTA RICA		
		
CONTENIDO DEL PLAN		
UNIDAD:		
ESCALA	FECHA	LÁMINA
INDICADA	JULIO 2018	1

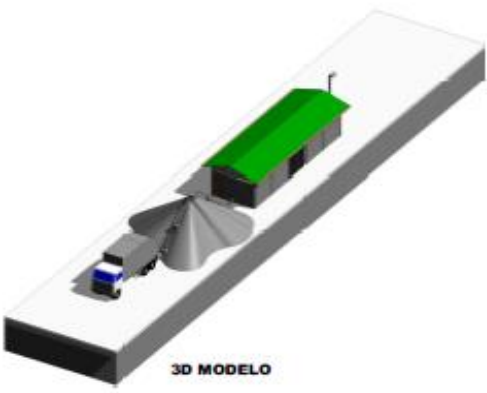
6.2 APÉNDICE 2



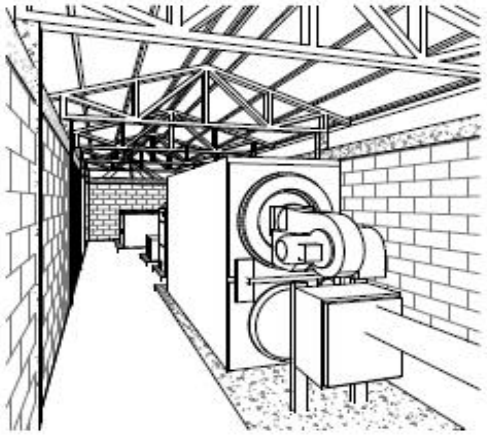
RENDERS DE SECCION LONGITUDINAL A-A



3D MODELO DE CERRAMIENTO



3D MODELO



3D MODELO DE EQUIPOS

PROFESIONAL RESPONSABLE DISEÑO
NOMBRE: Ing. MORTON QUIROGA ZUAGA


INGENIERIA

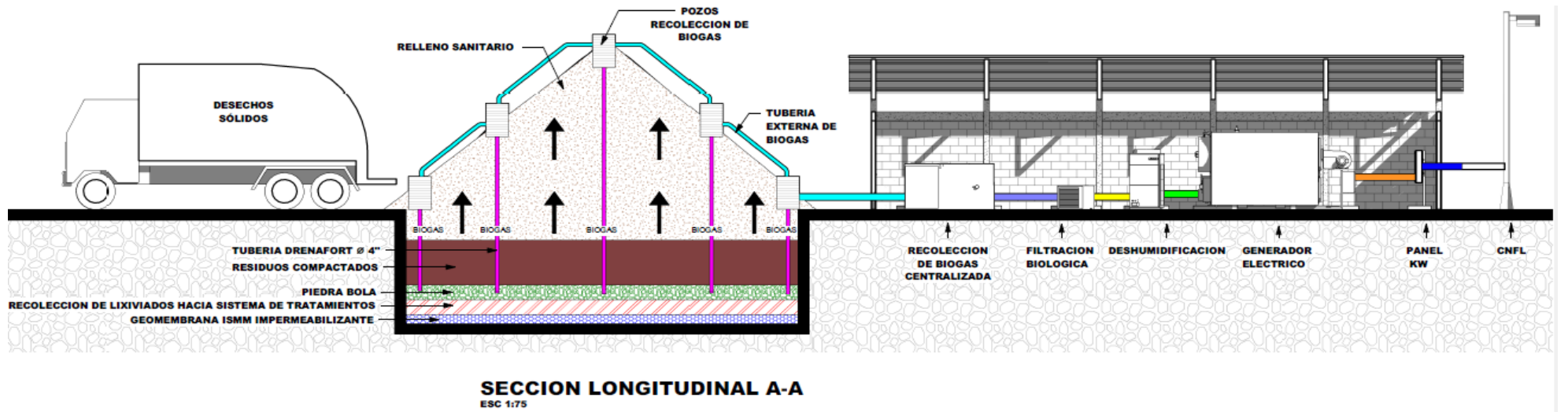
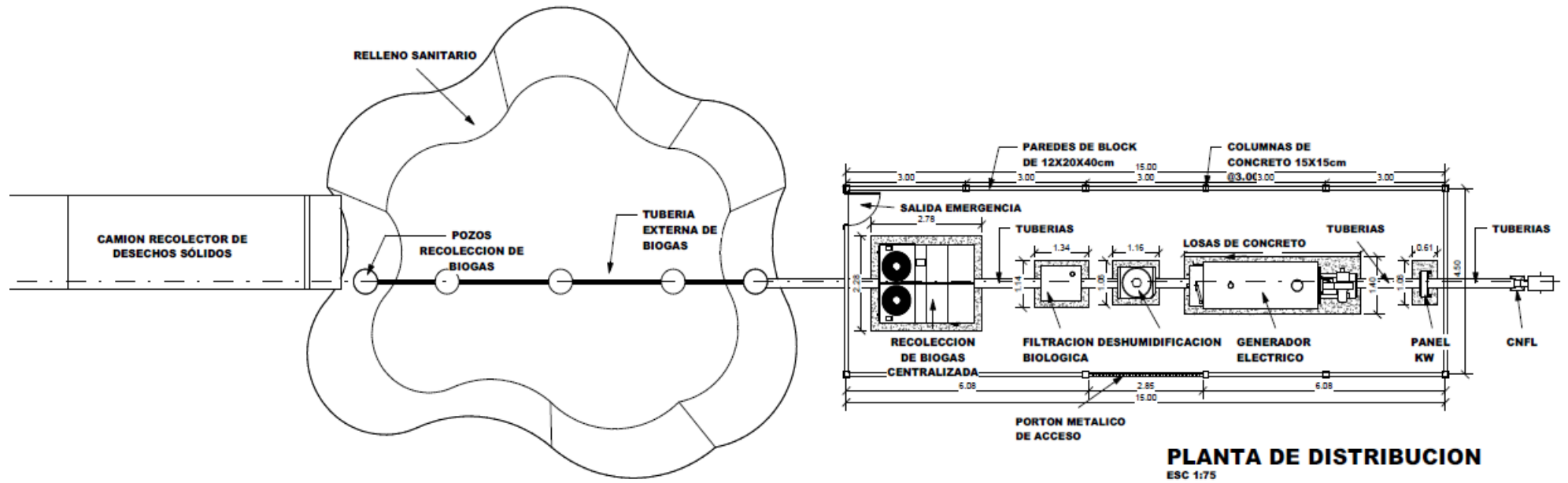
INFORMACION PROPIETARIO
UNIVERSIDAD CENTRAL DE COSTA RICA


UNIVERSIDAD
CENTRAL

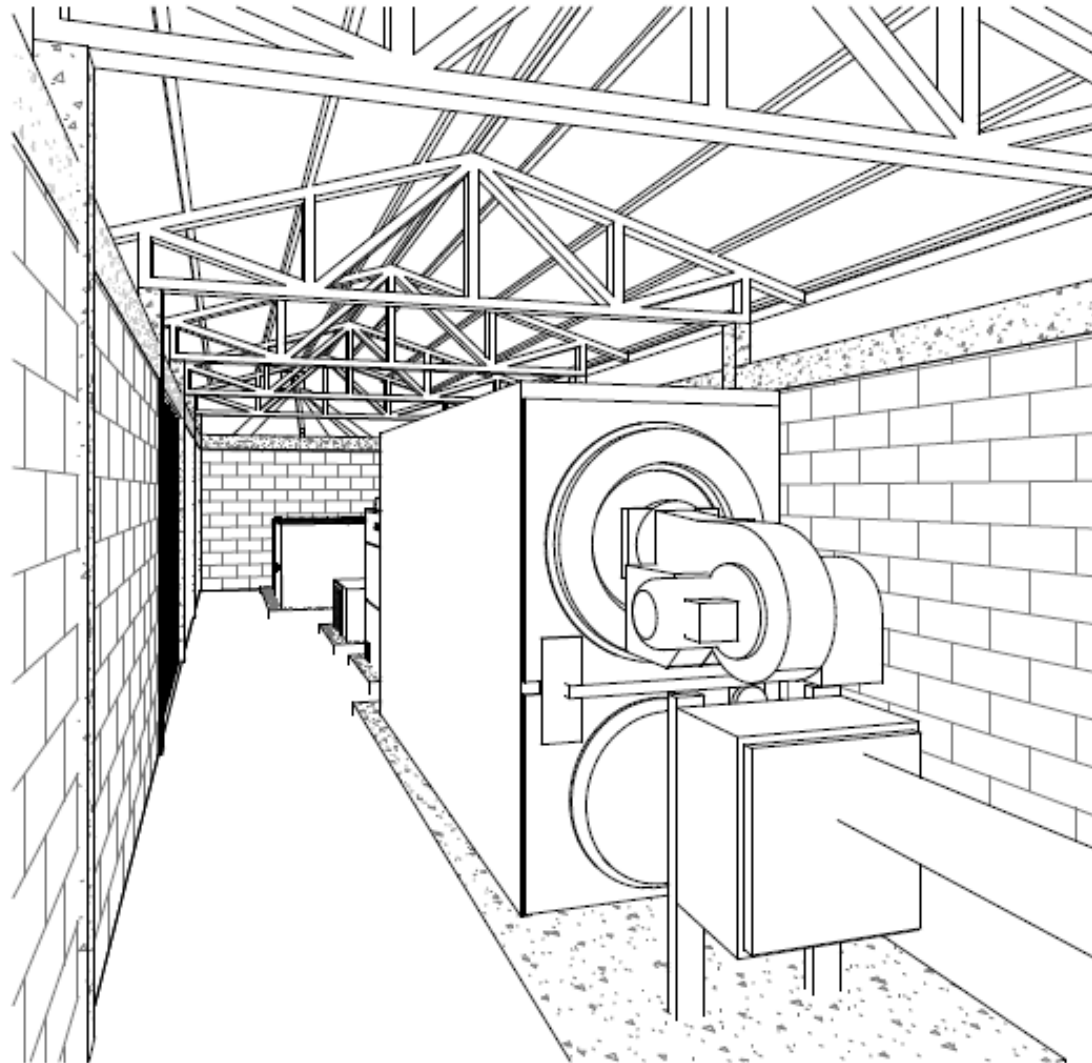
CONTENIDO DE LAMINA:
DISEÑO

ESCALA	FECHA	LAMINA
INDICADA	JULIO 2021	1

6.3 APÉNDICE 3



6.4 APÉNDICE



3D MODELO DE EQUIPOS