
Estimación de la producción de biogás para
un futuro módulo del relleno sanitario en la
ciudad de Necochea, Buenos Aires,
Argentina

Alumno:

Zumárraga Francisco

Director:

Ing. Mariano S. Sollazzo

Co-Director:

Ing. Martín Ignacio Bruno

Año:

2022

Resumen

Los rellenos sanitarios constituyen una fuente importante de biogás, resultado del proceso de descomposición biológica bajo condiciones anaerobias de residuos sólidos de origen orgánico, conformado por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2). La cantidad y composición del mismo va a depender de las características de dichos residuos, humedad, compactación y la edad del relleno sanitario. Un aumento de la cantidad de materia orgánica en los residuos equivale a un aumento en la generación de biogás. Los principales factores que pueden afectar la generación de gas pueden ser:

- Cantidad de residuos depositados por año.
- Composición de los desechos: Contenido de desechos orgánicos (fracción biodegradable), Humedad en los desechos, Tasa de degradación de los residuos, Temperatura de la masa de residuos
- Precipitación anual del sitio
- Operaciones y mantenimiento que afectan la generación del biogás: Compactación, Cobertura diaria, Control de lixiviados, Cobertura final

En el presente trabajo se ha llevado a cabo una estimación sobre la producción del biogás en los futuros módulos del relleno sanitario de la ciudad de Necochea. Para esto se tuvieron en cuenta distintos factores: dimensiones del módulo; caracterización, composición y cantidad de residuos a disponer; y cantidad de habitantes de la propia localidad teniendo en cuenta el aumento de la población. La obtención de los resultados sobre el potencial de recuperación de biogás generado dentro de los módulos del relleno sanitario de Necochea se realizó aplicando el Modelo Teórico LandGEM, el cual fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para estimar la cantidad de biogás generado en los rellenos sanitarios.

Por último, en base a los resultados obtenidos se determinaron las posibles alternativas para la utilización del biogás producido y finalmente se seleccionó la más viable de acuerdo a la cantidad generada.

Índice

I. Introducción	9
1. OBJETIVOS	10
1.1. Objetivo General	10
1.2. Objetivos Específicos	10
2. Antecedentes.....	10
Ubicación del predio	10
Anteproyecto.....	11
II. Marco Teórico	15
1. Caracterización y Cuantificación de los Residuos Sólidos del Partido de Necochea.....	15
1.1. Caracterización	15
1.2. Cuantificación	19
2. Rellenos Sanitarios	25
2.1. Tipos de Rellenos Sanitarios	27
2.2. Métodos de construcción de los Rellenos Sanitarios.....	27
2.3. Aislamiento de la base del Relleno Sanitario.....	30
2.4. Cobertura Final del Relleno Sanitario	34
3. Generación de Lixiviados	35
3.1. Tratamiento de Líquidos Lixiviados.....	36
4. Generación de Biogás.....	38
4.1. Proceso de descomposición de los residuos orgánicos.....	39
5. Gases de Efecto Invernadero	46
6. Sistemas de captación de biogás.....	49
6.1. Pozos de extracción Verticales	50
6.2. Colectores Horizontales.....	52
6.3. Sistema Integral de Captación y Tratamiento de Biogás	53
6.4. Estación de Captación y Tratamiento	56
7. Aplicaciones y aprovechamiento del Biogás	58
7.1. Usos del Biogás	59
7.2. Tratamiento del biogás	63
8. Modelos de estimación de producción de Biogás	72
8.1. Modelos Teóricos.....	73
III. Metodología.....	78

1. Dimensiones de los Módulos	79
1.1. Dimensiones Módulo 1	79
1.2. Dimensiones Módulo 2	79
1.3. Dimensiones Totales	80
2. Etapa Constructiva de los Módulos 1 y 2	81
2.1. Acondicionamiento y nivelación de la base de la celda	81
2.2. Colocación de venteo de gases	83
2.3. Cobertura Final y Clausura del Módulo.....	83
3. Desarrollo del cálculo de biogás aplicando el Modelo LandGEM	83
IV. Resultados	88
1. Modelo LandGEM - Resultados	88
1.1. Metano generado.....	91
1.2. Biogás generado.....	92
1.3. Gráficos	95
1.4. Inventario	96
1.5. Reporte	97
2. Selección de la alternativa más viable a implementar.....	98
2.1. Calculo de Generación de Energía Eléctrica	98
V. Conclusiones	104
VI. Bibliografía	106

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de RSU según su Origen y Tipo (SPA-Módulo2).....	16
Tabla 2. Distribución característica de la composición de los RSU para Municipio tipo (SPA-Módulo2)	17
Tabla 3. Proyección de RSU generados para el Partido de Necochea (RELISA, 2015)	21
Tabla 4. Población estimada por el Método Aritmético.....	23
Tabla 5. Tasa de Generación de residuos - Necochea	24
Tabla 6. Composición del gas del Relleno Sanitario - (SPA-Módulo3).....	38
Tabla 7. Potencial de Calentamiento Global de los principales GEI (SAyDS, 2019) ...	47
Tabla 8. Comparación entre las tecnologías de generación eléctrica.....	63
Tabla 9. Valores estimados del parámetro MFC (Carmona, 2020).....	77
Tabla 10. Toneladas de RSU generadas - Necochea	86
Tabla 11. Valores a utilizar en el Modelo LandGEM	87
Tabla 12. Valores M_i - Periodo 2022-2030	88
Tabla 13. Tasas de Aceptación de Residuos	90
Tabla 14. Residuos Aceptados - Modelo LandGEM.....	92
Tabla 15. Biogás generado - Modelo LandGEM	92
Tabla 16. Metano generado - Modelo LandGEM	93
Tabla 17. Dióxido de Carbono generado - Modelo LandGEM.....	93
Tabla 18. NMOC generado - Modelo LandGEM	94
Tabla 19. Energía Eléctrica obtenida a partir del Biogás generado	99
Tabla 20. Casas Suministradas y Ahorro Economico a partir de la Energía Eléctrica obtenida.....	102

Índice de Imágenes

Imagen 1. Ubicación del predio de disposición final de residuos (RELISA, 2015).....	11
Imagen 2. Sitio de Disposición Final Necochea	13
Imagen 3. Composición RSU Argentina (ENGIRSU 2005)	18
Imagen 4. Composición RSU PBA (Gilly, 2011).....	19
Imagen 5. Diagrama Constructivo de un Relleno Sanitario (CEAMSE).....	26
Imagen 6. Método de construcción de Relleno Sanitario - Método en Área (SPA-Módulo3).....	28
Imagen 7. Método de construcción de Relleno Sanitario - Método de Trinchera (SPA-Módulo3).....	29

Imagen 8. Método de construcción de Relleno Sanitario - Método de Rampa (SPA- Módulo3).....	30
Imagen 9. Membrana Flexible - Aislamiento de la base	33
Imagen 10. Cobertura o capa final de un Relleno Sanitario	35
Imagen 11. Generación de Gases en Rellenos Sanitarios en sus 5 Fases (George Tchobanoglous, 1982)	43
Imagen 12. Producción de gas de Relleno Sanitario durante los primeros 20 años luego de la clausura - (INTI, 2020).....	44
Imagen 13. Inventario GEI República Argentina 2019 (SAyDS, 2019).....	48
Imagen 14. Pozo de extracción vertical (Weihs-Biogas)	51
Imagen 15. Esquema de un Pozo de extracción vertical (MethaneToMarkets)	51
Imagen 16. Colectores horizontales (MethaneToMarkets)	52
Imagen 17. Esquema de un Pozo de extracción horizontal (Weihs-Biogas).....	52
Imagen 18. Cabezal de Pozo (Weihs-Biogas).....	53
Imagen 19. Tuberías Laterales (Weihs-Biogas).....	54
Imagen 20. Trampa de Condensado (Arriaza D. Á., 2016)	55
Imagen 21. Cárcamo de Condensado (Arriaza D. Á., 2016)	55
Imagen 22. Tubería Principal (MethaneToMarkets)	56
Imagen 23. Antorcha tipo “Cerrado” (Weihs-Biogas).....	57
Imagen 24. Antorcha tipo “Elevado” (MethaneToMarkets).....	57
Imagen 25. Sistema integral de captación y tratamiento de biogás (MethaneToMarkets)	58
Imagen 26. Unidad de cogeneración energética CHP – Caterpillar (INTI, 2020).....	61
Imagen 27. Esquema de un separador de humedad centrífugo. (Arriaza D. Á., 2016)	68
Imagen 28. Diagrama de selección de la tecnología de aprovechamiento y tratamiento requerido (Carmona, 2020).....	71
Imagen 29. Valores de Entrada - Modelo LandGEM.....	91
Imagen 30. Emisiones en Toneladas por Año - Modelo LandGEM	96
Imagen 31. Emisiones en m ³ por Año – Modelo LandGEM.....	96
Imagen 32. Inventario de Gases y Contaminantes Año 2030 - Modelo LandGEM.....	97

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Tasa de Crecimiento Aritmético.....	22
Ecuación 2. Estimación de población futura Método Aritmético	23
Ecuación 3. Cálculo emisiones anuales CH ₄ - Modelo LangGEM	74
Ecuación 4. Cálculo de la generación potencial de CH ₄ (L ₀)	76

Ecuación 5. Cálculo de la fracción de carbono orgánico degradable (DOC) 77
Ecuación 6. Cálculo de la fracción de carbono orgánico degradado asimilado (DOC_F)
..... 77

Glosario

Ley del Aire Limpio (CAA por sus siglas en inglés): Ley federal que establece los límites de los contaminantes en el aire; su principal objetivo es reducir los niveles de contaminación del aire en todo Estados Unidos. Busca garantizar que la población posea un aire limpio y saludable para respirar. Es función de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) ejecutar y hacer cumplir las reglamentaciones que reducen las emisiones de contaminantes del aire.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno que tiene un agua. Es la cantidad de oxígeno que los microorganismos, principalmente bacterias (aeróbicas o anaeróbicas), hongos y plancton, consumen durante la degradación de las sustancias orgánicas contenidas en una muestra. Se utiliza para medir el grado de contaminación.

DQO: Demanda Química de Oxígeno del agua. Es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en CO_2 y H_2O . Mientras más elevada sea la DQO, mayor será la contaminación del agua.

Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés): Agencia ejecutiva independiente del gobierno federal de los Estados Unidos encargada de asuntos de protección ambiental. Tiene por objetivo proteger la salud de los seres humanos, el medio ambiente y los recursos naturales. Previene y controla la contaminación del aire y el agua mediante el desarrollo de estándares para la calidad del aire y las emisiones de automóviles, y de programas para asegurar la limpieza del agua e información sobre la salud ambiental.

Gases de Efecto Invernadero (GEI): Componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación en

determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la tierra, la atmósfera y las nubes. Los principales GEI son el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el óxido nitroso (N_2O), el metano (CH_4) y el ozono (O_3). El aumento de la concentración atmosférica de estos gases por encima de los niveles naturales provoca un incremento en el denominado Efecto Invernadero.

Geomembrana: Láminas geosintéticas que se utilizan para la contención de líquidos en procesos mineros, medioambientales y agrícolas. Se caracterizan por su resistencia mecánica, permeabilidad y durabilidad en el medio ambiente. Las geomembranas en los rellenos sanitarios tienen aplicaciones en el recubrimiento de piscinas de lixiviados, en celdas de disposición final de residuos, en coberturas temporales y en coberturas finales para la clausura de las celdas.

MtCO₂e: Unidad de medida de las emisiones de carbono; millones de toneladas de CO₂ equivalente (MtCO₂e). Es una unidad de medida estándar de la industria, tiene en cuenta múltiples gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso. Todas las emisiones de gases de efecto invernadero se convierten en la cantidad de dióxido de carbono que provocaría un calentamiento equivalente.

Compuestos Orgánicos No Metanogénicos (NMOC por sus siglas en inglés): Compuestos orgánicos que poseen carbono diferente al CH₄, se pueden formar naturalmente o son sintetizados mediante procesos químicos; su concentración y presencia en el biogás tiene relación con el tipo de desecho dispuesto y la magnitud de las reacciones que producen los variados compuestos de la descomposición anaeróbica del desecho.

Óxidos de Nitrógeno (NO_x): El NO_x es un término genérico que hace referencia a un grupo de gases muy reactivos, tales como el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) que contienen nitrógeno y oxígeno en diversas proporciones. El segundo componente es el mayor contaminante de los gases NO_x y perjudica en gran medida al medio ambiente y a la calidad del aire que respiramos.

pH: Es la concentración de iones o cationes hidrógeno (H^+) presentes en determinada sustancia. El término significa potencial de hidrógeno y es una medida para determinar el grado de alcalinidad o acidez de una disolución.

Poder Calorífico: El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible. Es la cantidad de calor que entrega un kilogramo, o un metro cúbico, de combustible al oxidarse en forma completa.

Ppmv: Partes por millón de volumen (una parte por millón de volumen equivale al volumen de un gas mezclado en un millón de volúmenes de aire). Es una unidad de medida con la que se mide la concentración, se refiere a la cantidad de unidades de una determinada sustancia que hay por cada millón de unidades del conjunto. La concentración de los gases se expresa en partes por millón en volumen.

Siloxanos: Familia de compuestos orgánicos formados por cadenas lineales o cíclicas de silicio, oxígeno y grupos metilos. Son fabricados en un abanico de formas, entre los que se incluyen fluidos de alta y baja viscosidad, gomas, elastómeros y resinas. Se encuentran en cantidades significativas en una amplia y variada gama de productos domésticos. Estos compuestos pueden ser un molesto problema cuando se habla de la utilización del biogás como fuente de energía alternativa debido a obstrucciones en los distintos equipos generando daños en las máquinas empleadas, reduciendo la vida útil de las mismas y aumentando el costo operativo.

I. Introducción

Los rellenos sanitarios consisten en una técnica para la disposición final de los residuos sólidos en el suelo sin afectar de forma negativa al ambiente y sin provocar inconvenientes en la salud y en la seguridad pública. La descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos presentes en los rellenos sanitarios por acción de las bacterias provoca la generación de una mezcla de gases denominado biogás. La composición de este biogás dependerá principalmente de las características de los residuos sólidos dispuestos en el propio relleno sanitario; en general la composición del biogás está conformada en su mayoría por dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4). Tanto el CO_2 como el CH_4 son considerados Gases de Efecto Invernadero (teniendo mayor impacto el segundo), los cuales en altas concentraciones contribuyen al Efecto Invernadero y provocan la aceleración del Cambio Climático Global. Debido a esto es importante destacar la importancia de controlar la generación de biogás dentro de un relleno sanitario y evitar su liberación espontánea a la atmósfera.

Existen diversas formas de lidiar con el biogás producido, en una primera instancia el gas generado dentro de un relleno sanitario debe de ser captado y retirado del mismo y posteriormente seleccionar cuál será su fin más adecuado; entre algunas opciones se encuentra su aprovechamiento energético ya sea por medio del uso directo del gas o por su conversión y aprovechamiento como energía eléctrica o como combustible para vehículos.

La ciudad de Necochea posee un proyecto el cual consiste en acondicionar y cerrar el módulo actual del relleno sanitario de la ciudad y construir dos nuevos módulos para la recepción de los residuos sólidos urbanos. El objetivo del presente trabajo es estimar la cantidad de biogás posible a generarse en los módulos nuevos del relleno sanitario de la ciudad de Necochea aplicando el Modelo LandGEM desarrollado por la EPA y determinar la alternativa más viable con respecto a la cantidad de biogás producida.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Estimar la producción de biogás que se generaría en los futuros módulos del relleno sanitario de la ciudad de Necochea Provincia de Buenos Aires y determinar la mejor alternativa para su utilización.

1.2. Objetivos Específicos

- Identificar y describir las características y las dimensiones del futuro relleno sanitario en la ciudad de Necochea.
- Caracterizar y estimar la cantidad de residuos en la localidad de Necochea teniendo en cuenta el crecimiento poblacional de la misma.
- Determinar la vida útil del relleno en base a la cantidad de residuos a disponer.
- Determinar la cantidad de biogás generado basándose en el Modelo LandGEM.
- Identificar las posibles alternativas para la utilización del biogás generado.
- Determinar la alternativa más viable a implementar de acuerdo a la producción de biogás calculada.

2. Antecedentes

Ubicación del predio

El predio de disposición final se encuentra localizado en el Partido de Necochea aproximadamente a 5,5 kilómetros fuera del límite del ejido urbano de la ciudad, en un área rural extensiva al noroeste del casco, con vías de conexión y accesos por camino rural consolidado a la localidad de La Dulce, a 5 y 9 kilómetros de la ruta provincial 228 y del centro administrativo y comercial de la ciudad. A unos 2,7 km en línea recta se encuentra el aeródromo.



Imagen 1. Ubicación del predio de disposición final de residuos (RELISA, 2015)

Anteproyecto

En el año 2015 la empresa de Recolección y Limpieza Ambiental S.A. (RELISA¹), encargada de la recolección de los residuos y el mantenimiento y control del actual relleno sanitario de la ciudad de Necochea presentó un anteproyecto que consta de tres grandes objetivos con respecto al tratamiento de los residuos y al sitio de disposición final. Estos son:

1. El saneamiento del predio actual de disposición final.
2. La construcción de nuevos módulos para la disposición final de los residuos sólidos urbanos.
3. La construcción de una planta de separación que se construirá y se pondrá a disposición del municipio.

El primer objetivo planteado busca minimizar los impactos ambientales ya existentes, el módulo que se utiliza actualmente ya sobrepasa su capacidad

¹ Empresa de recolección, transporte, tratamiento y disposición final de RSU y de servicios de limpieza ambiental ubicada en la localidad de Necochea, Provincia de Buenos Aires.

máxima y los residuos son dispuestos igualmente en el mismo, a su vez, existen casos en los cuales los residuos son colocados en los sectores traseros del predio, en donde las instalaciones no se encuentran preparadas para llevar a cabo la disposición final de los residuos. Una de las medidas que se proponen en el anteproyecto es trasladar todos los residuos que se encuentren esparcidos por el terreno hacia las celdas del módulo actual, llenando las depresiones existentes en las mismas y además colocando tosca para corregir las pendientes y mejorar el aspecto general de la zona. En la misma medida se busca realizar una limpieza tanto mecánica como manual de todo el sector, recogiendo los materiales livianos arrastrados por el viento.

Una vez que no queden residuos esparcidos por el terreno se procederá a la clausura de la celda actual, para lo cual se realizarán las siguientes tareas:

1. Emparejamiento y nivelación de la superficie
2. Replanteo de pendientes de taludes
3. Cobertura final
4. Colocación de venteos

El segundo objetivo planteado en el anteproyecto presentado por RELISA es el de llevar a cabo la construcción de dos nuevos módulos en el relleno para disponer una cantidad estimada de 260.000 toneladas de residuos. En la siguiente *Imagen 2* se puede visualizar el sitio de disposición final de la ciudad de Necochea.

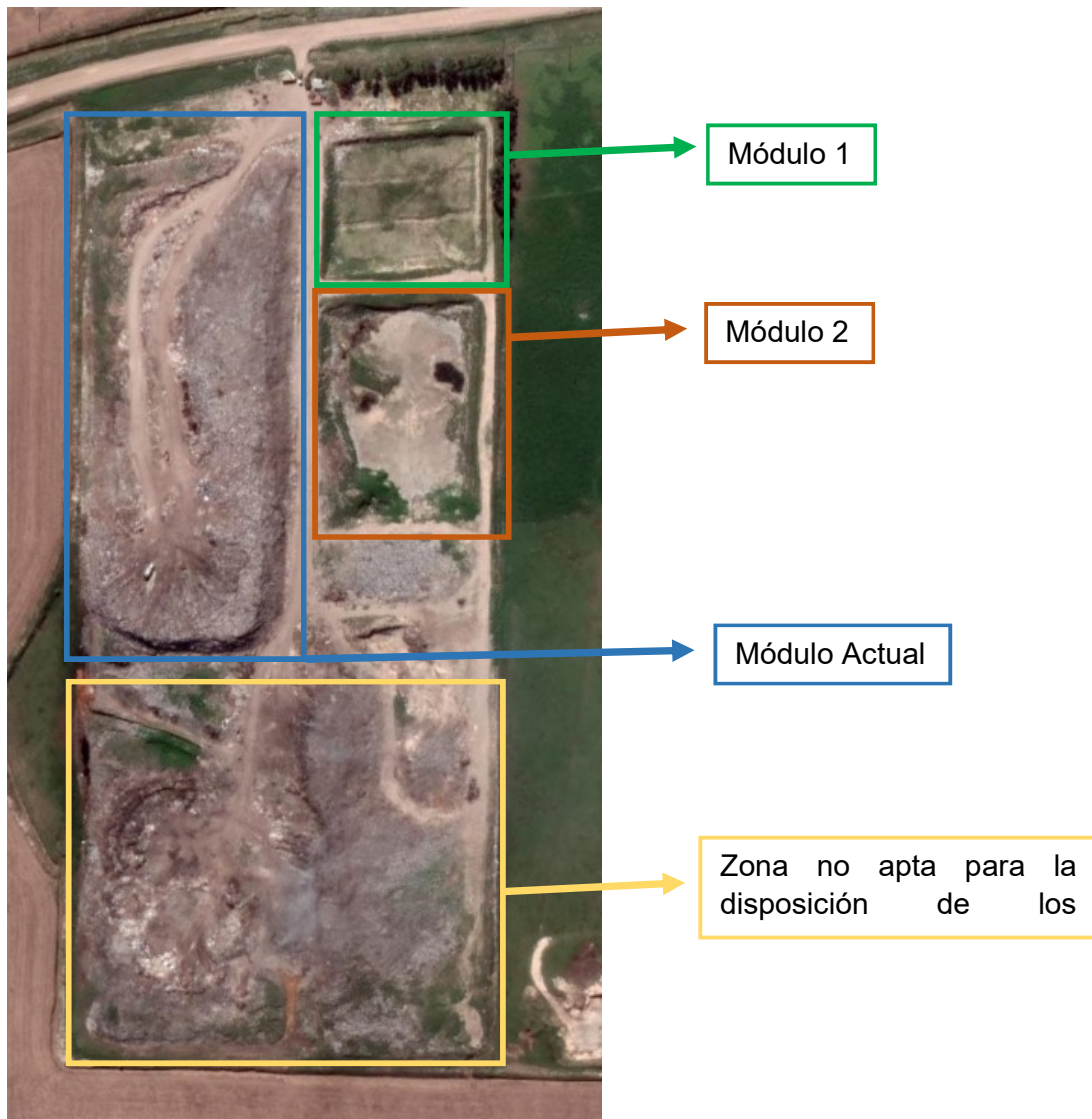


Imagen 2. Sitio de Disposición Final Necochea

También se propuso como meta la reducción de residuos depositados en el relleno incorporando una separación en origen, la cual se realizaría sumando progresivamente recorridos de separación diferenciada hasta involucrar a toda, o la mayoría, de la población del partido de Necochea. Tanto las dimensiones como las capacidades de residuos a disponer en cada uno de los módulos se ven abordados en el *Capítulo III. Metodología*.

Es necesario destacar que el Anteproyecto tiene planteado la construcción de una planta de compostaje para dar tratamiento biológico a los residuos orgánicos provenientes de la planta de separación. A objetivos del presente trabajo/informe se omitirá la edificación de la misma y se considerara que los

residuos pertenecientes a la fracción orgánica serán dispuestos en su totalidad en los módulos 1 y 2 del relleno sanitario de Necochea, a fin de obtener un mayor valor en la generación de biogás una vez dichos módulos sean cerrados.

El tercer y último de los objetivos principales planteados es la construcción de una planta de separación; la misma en su totalidad se localizará dentro de un galpón con las siguientes especificaciones: 20 m de ancho por 40 m de largo, con 5 m de alto en los laterales y 6 m como mínimo en la cumbrera.

II. Marco Teórico

1. Caracterización y Cuantificación de los Residuos Sólidos del Partido de Necochea

1.1. Caracterización

La ejecución de un estudio sobre la caracterización de los residuos sólidos nos brinda información para poder clasificar los RSU según su origen y tipo, su composición y sus propiedades. (SPA-Módulo2)

En los estudios de caracterización de RSU es importante:

1. Recopilar datos preexistentes: documentación de gestiones anteriores, archivos de la empresas recolectoras, centros de transferencia y disposición final, datos de municipios de características semejantes.
2. Reconocer focos de generación: domésticas, comerciales, etc.
3. Analizar las características de los residuos: composición, propiedades, etc.
4. Establecer metodologías de muestreo válidas: considerar puntos de muestreo, número y tamaño de muestras, intervalo de tiempo, etc.
5. Llevar a cabo trabajos de campo: toma de muestras, etc.
6. Identificar acciones que provoquen variación en la tasa de generación de los residuos: programas de minimización y reciclaje, legislación vigente, campañas públicas, factores físicos, etc.

(SPA-Módulo2)

1.1.1. Origen y Tipo

Los residuos sólidos pueden ser clasificados según su origen y tipo en las siguientes categorías (*Tabla 1*).

Tabla 1. Clasificación de RSU según su Origen y Tipo (SPA-Módulo2)

Origen	Tipos de Residuos
Domestico	Restos de comida, materiales plásticos de distintas características, papeles, cartones, textiles, cuero, madera, goma y residuos de jardín. Materiales de vidrio, aluminio, cerámica, metales féreos, latas y suciedad proveniente del barrido e higiene general.
Comercial	Papel, cartón, plásticos, restos de colinda, metales, vidrios, latas, suciedad, maderas
Institucional	Papel, cartón, plásticos, restos de colinda, metales, vidrios.
Construcción y Demolición	Maderas, hormigón, acero, ladrillos, piedras, materiales para conexión de electricidad, gas y agua y escombros en general. Vidrios rotos, aceros de reforzamiento y plásticos.
Servicios Municipales	Barrido de calles, basuras de la calle, residuos de poda del arbolado urbano, animales muertos y automóviles abandonados.
Plantas de tratamiento e incineradoras	Fangos que no contengan residuos especiales Ceniza o rechazo: materiales derivados de la quema de madera, coque, carbón y demás elementos combustibles. Materiales finos y no sedimentable, cenizas, escoria, vidrios, cerámicas y elementos metálicos.
Industrial	Metales, plásticos, tejidos, fibras, maderas, vidrios, papel, cartones, chatarra, residuos de alimentos, cenizas, etc. Todos estos no especiales.
Agrícolas	Rechazos de la plantación y cosecha de cultivos y árboles, producción de leche, cría de animales, etc.

1.1.2. Composición

La determinación de la composición de los RSU consiste en la descripción de los componentes individuales que integran la corriente de residuos y la estimación de su abundancia. Se puede considerar que para un municipio tipo el porcentaje de los residuos de origen doméstico y comercial constituyen alrededor del 50 a 75% del total de residuos generados.

El porcentaje de los distintos tipos de residuos en una población está vinculado directamente con la dimensión de los servicios municipales, las actividades de construcción y demolición, y los procesos llevados a cabo en plantas de tratamiento. Los porcentajes típicos de los RSU para cada una de sus categorías se encuentran establecidas en la *Tabla 2. (SPA-Módulo2)*

Tabla 2. Distribución característica de la composición de los RSU para Municipio tipo (SPA-Módulo2)

Categoría de Residuos	Porcentaje en Peso	
	Rango	Típico (valor medio)
Domésticos y Comerciales	50-75	62
Especiales (artículos voluminosos, electrodomésticos)	3-12	5
Peligrosos	0,01-1	0,1
Institucionales	3-5	3,4
Construcción y Demolición	8-20	14
Limpieza de calles	2-5	3,8
Árboles y Paisajismo	2-5	3
Parques y zonas de recreo	1,5-3	2
Sumideros	0,5-1,2	0,7
Fangos de plantas de tratamiento	3-8	6

La cantidad y características de los residuos dependen de variados factores de incidencia específica para cada área de estudio, tales como el tamaño de la población y densidad poblacional, los niveles de ingresos y socioeconómicos de la gente, la localización geográfica y el clima, las distintas actividades económicas existentes, y otros de no menor importancia. (SAyDS, 2005)

Los siguientes antecedentes (presentados en la *Imagen 3*) fueron recopilados a partir de un relevamiento de datos obtenidos de forma directa a través de visitas y entrevistas con funcionarios municipales. (SAyDS, 2005)

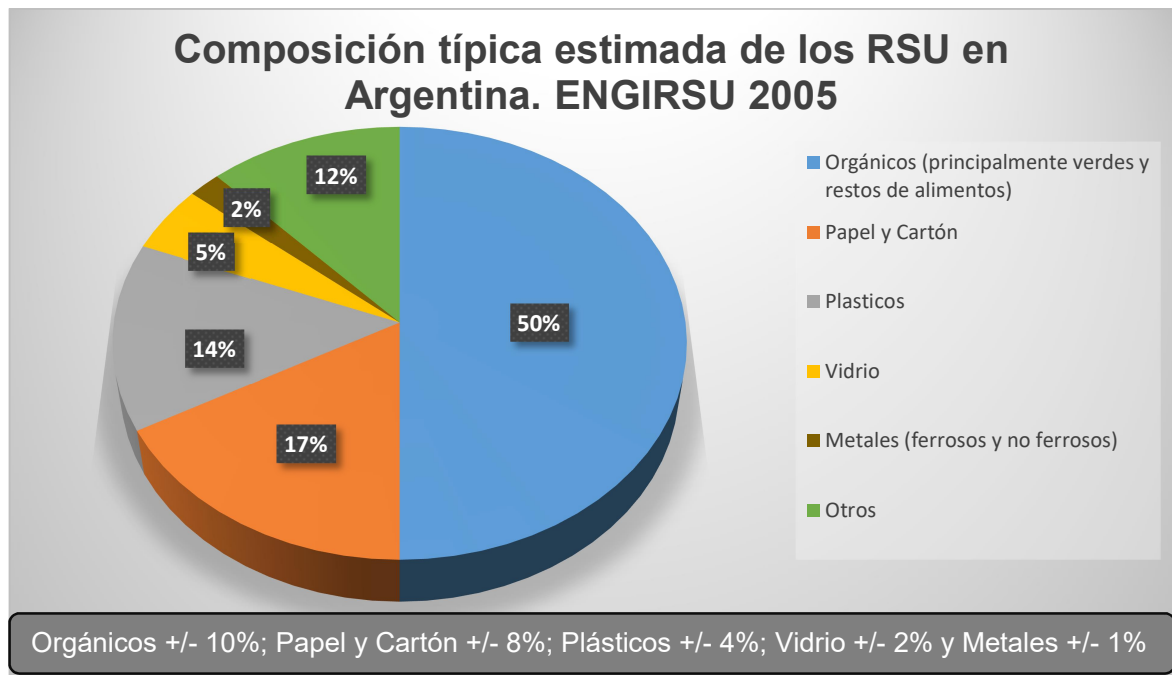


Imagen 3. Composición RSU Argentina (ENGIRSU 2005)

Las estimaciones sobre la composición de los RSU en Argentina, en promedio, poseen una humedad mayor al 50%, un contenido similar de materia orgánica biodegradable, y un valor entre 15 a 25% de papel y cartón, lo cual es similar en otros países de Latinoamérica. (SAyDS, 2005)

En la siguiente *Imagen 4* se puede detallar la composición de los RSU para la Provincia de Buenos Aires según relevamientos llevados a cabo por 51 plantas ubicadas a lo largo de 38 municipios de la provincia. (Gilly, 2011)

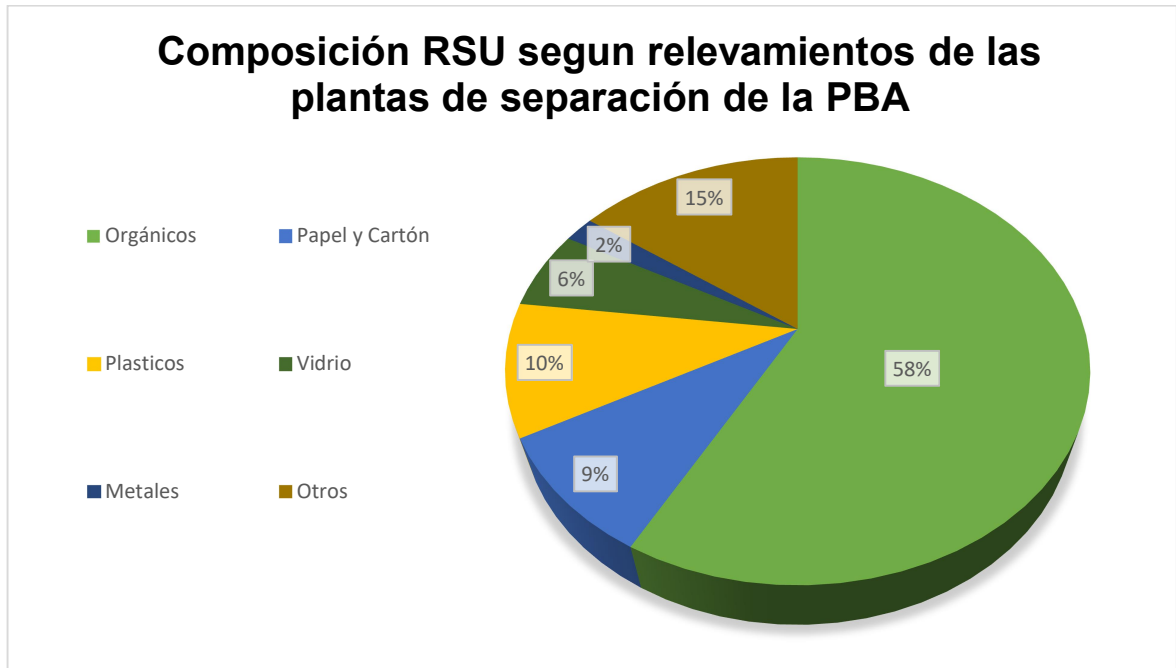


Imagen 4. Composición RSU PBA (Gilly, 2011)

A objetivos de este proyecto es de gran importancia tener en cuenta cual es el porcentaje de materia orgánica en los residuos sólidos a disponer, ya que tanto la cantidad como la composición del biogás dependen de este valor. Mientras mayor sea el porcentaje orgánico mayor será la generación de biogás dentro del relleno sanitario. En el Capítulo II. 4. *Generación de Biogás* se detalla de manera más específica como es el proceso de descomposición de la fracción orgánica presente en los residuos sólidos y como a partir de esta fracción se produce el biogás.

1.2. Cuantificación

La medición de la cantidad de RSU generados puede ser realizada a través de dos unidades posibles: el peso y el volumen; siendo más preciso la utilización del peso como dato sobre la cantidad de residuos generados, ya que el uso del volumen como medida de cantidad no es muy exacto debido a que este varía según el estado del residuo. Para que el valor medido sea más preciso se debe

relacionar los volúmenes medidos con el grado de compactación de los residuos o con su peso específico. (SPA-Módulo2)

1.2.1. Tasas de Generación

La tasa de generación es la cantidad promedio de residuos generados, generalmente su unidad de medida es Kg, por habitante y por día. La cantidad de residuos usualmente varía de manera diaria, semanal, mensual y estacional. (SPA-Módulo2)

Existen distintos factores que influyen en la cantidad de residuos generados, estos son: la localización geográfica, la época del año, la frecuencia de la recolección, los hábitos y la condición económica de la población, el alcance de las operaciones de recuperación y recirculación, la reducción en origen, el uso de trituradoras domésticas, la legislación, las actitudes del público y los usos sociales/culturales. Estos factores son de gran importancia a la hora de elaborar planes en relación al manejo de los RSU; en cada una de las situaciones se debe de evaluar de forma independiente el impacto de dichos factores. (George Tchobanoglous, 1982)

Tasa de generación de RSU en Argentina

Según la Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (ENGIRSU), realizada en 2005, la “generación per cápita” (GPC) media del país se encontraba entre 0,91 y 0,95 kg/hab.día, teniendo como máximo valor 1,52 kg/hab.día para la Ciudad de Buenos Aires, y un valor mínimo de 0,44 kg/hab.día para la Provincia de Misiones. (SAyDS, 2005)

Hoy en día se puede asumir que el valor de la tasa de generación promedio en Argentina es de aproximadamente 1 kg/hab.día, teniendo un rango entre 0,87 y 1,52 kg/hab.día.

Tasa de generación de RSU en la Provincia de Buenos Aires y Partido de Necochea

La Provincia de Buenos Aires cuenta con 135 municipios y con una población de 15.625.084 de habitantes según el censo INDEC 2010. A su vez, los resultados obtenidos del propio censo 2010 para la el Partido de Necochea fue de un total de 92.933 habitantes. La ENGIRSU elaborada por la Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable en el año 2005 estableció una generación total de RSU diaria de 16.976 toneladas y una tasa de generación promedio de 1,108 kg/hab.día para los habitantes de la Provincia (actualizado al año 2010). En el caso de Necochea la tasa de generación establecida fue de 0,716 kg/hab.día con una generación de 66,5 toneladas diarias. (SAyDS-BuenosAires, 2005)

El anteproyecto realizado por RELISA en el año 2015 presenta una proyección de los residuos generados año por año desde 2016 hasta 2027 para el Partido de Necochea asumiendo un aumento del 1.5% en cada año. En la siguiente *Tabla 3* quedan representadas las toneladas anuales y diarias generadas en el Partido de Necochea según la estimación realizada por RELISA. (RELISA, 2015)

Tabla 3. Proyección de RSU generados para el Partido de Necochea (RELISA, 2015)

Año	Toneladas Generadas	Toneladas Diarias
2016	37.000	101,37
2017	37.555	102,890411
2018	38.188	104,624658
2019	38.690	106
2020	39.270	107,589041
2021	39.860	109,205479
2022	40.457	110,841096
2023	41.064	112,50411
2024	41.680	114,191781
2025	42.305	115,90411

2026	42.940	117,643836
2027	43.584	119,408219

Según RELISA, a día de hoy están ingresando al relleno sanitario del Partido de Necochea alrededor de 110 toneladas diarias.

A partir de estos datos se puede determinar un valor aproximado de la tasa de generación de residuos en el Partido de Necochea para cada año teniendo en cuenta el crecimiento poblacional.

Existen diversos métodos para estimar las poblaciones futuras pero ninguno de estos es 100% preciso, en cualquier caso siempre existirá un grado de incertidumbre que puede depender de varios factores (clima, nivel socioeconómico). Además, en cualquier método se requiere como mínimo información de dos registros censales de la población que se encuentre bajo estudio.

Para este caso en particular se aplicó una estimación de la población futura utilizando el Método Aritmético, este consiste en agregar a la población del último censo un número fijo de habitantes para cada periodo en el futuro. En el método se aplican dos ecuaciones, una definida como la Tasa de Crecimiento Aritmético, la cual determina la pendiente de la recta utilizando los datos del último periodo intercensal (*Ecuación 1*), y otra para determinar la población en un año determinado (*Ecuación 2*).

$$r = \frac{Pob B - Pob A}{Año B - Año A}$$

Ecuación 1. Tasa de Crecimiento Aritmético

Donde:

r = Tasa de crecimiento aritmético

$Pob B$ = Población del último censo

$Pob A$ = Población del penúltimo censo

$Año B$ = Año del último censo

Año A = Año del penúltimo censo

$$Pob N = Pob n + r \times (Año N - Año n)$$

Ecuación 2. Estimación de población futura Método Aritmético

Donde:

Pob N = Población estimada para el año N

Pob n = Población del último censo

Año N = Año a determinar la población

Año n = Año del último censo

r = Tasa de crecimiento aritmético

Según el censo INDEC del año 2001 y 2010, la cantidad de habitantes en el Partido de Necochea era de 89.086 y de 92.933 respectivamente; en base a estos resultados se pueden establecer valores aproximados del crecimiento poblacional año por año aplicando el método anteriormente explicado.

$$r = \frac{92.933 - 89.086}{2010 - 2001} = 427,44 \text{ Hab/Año}$$

$$Pob 2022 = 92.933 + 427,44(\text{Hab/Año}) \times (2022 - 2010)$$

$$Pob 2011 = 98.062,33 = 98.062$$

A partir del método se estimó la población para cada año desde el 2022 hasta el 2030, los resultados se encuentran reflejados en la *Tabla 4*:

Tabla 4. Población estimada por el Método Aritmético

Año	Población
-----	-----------

2022	98062
2023	98490
2024	98917
2025	99345
2026	99772
2027	100200
2028	100627
2029	101054
2030	101482

Combinando los datos estimados de la cantidad de residuos generados en el Anteproyecto de RELISA del año 2015 y los valores aproximados de la cantidad de habitantes entre los años 2022 y 2027 puede obtenerse la tasa de generación de residuos (kg/hab.día) aproximada para el Partido de Necochea. Los resultados se presentan en la siguiente *Tabla 5*.

Tabla 5. Tasa de Generación de residuos - Necochea

Año	Población	Ton de residuos/día	Tasa de Generación (kg/hab.día)
2022	98062	110,841096	1,130316494
2023	98490	112,50411	1,142289674
2024	98917	114,191781	1,154420181
2025	99345	115,90411	1,166682873
2026	99772	117,643836	1,179126769
2027	100200	119,408219	1,191698792

2. Rellenos Sanitarios

La American Society of Civil Engineers – ASCE, determina que los rellenos sanitarios son *“una técnica para la disposición final de los residuos sólidos en el terreno sin causar perjuicio para el ambiente y sin ocasionar molestias o peligros para la salud, ni el bienestar y seguridad pública. Este método utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos en la menor superficie posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable. Los residuos así dispuestos se cubren con tierra con la frecuencia necesaria, por lo menos al final de cada jornada”*.

Estos son diseñados para almacenar un determinado volumen de relleno, cuando este valor es alcanzado se realiza la cobertura final del relleno, la cual tiene como función el aislamiento, la impermeabilización del suelo y la posterior revegetación. (Medina)

Los rellenos sanitarios pueden ser divididos en distintas fases, las cuales son denominadas módulos, submódulos y celdas. El módulo es la superficie que constituye por sí misma una unidad de la obra; el submódulo es una subdivisión del módulo que se realiza mediante caminos operativos levantados y rellenos con residuos en la última etapa de la obra; y la celda es una fracción del módulo la cual posee la capacidad de recibir residuos durante un periodo de tiempo relativamente corto. En la siguiente *Imagen 5* se puede visualizar un diagrama constructivo típico de un relleno sanitario.

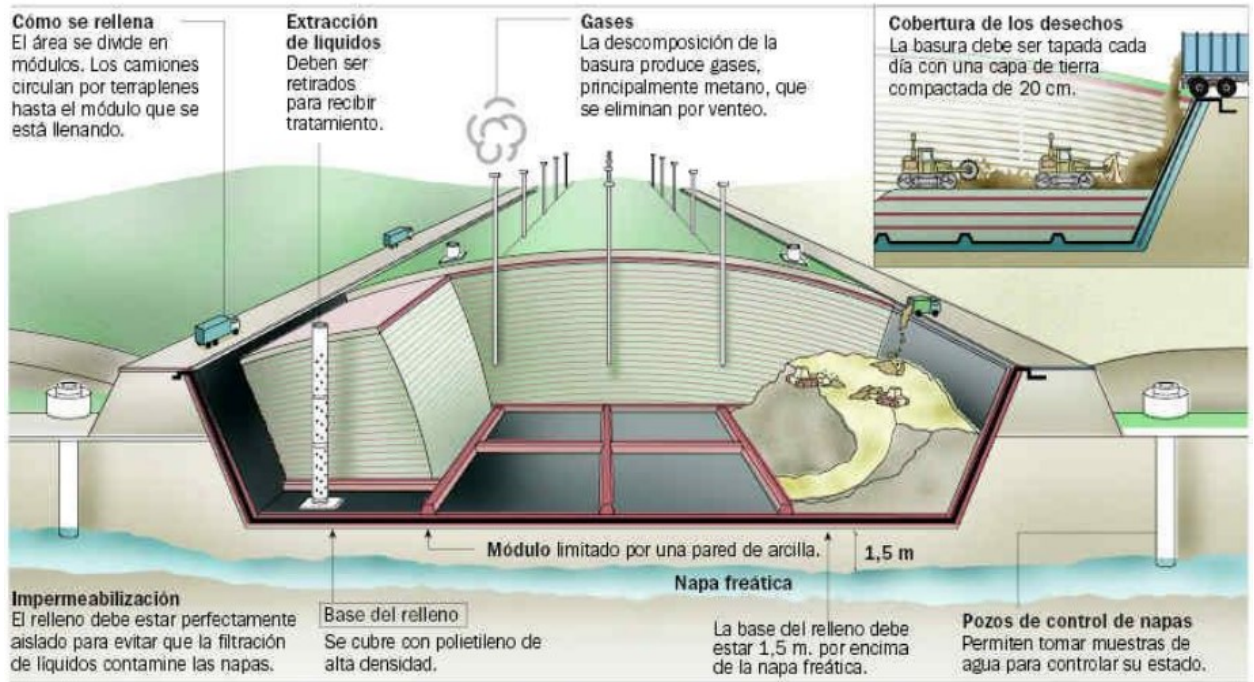


Imagen 5. Diagrama Constructivo de un Relleno Sanitario (CEAMSE)

Celdas

Son formadas a partir de los residuos sólidos que son esparcidos y compactados en distintas capas dentro de un área determinada, cubriéndose con una capa continua de suelo de unos 15 cm. (posteriormente compactada). Por lo tanto, una celda está conformada por el volumen de residuos sólidos compactados y su cobertura diaria. Estas celdas diarias se van colocando de manera secuencial una al lado de la otra y fila por fila hasta completar el área del relleno. (SPA-Módulo3)

Los elementos básicos de una celda son: longitud, ancho y alto del área de trabajo e inclinación de la celda y de las paredes laterales; y los factores que afectan las dimensiones de la celda son: la cantidad de residuos sólidos, el espesor de la cobertura diaria, la estabilidad de los taludes y el grado de compactación. (SPA-Módulo3)

Altura: Entre 2 y 4 metros

Ancho: Entre 8 y 15 metros, dependiendo del tipo de vehículo utilizado para distribuir y compactar los residuos, y de la cantidad máxima de vehículos que llegan en las horas pico.

Pendiente: Valor máximo de 1:4 (vertical/horizontal); si los taludes externos de la celda completada representan la superficie terminada del relleno sanitario, el valor de la pendiente no se debe exceder de 1:3. (SPA-Módulo3)

2.1. Tipos de Rellenos Sanitarios

Los distintos rellenos sanitarios pueden ser clasificados según el tipo de residuos que puedan recibir en cada uno de ellos, estos son:

- **Relleno Sanitario:** Generalmente reciben residuos sólidos domésticos o municipales, pudiendo ser revestidos o no revestidos. El revestimiento de la base tiene por finalidad proveer de una barrera que prevenga el movimiento del lixiviado y de gas hacia el suelo o las aguas subterráneas del área.
- **Relleno de Seguridad:** Poseen revestimientos en su base y todos los controles requeridos para albergar una mayor parte de residuos sólidos, incluyendo los residuos sólidos peligrosos. En los países más desarrollados este tipo de rellenos son utilizados para disponer residuos sólidos peligrosos.
- **Rellenos Especiales:** Son diseñados para disponer aquellos residuos sólidos específicos, estos podrían ser escombros provenientes de la construcción y demolición de edificaciones, así como también algunos productos industriales. Algunos de estos rellenos pueden ser o no revestidos, esto dependerá del tipo y las características de los residuos sólidos a disponer. (SPA-Módulo3)

2.2. Métodos de construcción de los Rellenos Sanitarios

Existen diferentes formas y métodos para construir un relleno sanitario, esto es debido a que cada lugar presenta características (físicas, clima, tipos y cantidades de residuos) propias; y a que cada alternativa de construcción posee diferentes costos. Estos métodos son:

- ❖ Método en Áreas: En este método los residuos sólidos son colocados sobre una superficie preparada previamente para dicha función, esta

capa de residuos se va extendiendo sobre la ladera inclinada y es compactada en la parte superior del sistema de revestimiento como se puede ver en la *Imagen 6*. Finalmente se distribuye y compacta el material de cobertura sobre los residuos sólidos. Aplicando este método la excavación que se realiza para depositar los residuos sólidos y para obtener el material de cobertura es mínima; dicho material de cobertura se obtiene fuera del área (de aporte externo). Este tipo de relleno es desarrollado sobre llanuras con imposibilidad de realizar excavaciones y en zonas pantanosas. (SPA-Módulo3)

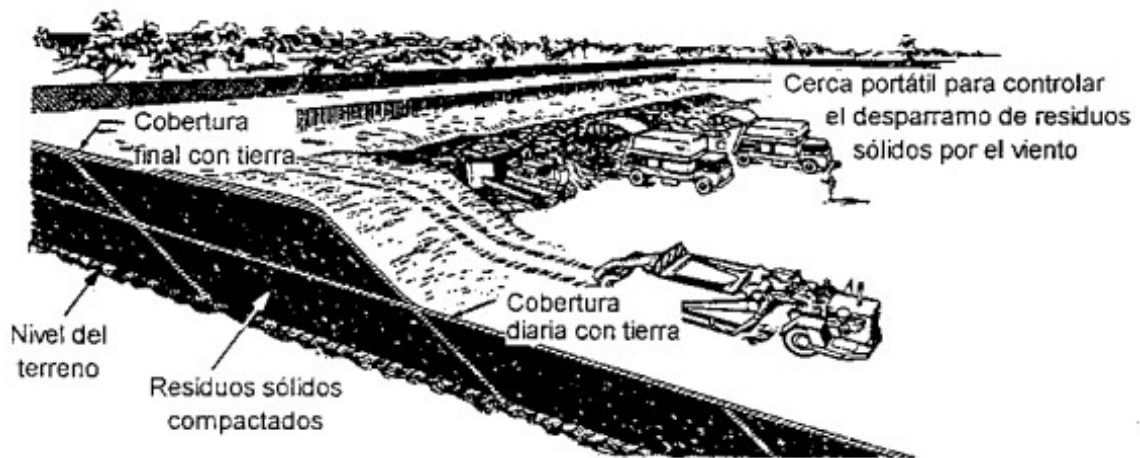


Imagen 6. Método de construcción de Relleno Sanitario - Método en Área (SPA-Módulo3)

- ❖ Método de Trinchera: En este tipo de rellenos se lleva a cabo una excavación (trinchera) donde su tamaño dependerá de la cantidad de residuos sólidos a disponer; en la *Imagen 7* se plasma la construcción de un relleno sanitario mediante el método de trinchera. La misma puede estar preparada para recibir residuos por varios días o para periodos de tiempo más largos como por ejemplo 1 año. Cuando los residuos son depositados en la pendiente de la trinchera (pendiente máxima 1:4) estos mismos son compactados y cubiertos; podría considerarse a cada trinchera como una celda.

La estabilidad del suelo va a depender de las condiciones climáticas, de la resistencia propia del suelo, la profundidad (dependerá del nivel de las

aguas subterráneas), la distancia entre las trincheras y el lapso en que la trinchera permanece abierta.

Dependiendo del tamaño del relleno sanitario, la excavación de las trincheras puede ser una operación continua o periódica, obteniendo una mayor eficiencia si luego de llenar una trinchera se excava una nueva para recibir los residuos del día siguiente.

Estos tipos de rellenos son convenientes en suelos con buenas características cohesivas y exigen una buena planificación que minimice el movimiento de los suelos. (SPA-Módulo3)

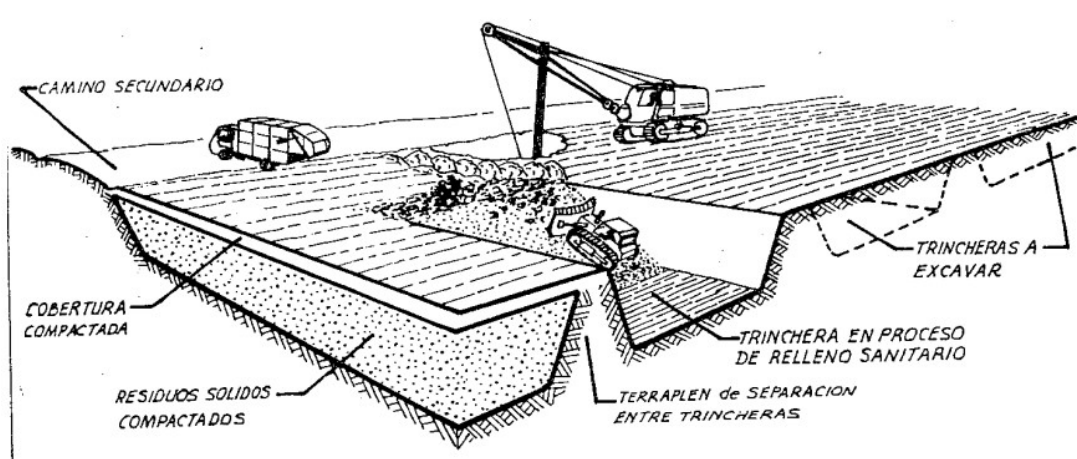


Imagen 7. Método de construcción de Relleno Sanitario - Método de Trincheras (SPA-Módulo3)

- ❖ Método de Rampa: Como es representado en la *Imagen 8*, el método de rampa es considerado como una variante del método en área; en este caso los residuos son esparcidos y consolidados sobre un talud, el material de cobertura se obtiene directamente frente al área de trabajo siendo el mismo esparcido y consolidado sobre los residuos sólidos. Este método permite optimizar el uso del espacio físico ya que no es necesario traer desde otro sitio el material utilizado en la cobertura del relleno. (SPA-Módulo3)



Imagen 8. Método de construcción de Relleno Sanitario - Método de Rampa (SPA-Módulo3)

- ❖ **Método Combinado:** Consiste en la combinación tanto en la construcción como en la operación del método de área y de trinchera. El método de trinchera puede emplearse en suelos de mayor profundidad, y el material no utilizado para la cobertura de la trinchera puede ser aprovechado para las secciones donde es aplicado el método de área. A partir de esto, el método de área y el material de cobertura acumulado podrían ser utilizados para construir franjas adicionales sobre una franja ya completada.

La aplicación del método de trinchera y de área se fundamenta en la topografía, la geología y la profundidad de las aguas subterráneas. En la mayoría de los rellenos sanitarios se emplea esta combinación de los métodos trinchera y área. (SPA-Módulo3)

2.3. Aislamiento de la base del Relleno Sanitario

La finalidad de aislar o impermeabilizar la base de los rellenos sanitarios es lograr la protección de las aguas subterráneas de la contaminación provocada por el lixiviado. Los revestimientos de la base de un relleno pueden estar

conformados por suelo y arcilla, y los materiales sintéticos (membrana flexible). Estos sistemas de cubierta pueden ser de tres tipos:

Revestimiento Único: Se encuentra integrado únicamente por un componente impermeable o de baja permeabilidad, dicha capa puede ser de tierra natural o de material sintético, ubicándose sobre este un sistema de recolección del lixiviado.

Revestimiento Doble: Está conformado por dos componentes, los cuales pueden ser o no de materiales iguales o idénticos, el sistema de recolección de lixiviados se coloca sobre la capa superior y entre el revestimiento o capa inferior y superior se instala un sistema de detección de fugas.

Revestimiento Integrado: Compuesto por dos materiales diferentes, generalmente se utiliza directamente una cubierta sintética de una membrana flexible sobre un suelo de baja permeabilidad como la arcilla.

Es imprescindible y de suma importancia que la base de los suelos de un relleno sanitario posea un revestimiento sintético o membrana sintética aun cuando sean casos de suelos de muy baja permeabilidad; con motivo de evitar la posible migración e infiltración de los contaminantes al suelo, asegurando la preservación de los recursos naturales. En la *Imagen 9* se puede ver cómo debe realizarse el aislamiento de la base de un relleno sanitario mediante la colocación de una membrana flexible. (SPA-Módulo3)

Por lo tanto los sistemas más aplicados serían los sistemas de Revestimiento Integrado, ya que poseen un revestimiento o capa de suelo compactado y otra cubierta constituida por una membrana flexible.

Para que un determinado suelo pueda servir como un revestimiento adecuado debe de poseer una baja permeabilidad, o también denominada, una baja conductividad hidráulica k . Los valores ideales de conductividad hidráulica para un suelo compactado serán menor o igual a 1×10^{-7} cm/seg. Si el suelo original no posee las condiciones necesarias de permeabilidad puede ser mezclado con otro suelo o con un aditivo lo cual le permita alcanzar las características de permeabilidad y compactación requeridas (contenidos de humedad, densidad,

fuerza de compactación y permeabilidad). Es de suma importancia realizar un control de la humedad previamente a la colocación del revestimiento o cubierta, ya que cualquier cambio, ya sea por evaporación o por el aumento del valor de humedad, va a influir en la compactación del suelo. Generalmente el revestimiento de arcilla, o suelo de baja permeabilidad, es considerada una capa consolidada de un espesor entre 0,3 y 1 metro. (SPA-Módulo3)

Previo a la colocación del revestimiento de arcilla deben de ser acondicionados tanto la base como los taludes del lugar, esto regularmente consiste en los procesos de excavación y nivelación del suelo. Es recomendado que las pendientes de las paredes laterales sean de 1:4, mientras que las pendientes para el sistema de recolección de lixiviados y de las tuberías se sugiere que sean del 2% al 5% y del 1% al 3% respectivamente.

Por otra parte, la membrana flexible o geomembrana es utilizada tanto como elemento único instalado directamente sobre la base del suelo y como un revestimiento integrado (recomendado) empleado sobre una cubierta o revestimiento de suelo compactado.

Las membranas flexibles pueden ser clasificadas en simples, compuestas y mixtas (geomembrana, geotextil, geomalla), y además existen membranas de distintos materiales (laminas prefabricadas de polímeros), algunos de estos son: polietileno de alta densidad (PAD), polietileno de baja densidad (PBD), polietileno de muy baja densidad (PMBD), polipropileno (PP) y policloruro de vinilo (PVC).

Los principales pasos que se deben seguir en la colocación de una membrana flexible son:

1) Selección del material del Revestimiento de Membrana Flexible

Esto dependerá de: La compatibilidad química con el lixiviado; las propiedades físicas como espesor, flexibilidad, fuerza y grado de estiramiento; la estabilidad a largo plazo; y la disponibilidad y el costo. Además deben de tenerse en cuenta distintas propiedades físicas como la resistencia a la perforación, la expansión térmica, la resistencia a la meteorización y la resistencia al ataque biológico (bacterias, hongos y roedores). (SPA-Módulo3)

2) Diseño de la nivelación

La importancia que tiene la nivelación en un relleno sanitario es la de prevenir la acumulación de gas y líquido debajo del revestimiento; deben de ser removidas las piedras mayores a 2,5 cm (para evitar la ruptura de la membrana y que el lixiviado contamine el suelo), raíces, residuos presentes y el material orgánico para reducir la sedimentación y la producción de gas por la descomposición de la materia orgánica ubicada debajo del revestimiento. La superficie del suelo debe de ser compactada alcanzando una base firme y sólida para posteriormente colocar la cubierta. A su vez deben de adoptarse distintas medidas en el diseño de los cimientos para prevenir el asentamiento, hundimiento y las fallas en las pendientes. (SPA-Módulo3)

3) Planificación de la instalación (diseño de los sistemas de sellado, anclado y respiraderos).

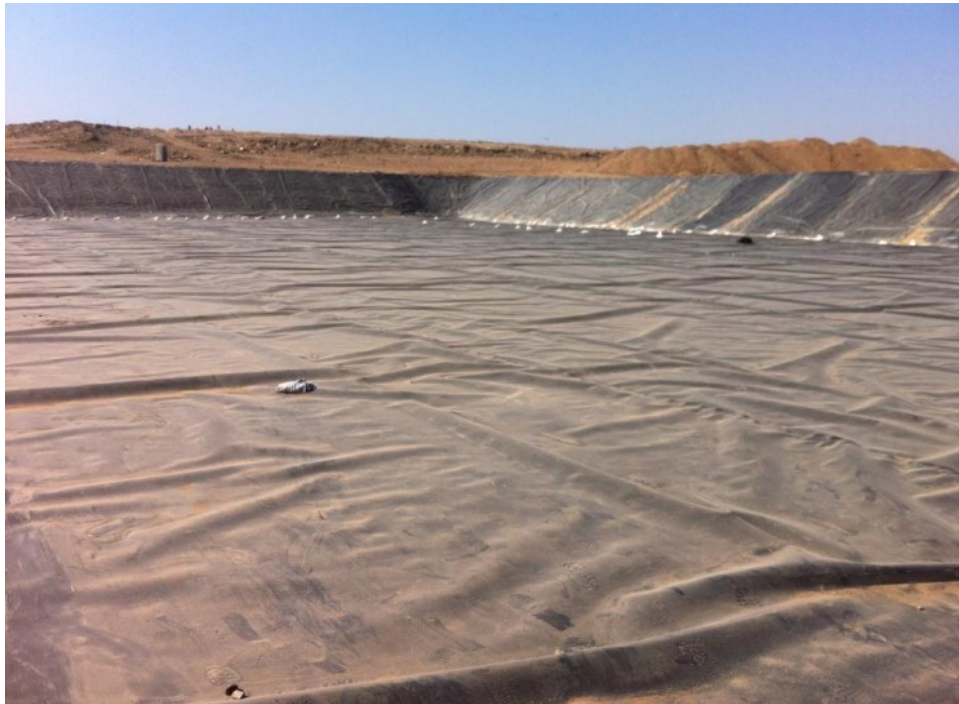


Imagen 9. Membrana Flexible - Aislamiento de la base

2.4. Cobertura Final del Relleno Sanitario

La función principal que cumple una cobertura final o capa final en un relleno sanitario, una vez finalizado su periodo de operación, se basa en limitar el flujo de agua proveniente de fuentes naturales externas (como las precipitaciones) dentro del propio relleno, reduciendo la generación de lixiviados y evitando la contaminación potencial de las aguas subterráneas. Un correcto sistema de cobertura final también es aplicado para reducir el tiempo y el gasto en el cuidado a largo plazo; disminuir los posibles impactos negativos hacia el ambiente; controlar la erosión que podría exponer los residuos dispuestos; proveer de una barrera física sobre los residuos enterrados previniendo el contacto humano y posibles problemas relacionados con vectores y malos olores; y proporcionar una base para la posible reutilización del área del relleno sanitario. (SPA-Módulo3)

El diseño de una cobertura final está conformado por dos capas; una capa superficial y una capa de barrera hidráulica.

La capa superficial posee una cobertura de pasto resistente, como se puede visualizar en la *Imagen 10*, y por debajo de esta se ubica la capa de barrera hidráulica, la cual se encuentra integrada por un suelo de baja permeabilidad que dificulta la infiltración del agua proveniente de la superficie. Los espesores recomendados en zonas o regiones áridas y semiáridas son de aproximadamente 60 cm de capa superficial y 20 cm de barrera hidráulica; para áreas húmedas además de las dos capas deben de tomarse acciones que reduzcan la infiltración en el relleno sanitario, entre estas se pueden destacar:

1. Promoción y canalización de la escorrentía (dotando a la superficie terminada del relleno sanitario con una pendiente mínima de 5%).
2. Aumento de la evapotranspiración (la siembra de una cobertura vegetal favorecerá dicho incremento y ayudará a prevenir la erosión).
3. Reducción del paso de agua a través de la capa de la barrera (dicha capa ha de constituirse con un material de muy baja permeabilidad).

Para prevenir la acumulación de humedad sobre la capa de la barrera hidráulica se puede colocar una capa de drenaje, lo cual incrementa la complejidad de la cubierta. (SPA-Módulo3)



Imagen 10. Cobertura o capa final de un Relleno Sanitario

3. Generación de Lixiviados

Los líquidos lixiviados son producidos a partir del agua infiltrada a través de los residuos, resultando en la lixiviación de los compuestos orgánicos e inorgánicos; la formación del lixiviado será por dos principales fuentes: La liberación del agua contenida en los residuos (humedad intrínseca de los residuos), ya sea por la compactación de los mismos o por la descomposición de los residuos orgánicos; y por el contacto entre el agua de lluvia y los residuos, esto puede darse en el momento de la descarga de los residuos en las celdas y también por la posible infiltración de las precipitaciones en el relleno.

Como consecuencia de los procesos de descomposición dentro del relleno, cierta cantidad de humedad pasa a formar parte del gas del relleno sanitario (CH_4 y CO_2). (SPA-Módulo3)

El lixiviado es una solución que contiene partículas disueltas y en suspensión de los residuos, los contaminantes van a depender de la composición de los residuos y de la actividad física, química y biológica dentro del relleno sanitario;

además posee: un alto contenido orgánico, de nitrógeno y de fósforo; un fuerte olor y una gran actividad microbiana. (Weihs, 2011)

Aquellos factores que van a influir en la generación de lixiviados son: el diseño del módulo (pendientes, sistema de drenaje del agua), el tipo de cobertura utilizada (suelo impermeable, espesor de cobertura, membrana flexible, vegetación) y los frentes abiertos (las zonas de descarga, el manejo del agua de lluvia y la cobertura provisoria de los residuos).

3.1. Tratamiento de Líquidos Lixiviados

Existen diversos métodos de tratamiento de los líquidos lixiviados, los tratamientos tradicionales pueden ser clasificados en tres grupos principales: a) transferencia de lixiviados: recirculación y tratamiento combinado con aguas residuales, b) biológicos: procesos aerobios y anaerobios, y c) métodos fisicoquímicos: oxidación química, adsorción, precipitación química, coagulación/floculación, sedimentación y extracción con aire. Otros tratamientos existentes son: evaporación de lixiviados y por sistema de membranas (osmosis inversa). (Montes, 2011) (Giraldo).

A continuación se hará enfoque únicamente en el tratamiento de recirculación de los líquidos lixiviados debido a que posee gran relación con respecto a la generación de biogás dentro de un relleno sanitario.

Recirculación de lixiviados

El tratamiento de recirculación consiste en regresar los lixiviados al relleno sanitario por la sección más alta del mismo. Cuando el líquido es recirculado se diluyen y atenúan los compuestos producidos por la actividad biológica y por otras reacciones químicas y procesos físicos que se generan dentro del relleno. Un ejemplo de esto son los ácidos orgánicos sencillos (ácidos grasos) que se convierten en CH_4 y CO_2 . Al recircular los lixiviados se logra un aumento en la humedad de los residuos dispuestos, que a su vez genera un aumento de la tasa de producción de gas metano en el relleno; por lo tanto, para evitar las emisiones incontroladas de gases en rellenos donde se recircula el lixiviado se

debería equipar al mismo con un sistema para la recuperación del gas generado. (Montes, 2011) (Giraldo)

Los ácidos grasos presentes en el lixiviado al metanizarse producen un aumento del pH del mismo, lo cual provoca que la solubilidad de los metales se reduzca de tal forma que se logra una disminución de los metales en solución que son transportados por el lixiviado. De esta manera se logra una reducción significativa tanto de la DBO como de los metales que finalmente arrastra el lixiviado. (Giraldo)

La recirculación puede producir algunos efectos adversos cuando se recircula una gran cantidad de lixiviado ya que se pueden presentar efectos de saturación, encharcamientos y condiciones acidas; a su vez, pueden impedir la migración de los gases generados, lo cual desencadena en un aumento en la presión interna del relleno provocando condiciones de operación poco seguras comprometiendo la estabilidad estructural de los taludes. (Montes, 2011)

En resumen, los beneficios que poseen los líquidos lixiviados para la generación de biogás son:

- Conversión de los ácidos grasos presentes en el lixiviado en CH_4 y CO_2
- Por recirculación se genera un aumento en la humedad de los residuos dispuestos (a mayor humedad, mayor producción de biogás)
- Debido a la recirculación se provoca un aumento en la generación de biogás por tonelada de residuo dispuesto en el relleno sanitario

Un beneficio de la recirculación de lixiviados es el aumento de las tasas de estabilización y asentamientos en el relleno sanitario.

4. Generación de Biogás

El biogás consiste en una mezcla de gases proveniente de la descomposición tanto aeróbica como anaeróbica, por la acción bacteriana, de la materia orgánica dispuesta en un relleno sanitario. La cantidad y composición del gas dependen principalmente de las características de los residuos sólidos dispuestos, un aumento de la cantidad de materia orgánica provocaría un aumento en la generación de biogás. Al concluir la descomposición de la fracción orgánica de los residuos a su vez finalizaría la producción de biogás en el relleno sanitario. (Weihs-Biogás)

La composición del biogás está integrada principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), aproximadamente entre un 50 y 60% para el metano y un 40 a 50% para el dióxido de carbono; aunque también posee otros compuestos gaseosos en mucha menor cantidad, estos son: nitrógeno, oxígeno (estos debido a escapes del sistema de control de gas o por el ingreso de aire dentro del relleno)¹, hidrocarburos cíclicos y aromáticos, hidrogeno, sulfuro de hidrogeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos no-metánicos (benceno, tolueno, cloruro de metileno, dióxido de sulfuro, etc.)². En la siguiente *Tabla 6* quedan representados cada uno de los componentes del biogás con sus porcentajes generales. (Weihs-Biogás)

Tabla 6. Composición del gas del Relleno Sanitario - (SPA-Módulo3)

COMPONENTE	% COMPONENTE (en seco)
Metano	47.5
Dióxido de Carbono	47.0
Nitrógeno ¹	3.7
Oxígeno ¹	0.8
Hidrocarburos parafínicos	0.1
Hidrocarburos cíclicos y aromáticos	0.2
Hidrógeno	0.1
Sulfuro de hidrógeno	0.01
Monóxido de carbono	0.1
Compuestos restantes ²	0.5

Dentro de los factores principales que afectan a la producción del biogás se destacan:

- La cantidad de residuos depositados por año
- La composición de los desechos
 - Fracción biodegradable (contenido orgánico)
 - Humedad en los desechos
 - Tasa de degradación de los residuos
 - Temperatura de la masa de residuos
- La precipitación anual del sitio
- Las operaciones y el mantenimiento que afectan la generación de biogás
 - Compactación
 - Cobertura diaria
 - Control de lixiviados
 - Cobertura final

De todos los factores mencionados anteriormente, considerando la mayoría de ambientes en un relleno sanitario y las prácticas de operación, la variable más importante con respecto a la tasa y el grado de descomposición que ocurriría en un relleno sanitario es la humedad.

4.1. Proceso de descomposición de los residuos orgánicos

La descomposición de la fracción orgánica de los residuos dispuestos en un relleno sanitario y la generación de los principales gases, se producen a partir de cinco o menos fases secuenciales, estas son:

Fase 1. Ajuste inicial: En la primera fase los componentes orgánicos biodegradables de los RSU sufren una descomposición por acción microbiana mientras son dispuestos en el relleno. Esta descomposición biológica se produce bajo condiciones aerobias, por esta misma razón se puede llamar a esta fase como fase aeróbica, la cual se encuentra condicionada por la cantidad de oxígeno atrapado dentro del propio relleno. El material utilizado como cobertura diaria y final es la fuente principal tanto de organismos aerobios como anaerobios, otra fuente podría ser el lixiviado reciclado o generado en el propio relleno. Los gases principalmente sintetizados son el dióxido de carbono (CO₂) y el vapor de agua. Esta etapa puede abarcar entre algunas semanas o varios meses. (Lopez, 2018) (SPA-Módulo3)

Fase 2. Fase de transición: Se da inicio a esta fase cuando el oxígeno presente empieza a descender y, por lo tanto, comienzan a desarrollarse condiciones anaerobias. A medida que el relleno se convierte en anaerobio, los microorganismos aerobios mueren y se produce la conversión de los microorganismos facultativos a anaerobios, además, el nitrato y el sulfato se reducen a gas nitrógeno y a sulfuro de hidrogeno. La temperatura que se puede alcanzar en esta fase es entre 45 y 55 °C, y su duración estará condicionada por el diseño del relleno y de su operación, de la compactación de los residuos y del contenido de humedad.

Al medir el potencial de oxidación/reducción se puede estimar el comienzo de la condición anaerobia, para lograr la reducción del nitrato y del sulfato se requerirá aproximadamente un potencial de oxidación/reducción de entre -50 a -100 milivoltios. En cambio, el potencial necesario para que se genere el gas metano (CH_4) está dentro del rango de -150 a -300 milivoltios. En algún momento, cuando el potencial de oxidación/reducción disminuya lo suficiente, comenzara un proceso de tres pasos (en el cual el producto final es el CH_4 y el CO_2), iniciando con la conversión del material orgánico complejo en ácidos orgánicos y otros productos intermedios, desarrollado en la siguiente fase. En esta fase, el pH del lixiviado comenzara a disminuir debido a la presencia de ácidos orgánicos y al efecto de las elevadas concentraciones de CO_2 . Los productos que se generan en esta fase son: dióxido de carbono (CO_2) y en menor cantidad el hidrogeno (H_2). (Lopez, 2018) (SPA-Módulo3)

Fase 3. Fase ácida: La actividad microbiana (iniciada en la fase anterior) se acelera debido a la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas de hidrogeno.

El primer paso en el proceso de tres pasos implica la transformación de compuestos con alto peso molecular (lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos) en compuestos aptos a ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y de carbono celular (ácidos grasos, monosacáridos y aminoácidos). Este proceso es denominado hidrólisis debido a que los compuestos de mayor peso molecular se hidrolizan a compuestos solubles para poder atravesar la membrana celular de los microorganismos. Es llevado a cabo por enzimas extracelulares excretadas por las bacterias fermentativas.

El segundo paso es el denominado acidogénesis, el cual consiste en la conversión microbiana de los compuestos resultantes del primer paso (ácidos grasos, monosacáridos y aminoácidos) en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como lo es el ácido acético (CH_3COOH), propionato, formato, metanol y pequeñas concentraciones de ácido fúlvico y otros ácidos más complejos. (Lopez, 2018)

Debido a la presencia de los ácidos orgánicos y por las elevadas concentraciones de CO_2 el pH del lixiviado caerá hasta un valor aproximado de 5 o menos. A su vez, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO) y la conductividad del lixiviado se incrementarán significativamente durante esta fase por la disolución de dichos ácidos en el lixiviado. Algunos de los constituyentes inorgánicos también se solubilizarán durante esta etapa, principalmente los metales pesados debido al bajo valor de pH. Muchos de los nutrientes se separarán del lixiviado, por lo que, si no es reciclado el mismo dentro del propio relleno podrían perderse dichos nutrientes.

El principal gas generado en esta etapa es el CO_2 y en menor medida el H_2 , y su duración puede ser de entre varios meses a años. (Lopez, 2018) (SPA-Módulo3)

Fase 4. Fase de fermentación del metano: A finales de la fase anterior comienzan a desarrollarse microorganismos estrictamente anaerobios denominados metanogénicos o formadores de metano, estos convierten el ácido acético y el gas de hidrogeno (formados en la fase acida) en metano (CH_4) y en dióxido de carbono (CO_2), esta etapa es denominada metanogénesis y es el tercer y último paso en el proceso de producción del CH_4 y CO_2 . La formación del metano puede realizarse a través de dos rutas metabólicas, la primera es la llamada metanogénesis acetoclástica, en la cual se produce metano a partir de la degradación del ácido acético por acción de los microorganismos metanogénicos aceto-fílicos; la segunda ruta es la denominada metanogénesis hidrogenófila, la cual genera metano a partir del H_2 y del CO_2 , esta última es energéticamente más favorable que la primer ruta y es llevada a cabo por los microorganismos metanogénicos hidrógeno-fílicos. En esta fase la producción de metano y de ácido se lleva a cabo simultáneamente,

aunque la velocidad de formación de los ácidos es considerablemente más reducida. (Lopez, 2018)

Debido a la formación de CH_4 y CO_2 a partir de los ácidos y del gas de hidrogeno, el pH del lixiviado subirá a valores más neutros, entre 6,8 y 8. A su vez, las concentraciones de DBO_5 y DQO y el valor de conductividad del lixiviado se verán reducidos. Al subir el valor del pH del líquido lixiviado disminuirá la cantidad de constituyentes inorgánicos presentes en la disolución, por lo que la concentración de metales pesados también se verá reducida.

Los principales productos en esta fase son el CH_4 y el CO_2 , este último en menor medida pero con valores muy cercanos uno respecto del otro (entre un 60% y 40% respectivamente). La duración de esta fase puede ser de entre 2 a 5 años, dándose la mayor generación de CH_4 y CO_2 en los primeros años. (Lopez, 2018) (SPA-Módulo3)

Fase 5. Fase de maduración: Su comienzo se da luego de que el material inorgánico biodegradable se convierte en CH_4 y CO_2 . Durante esta fase la velocidad de generación del gas dentro del relleno sanitario disminuye notablemente, ya que la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores y los sustratos que permanecen en el relleno son de una degradación lenta. El pH se mantiene constante entre 6 y 8 y la duración de esta fase puede ser de 25 años o más desde la clausura del módulo o relleno dependiendo de la humedad.

Pueden encontrarse pequeñas cantidades de nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2) en la mezcla de gas. (Lopez, 2018) (SPA-Módulo3)

Las reacciones químicas descritas son exotérmicas; más las aerobias iniciales que las anaerobias, que se suceden después en las fases acidogénica y metanogénica. En todo caso, la temperatura puede alcanzar los 71°C en las aerobias y 21°C en las anaerobias. (Garcia)

Cada una de las fases anteriormente descritas queda representadas en la siguiente *Imagen 11* obtenida del libro *Gestión de Residuos Sólidos – Tchobanoglous, Theisen & Vigil*.

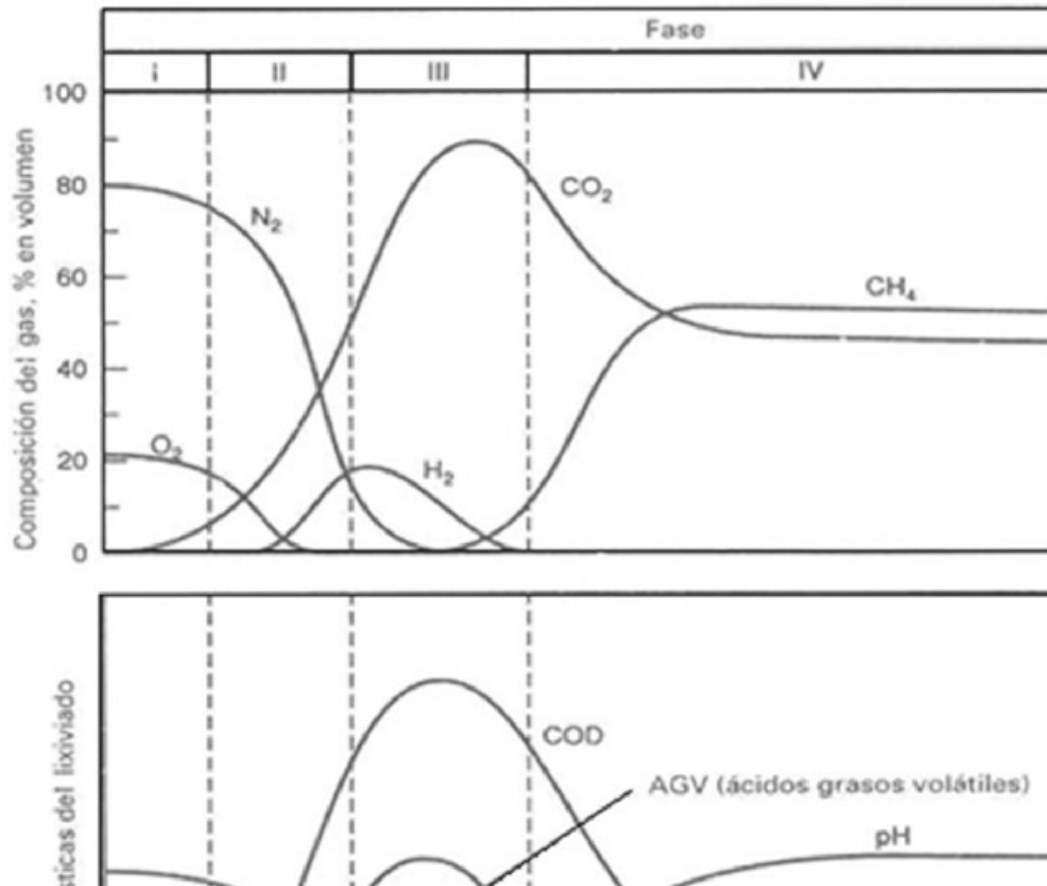


Imagen 11. Generación de Gases en Rellenos Sanitarios en sus 5 Fases (George Tchobanoglous, 1982)

El tiempo de duración de cada fase variara según:

- La distribución de los componentes orgánicos en el relleno
- La disponibilidad de nutrientes
- El contenido de humedad de los residuos
- El paso de la humedad por el relleno
- El grado de compactación inicial

La generación del gas dentro del relleno podría disminuir debido a no tener la suficiente humedad disponible, ya que, por un posible incremento de la densidad de material dispuesto en el relleno se provocaría una reducción en la posibilidad de que la humedad alcance todos los sectores donde se encuentren

depositados los residuos, y esto a su vez desencadenaría en un descenso en la velocidad de bioconversión y en la producción de gas. (Lopez, 2018)

4.1.1. Periodo y Tasa de generación

Tanto la tasa como el volumen de producción dependen de las características de los residuos sólidos dispuestos y de las condiciones específicas que prevalecen dentro del relleno sanitario. Como fue mencionado anteriormente, la generación de biogás posee un periodo de retardo de varios meses donde los volúmenes de producción más intensos pueden registrarse durante los primeros 5 años de vida del relleno, aunque su mayor generación se va a dar durante los primeros 20 años luego de la clausura del módulo o relleno. La producción de gas durante los primeros 20 años luego de la clausura del relleno queda representada en la *Imagen 12*. A medida que pasan los años, luego de la clausura, la producción ira disminuyendo pero se mantendrá continua indefinidamente. (SPA-Módulo3)

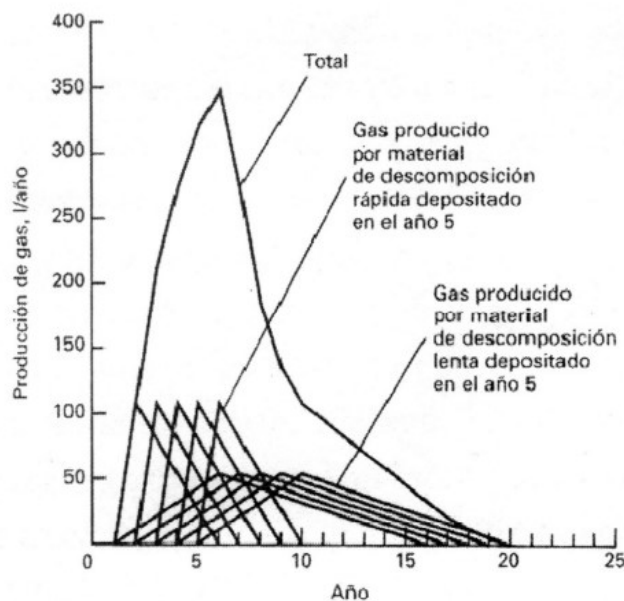


Imagen 12. Producción de gas de Relleno Sanitario durante los primeros 20 años luego de la clausura - (INTI, 2020)

4.1.2. Factores Ambientales

Al ser un proceso biológico realizado por microorganismos se tienen que tener en cuenta distintos parámetros o factores ambientales que afectan tanto su crecimiento como su reproducción, estos son:

- ✓ Humedad (75% óptimo): Se requiere un valor alto de humedad ya que las reacciones metabólicas se desarrollan en medio líquido, y además, este grado de humedad permite también una distribución homogénea de nutrientes y microorganismos.
- ✓ pH (6,5 a 7,5 óptimo): A pesar de que cada uno de los grupos de microorganismos que toman parte en el proceso anaerobio tiene un rango propio de pH óptimo, el proceso se desarrolla correctamente si el pH está próximo a la neutralidad.
- ✓ Poder Buffer (3 g/L CaCO_3 óptimo): Es la capacidad que tiene un sistema de amortiguar la modificación del pH, la principal sustancia que amortigua estas modificaciones es el bicarbonato.
- ✓ Potencial RedOx (-350 mV óptimo): Es un indicador de la presencia/ausencia de oxígeno, la digestión anaerobia se desarrolla en un ambiente fuertemente reductor (ausencia de oxígeno).
- ✓ Nutrientes: El proceso anaerobio requiere pocos nutrientes debido a la baja producción celular.
- ✓ Estabilidad, inhibición y toxicidad: Se requiere que las etapas que conforman el proceso de generación de gas se desarrollen encadenadamente y a velocidades similares. Las concentraciones elevadas de determinadas sustancias (NH_3 , H_2S , metales pesados, desinfectantes, etc.) podrían provocar fenómenos de inhibición y/o toxicidad.

- ✓ Temperatura: El proceso anaerobio se puede desarrollar en tres rangos de temperaturas: psicrófilo, mesófilo y termófilo; en general se puede afirmar que a mayor temperatura mayor velocidad de proceso, no obstante, es aconsejable que la temperatura sea próxima a la óptima en cada uno de los rangos:
 - Psicrófilo: Temperatura óptima = 20 °C
 - Mesófilo: Temperatura óptima = 37 °C
 - Termófilo: Temperatura óptima = 55 °C

- ✓ Tiempo de retención: Se define como el tiempo que el sustrato (residuo) pasa dentro del relleno, sometido a la actividad de los microorganismos. Por lo tanto, a mayor tiempo de retención más degradación de la materia orgánica y mayor generación de biogás.

- ✓ Agitación: Es importante que exista contacto entre los microorganismos y el residuo para que se desarrolle el proceso, por lo tanto, la agitación debe de ser suficientemente energética para generar una mezcla homogénea pero no ha de ser tan intensa que rompa los agregados bacterianos. Esta puede ser mecánica o neumática mediante la compresión e inyección del biogás generado. (Bonmatí, 2008)

5. Gases de Efecto Invernadero

“El efecto invernadero es un proceso natural por el cual los gases que están presentes en la atmósfera “atrapan” la radiación que la Tierra emite al espacio. Esta emisión de la Tierra es producto del calentamiento de su superficie por la incidencia de la radiación solar. Así, el efecto invernadero hace que la temperatura media de la Tierra sea de alrededor de 33 °C más que si este proceso no ocurriera (la tierra se mantiene a una temperatura promedio de 15°C, si este fenómeno no existiera la temperatura promedio sería de unos -18°C).” (SAyDS, 2019)

Una fracción de la energía recibida por el sol es absorbida por la superficie terrestre, los océanos y los hielos; mientras que otra es devuelta hacia la atmosfera en forma de energía infrarroja, la cual es retenida

momentáneamente por los gases denominados Gases de Efecto Invernadero (GEI); estos son: el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y otros gases, como los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC), el óxido nitroso (N₂O) y el hexafluoruro de azufre (SF₆), entre los más importantes. En la *Tabla 7* quedan representados los principales gases de efecto invernadero con sus respectivos potenciales de calentamiento global.

Se debe resaltar que el vapor de agua también posee la capacidad de retener la energía infrarroja y contribuye de forma importante al efecto invernadero, pero este no es considerado un GEI debido a que su concentración no varía debido a las actividades antrópicas. (SAyDS, 2019)

Tabla 7. Potencial de Calentamiento Global de los principales GEI (SAyDS, 2019)

Gas	Fuente Emisora	Persistencia de las moléculas en la atmósfera (años)	Potencial de Calentamiento Global (PCG) Horizonte de tiempo: 100 años
CO₂ DIÓXIDO DE CARBONO	Quema de combustibles fósiles, cambios en el uso del suelo, producción de cemento	Variable	1
CH₄ METANO	Quema de combustibles fósiles, agricultura, ganadería, manejo de residuos	12±3	21
N₂O ÓXIDO NITROSO	Quema de combustibles fósiles, agricultura, ganadería, cambios en el uso de la tierra	120	310
PFC PERFLUOROCARBONOS	Producción de aluminio, solventes y productos contra incendios	2.600-50.000	6.500-9.200
HFC HIDROFLUOROCARBONOS	Refrigeración y aire acondicionado, productos contra incendios y aerosoles	1,5-264	140-11.700
SF₆ HEXAFLUORURO DE AZUFRE	Aislantes térmicos	3.200	23.900

El aumento de los GEI en la atmósfera acelera el cambio climático global. Cuando nos referimos al cambio climático hablamos de una variación significativa en los componentes del clima cuando se comparan periodos prolongados, pudiendo ser décadas o más. (INTI, 2020)

Algunos de estos gases se encuentran de forma natural en la atmósfera, pero el problema radica en el exponencial incremento de sus niveles y también la presencia de otros gases de origen antropogénico como resultado de actividades vinculadas a: la generación de energía, el transporte, el uso del suelo, la industria, el manejo de los residuos, entre otras acciones. (INTI, 2020)

A continuación, en la *Imagen 13*, se muestran los resultados del inventario de GEI de la República Argentina correspondientes al tercer Informe Bienal de Actualización (BUR) desarrollado en 2018-2019

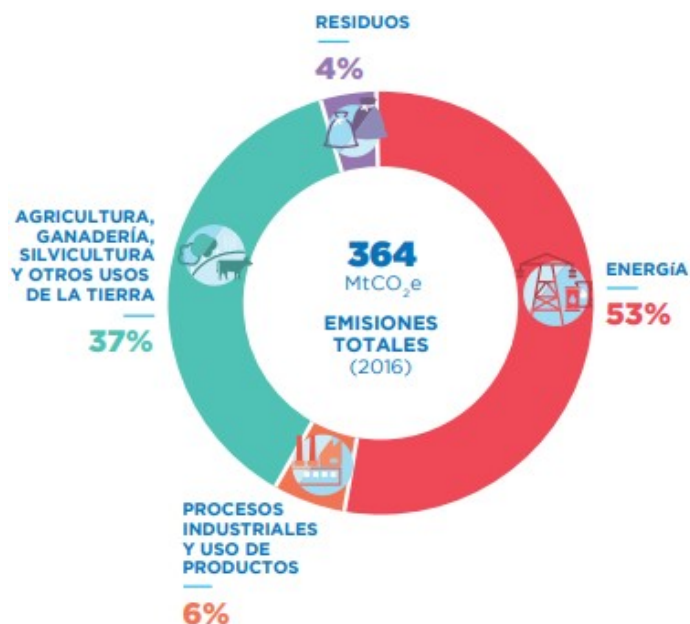


Imagen 13. Inventario GEI República Argentina 2019 (SAyDS, 2019)

5.1. Sector Residuos

En este sector se incluyen las emisiones GEI que se generan debido a la disposición, tratamiento y gestión de los residuos sólidos y de aguas residuales. En el último inventario GEI, realizado en 2019, se detectó que un 4,2% de los 364,43 MtCO₂e emitidos corresponden a los residuos, siendo un total de 15,44 MtCO₂e, de los cuales 9,12 MtCO₂e (58,9%) provienen de la eliminación de los residuos sólidos, 6,32 MtCO₂e (40,9%) de aguas residuales; esto incluye tanto aguas residuales domésticas como industriales, y solo un 0,2% proveniente de la incineración de los residuos. (SAyDS, 2019)

Es importante destacar que el sector de residuos ocupa el 2do lugar en cuanto a cantidad de CH₄ emitido, esto indica que a partir de la descomposición anaeróbica microbiana de los RSU se produce una notable cantidad de CH₄.

El metano es el principal gas producido por la descomposición de la fracción orgánica de los residuos en un relleno sanitario, así como también es un GEI 21 veces más potente que el CO₂. (Weihs-Biogas)

Las características principales del metano son: es un gas incoloro, inodoro e insípido, es más ligero que el aire, relativamente insoluble en agua y altamente explosivo (mezclado con el aire en proporciones de entre 5 y 15%); dentro de lo que son los impactos y riesgos se destacan la asfixia por metano y CO₂ en espacios cerrados, y daños en la vegetación, principalmente en el desarrollo de las raíces. (Weihs-Biogás)

La fuente más importante de metano es la descomposición de la materia orgánica presente en sistemas biológicos, entre estas actividades se destacan:

1. Actividades agrícolas
2. Disposición de residuos sólidos
3. Tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas e industriales.

El CO₂ y el CH₄ conforman cerca del 95% de la composición del gas generado en los rellenos sanitarios debido a la descomposición de la fracción orgánica presente en los residuos, este gas también es denominado como biogás y existen distintos sistemas aplicados para controlar tanto las migraciones, olores y emisiones provocadas; y para proteger tanto las aguas subterráneas como disminuir la tasa de GEI emitidos a la atmósfera. (Weihs-Biogás)

6. Sistemas de captación de biogás

Las razones principales de captar o recuperar el biogás de los rellenos sanitarios pueden radicar en la recuperación para el control ambiental del gas, donde se consideran métodos como la quema del gas colectado por medio de quemadores, la dilución y la dispersión natural (no se realiza combustión); y una segunda razón se basa en el aprovechamiento del contenido energético del gas, en este caso se plantean métodos para la recuperación y utilización del metano teniendo en cuenta el adecuado sellado y eficaz aislamiento del terreno circundante y del agua. (SPA-Módulo3)

Los objetivos de diseñar de forma apropiada un sistema de captación de biogás pueden resumirse en: Controlar adecuadamente el gas generado en el relleno a fin de evitar su dispersión y migración del mismo, ya que podrían originarse situaciones potencialmente peligrosas debido a las características del gas

como lo es el riesgo de inflamación y la potencial causa de asfixia. Al mismo tiempo se debe de tener un mayor control en las emisiones de GEI y de posibles pérdidas o migraciones, un control de los olores generados, mantener la estabilidad del relleno sanitario, proteger las aguas subterráneas de una posible contaminación, cumplir con la legislación o normativas vigentes, y maximizar la colección de biogás para la recuperación de energía. (Weihs-Biogas) (SPA-Módulo3)

Existen dos métodos para captar y controlar el biogás; el método activo y el método pasivo. En el primer caso se emplean equipos de extracción, los cuales generan la diferencia de presión necesaria para evacuar el biogás del interior del relleno sanitario, estos equipos son denominados aspersores (bombas, sopladores) y crean un vacío parcial en el sistema de llaves y colección el cual permite la extracción del gas. El segundo caso no requiere del sistema de aspersores para extraer el gas del relleno, si no que el gas es drenado mediante la implementación de chimeneas que otorgan un paso de baja pérdida de carga para el biogás. En caso de utilizar el biogás para el aprovechamiento energético se debe de considerar aplicar sistemas activos. (SPA-Módulo3) (Arriaza, 2016)

Entre los componentes de un sistema de captación de biogás activo se pueden destacar: El pozo de captación o extracción (pueden ser verticales o colectores horizontales), el cabezal del pozo de captación, una tubería lateral, el colector, un cárcamo de condensado, una tubería principal y una estación de captación y tratamiento (puede incluir una estación de quemado). (Weihs-Biogas)

6.1. Pozos de extracción Verticales

Los pozos verticales son considerados como el método que comúnmente más se utilizan para la captura del biogás dentro de un relleno sanitario, estos se instalan espaciados estratégicamente dentro de las áreas de disposición existentes o en operación, los materiales de construcción deben de poseer una elevada permeabilidad a través de los cuales el gas pueda circular, y para su aplicación se establece que la profundidad ideal de los residuos dentro del relleno debe de ser mayor o igual a los 10 metros. El gas se extrae de los

pozos a través de un sistema de tuberías y se utiliza una bomba de succión para extraer el mismo del relleno sanitario. (Weihs-Biogas) (SPA-Módulo3)

Los pozos se construyen de forma progresiva colocando grava alrededor de la tubería colectora de gas, esto tiene por finalidad formar una zona altamente permeable para la colección del gas por medio de la tubería. La grava se cubre con un sello ajustado de gas y con una barrera de suelo con el objetivo de impedir la entrada del aire externo en el pozo, el cual diluiría el gas recolectado, reduciría su poder calorífico y su purificación se haría más compleja. En las siguientes imágenes (*Imagen 14 e Imagen 15*) se pueden visualizar tanto la forma como la estructura de un pozo de extracción vertical. (SPA-Módulo3)



Imagen 14. Pozo de extracción vertical (Weihs-Biogas)

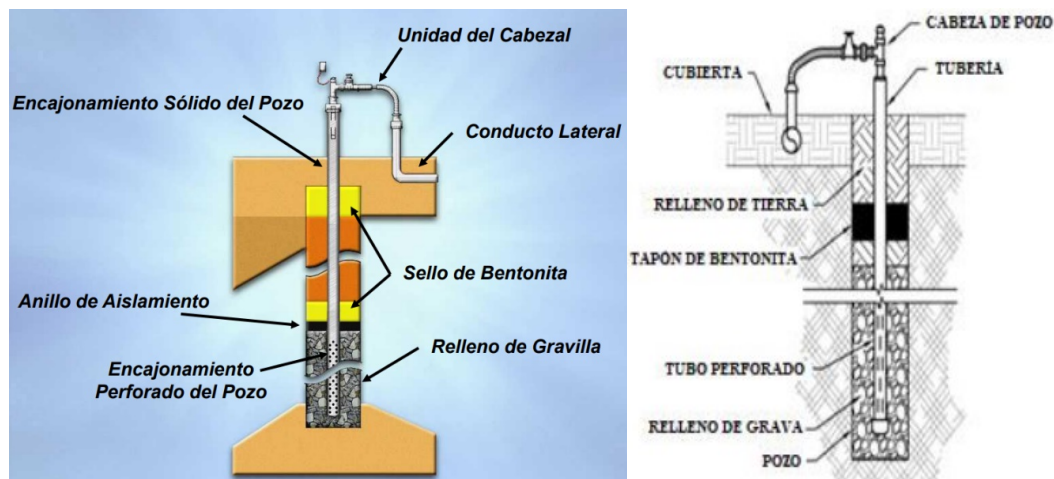


Imagen 15. Esquema de un Pozo de extracción vertical (MethaneToMarkets)

6.2. Colectores Horizontales

Un método alternativo para realizar la captura del biogás generado en un relleno sanitario es la utilización de colectores horizontales, estos son instalados en áreas donde los residuos son poco profundos, o también, donde los rellenos sanitarios no tienen una gran profundidad; estos colectores pueden ser instalados en áreas de disposición existentes o en áreas de operación; a su vez, pueden ser aplicados en rellenos sanitarios que posean altos niveles de lixiviados y su instalación puede llevarse a cabo conforme al avance del relleno sanitario en cuanto a su profundidad. En las siguientes imágenes (*Imagen 16* e *Imagen 17*) se pueden ver como son la estructura y componentes de los colectores horizontales y su instalación. (Weihs-Biogas)



Imagen 16. Colectores horizontales (MethaneToMarkets)

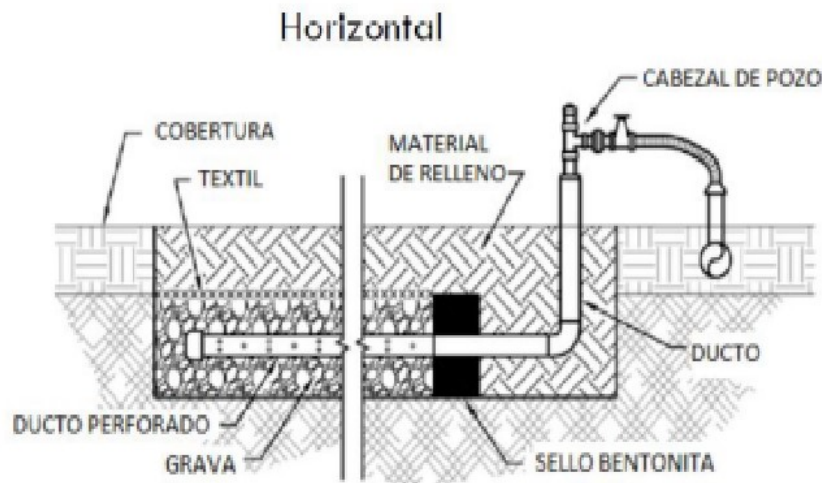


Imagen 17. Esquema de un Pozo de extracción horizontal (Weihs-Biogas)

6.3. Sistema Integral de Captación y Tratamiento de Biogás

Tanto en la extracción del biogás por medio de pozos verticales como por colectores horizontales se requiere que el sistema de captación de biogás posea los siguientes componentes:

❖ Cabezal del Pozo de captación:

Se encuentra situado en la parte superior de los pozos de extracción como se ve representado en la *Imagen 18*, permite controlar la extracción de gas y cumple las funciones de medir el caudal de gas de cada pozo, regular el flujo, eliminar el agua, monitorear tanto las presiones (mediante la utilización de manómetros) como la temperatura de gas (mediante sensores) y constituir un acople telescópico para considerar el movimiento de la superficie del relleno sanitario. Posee una válvula utilizada para regular la succión del gas la cual es resistente a los efectos ambientales. El material mayormente empleado es el polietileno (PE). (Arriaza D. A., 2016) (Weihs-Biogas)

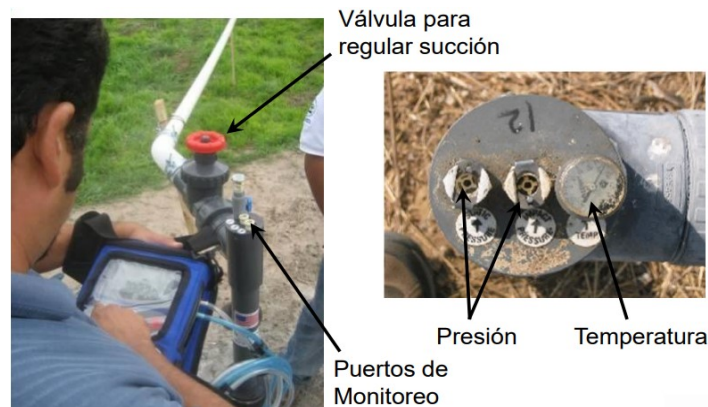


Imagen 18. Cabezal de Pozo (Weihs-Biogas)

❖ Tuberías Laterales:

Son las tuberías que conectan el pozo de extracción del gas con el colector, también son llamadas tuberías de interconexión (*Imagen 19*), su función es obtener vacío entre los pozos y conducir el biogás hacia el colector. Se debe de tener en cuenta en su diseño la pendiente y el diámetro de la tubería, el tendido directo cabezal-colector, válvulas, el ciclo de vida de la tubería y el condensado. En general las tuberías están hechas de polietileno de alta

densidad (HDPE) o de PVC (solo en tuberías por encima del suelo) ya que estos materiales presentan propiedades óptimas de resistencia mecánica y química. (Weihs-Biogás) (Arriaza D. A., 2016)



Imagen 19. Tuberías Laterales (Weihs-Biogás)

❖ Cárcamo de Condensado:

Podemos llamar como condensado al gas caliente que se produce debido a la descomposición de los residuos que se encuentra saturado de vapor y agua; es el líquido que se genera a partir del enfriamiento del vapor de agua contenido en la corriente de biogás. Las problemáticas que podrían darse a partir de un control deficiente de los líquidos condensados son: Posibles inundaciones y poco vacío en los pozos e incremento de los costos de operación. (Weihs-Biogás)

Para eliminar el condensado se utilizan trampas de condensado o cárcamos de condensado, las cuales son estaciones de almacenamiento y bombeo. Los esquemas de una trampa de condensado y de un cárcamo de condensado se pueden visualizar en la *Imagen 20* e *Imagen 21* respectivamente. (Arriaza D. A., 2016)

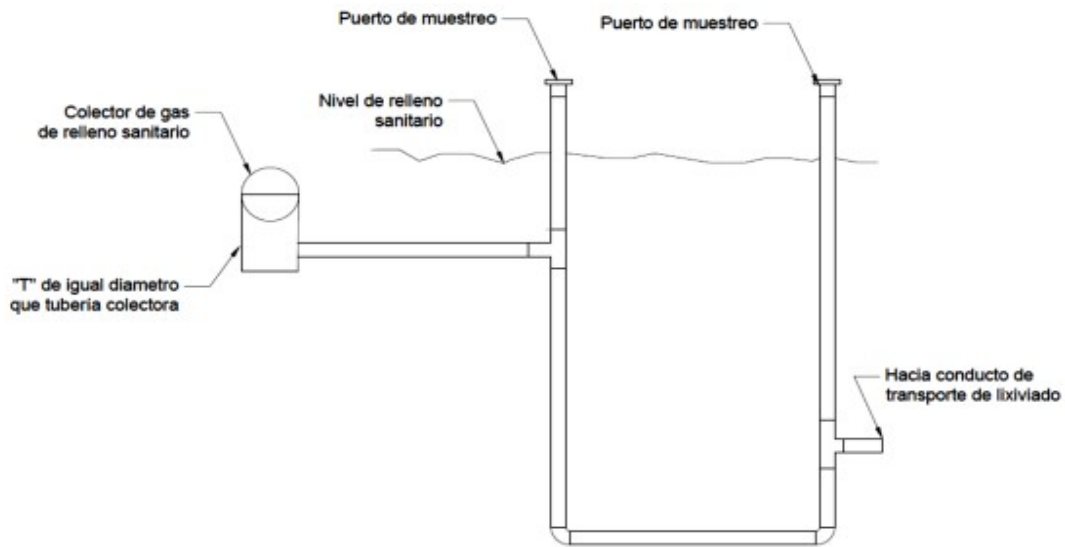


Imagen 20. Trampa de Condensado (Arriaza D. Á., 2016)

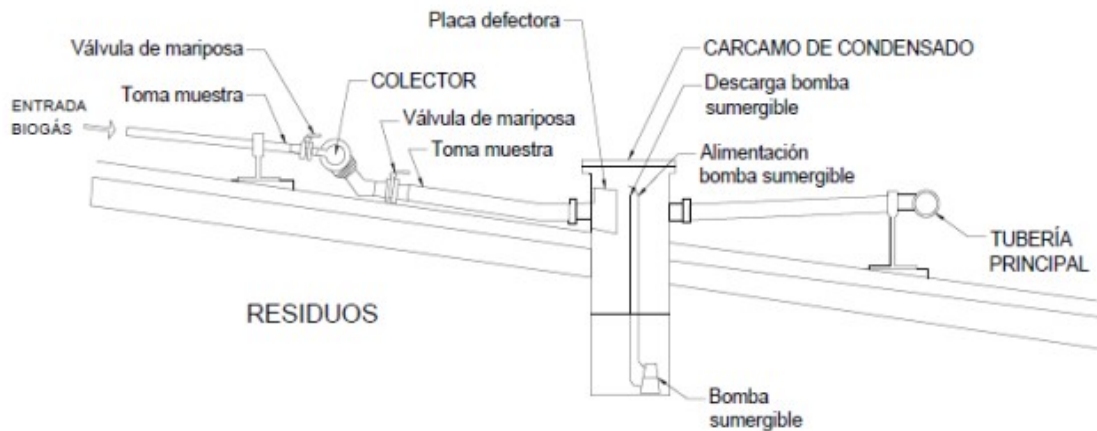


Imagen 21. Cárcamo de Condensado (Arriaza D. Á., 2016)

❖ Tubería Principal:

Su función es transportar el biogás desde el cárcamo de condensado hacia la estación de incineración o de aprovechamiento energético, como se puede ver en la *Imagen 22*, esta tubería posee un diámetro mayor que las tuberías laterales, a su vez, se deben de considerar para su diseño el tipo de válvulas, el manejo de las pendientes, los puntos de recolección del líquido condensado y el tipo de material de la tubería (generalmente PEAD).



Imagen 22. Tubería Principal (MethaneToMarkets)

6.4. Estación de Captación y Tratamiento

Una vez el gas llega a la planta o estación se efectúan distintos tratamientos que tienen por objetivo la eliminación del condensado y de humedad. Los componentes principales de una estación de captación y tratamiento son: bombas de succión e impulsión, un eliminador de humedad (Demister), una cámara de condensado, paneles de control operativo y de monitoreo, y antorchas de quemado o motores/turbinas para el aprovechamiento del biogás en la generación de energía eléctrica. (Weihs-Biogás)

6.4.1. Antorcha de quemado

Existen dos tipos de antorcha de quemado, la antorcha de tipo “cerrada” (

Imagen 23) y la de tipo “elevada” (

Imagen 23). En las antorchas del primer tipo la llama se encuentra encerrada dentro de la estructura de la antorcha, se pueden realizar distintas pruebas para obtener los índices de emisiones y generalmente ofrecen altas eficiencias de destrucción de los componentes orgánicos volátiles (COVs). En cambio, las antorchas de tipo “elevada” poseen una baja eficiencia de quemado pero son más fáciles de operar y poseen un menor costo en comparación con las antorchas “cerradas”. (Weihs-Biogás)



Imagen 23. Antorcha tipo “Cerrado” (Weihs-Biogas)



Imagen 24. Antorcha tipo “Elevado” (MethaneToMarkets)

6.4.2. Sistema de control y monitoreo

Existen dos tipos de monitoreo, el monitoreo de campo y el continuo. Los del primer caso son utilizados como puntos de chequeo en los pozos de extracción y en los colectores, son útiles para detectar posibles fallas en el sistema de captación del biogás y son aplicados para el control de las temperaturas, presiones y caudales. El sistema de monitoreo continuo realiza un seguimiento constante de la estación, captación y el tratamiento del biogás recolectado; se llevan a cabo controles de los caudales, temperaturas y composición del biogás tanto en la entrada como en la salida de la estación (post-tratamiento). (Weihs-Biogas)

En la siguiente *Imagen 25* queda representado el sistema de captación de biogás en su totalidad, desde que el gas se extrae desde los pozos ya sean verticales u horizontales, hasta su aprovechamiento o quema en antorchas.

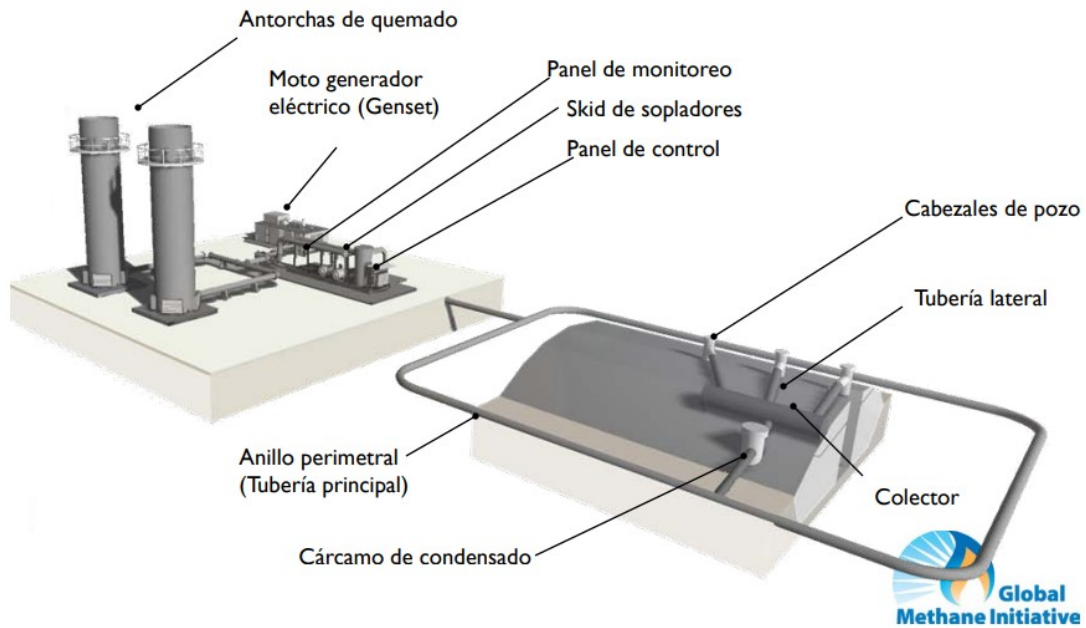


Imagen 25. Sistema integral de captación y tratamiento de biogás (MethaneToMarkets)

7. Aplicaciones y aprovechamiento del Biogás

Actualmente la principal fuente energética corresponde al uso de los hidrocarburos como combustibles, pero existen otras fuentes que comienzan a ser más relevantes en el sector energético, tal es el caso del biogás, el cual es una fuente energética generada de forma natural. El objetivo que posee un proyecto destinado al aprovechamiento energético de biogás proveniente de un relleno sanitario es convertir dicho biogás en energía útil. Dependiendo de su contenido de CH_4 y el caudal capturado puede ser utilizado en distintas aplicaciones, algunas de estas son: motores de combustión interna, turbinas, ciclos de cogeneración, entre otros. A su vez, captando, tratando, y aplicando el biogás compuesto principalmente por CH_4 y CO_2 contribuye a la mitigación de GEI en la atmosfera. (Carmona, 2020) (Arriaza D. A., 2016)

7.1. Usos del Biogás

Las aplicaciones que mayormente se destacan en la utilización del biogás son la producción de calor o vapor, la generación de electricidad y como combustible de vehículos.

7.1.1. Uso directo del Biogás

➤ BTU Medio (biogás tal cual es extraído)

El uso más simple del biogás es para la obtención de energía térmica (calor). Puede tener un uso doméstico, calefacción por calderas y cocción por hornos (en estos casos únicamente se requiere mantener la concentración de H_2S por debajo de los 100 ppm en el gas), a su vez, puede tener aplicación en incineradores de basura, en la producción de ladrillos y cemento, en la producción de calor de algunos procesos industriales, en invernaderos (por circulación normal de agua caliente o por calentamiento del aire), criaderos y para la evaporación de lixiviados (reduciendo los costos en su tratamiento). Generalmente contiene un 50% de CH_4 . (SPA-Módulo3) (MethaneToMarkets) (Carmona, 2020) (Moreno, 2011)

Uno de los usos más comunes es en hornos, en estos el gas es utilizado para calentar agua en un sistema de caldera ya sea para calefacción o calor de proceso (ejemplo de esto se da en la producción de cemento y asfalto). El sistema es relativamente simple ya que únicamente se requiere de la eliminación limitada de condensado y un tratamiento previo de filtración. Una desventaja con respecto a la utilización del biogás en la generación de energía eléctrica es que el precio de la energía térmica es menor y que además la distribución de energía eléctrica es más sencilla debido a la amplia distribución de líneas eléctricas con relación a lugares a donde existen calderas. (Carmona, 2020)

Utilizar el gas de medio BTU de manera directa es una forma relativamente simple y eficiente de aprovechar el biogás generado, teniendo en cuenta que el gas de medio BTU posee un potencial energético promedio debido a que la

concentración de CH₄ no es aumentada por ningún tratamiento de purificación. (Carmona, 2020)

- BTU Alto (requiere una purificación del biogás a niveles del gas natural de red, entre 92 y 99 % de CH₄)

El contenido calorífico y la calidad del gas crudo es menor en comparación con el gas natural, esto debido a las altas concentraciones de CO₂ y N₂ en el gas crudo, los cuales diluyen el poder calorífico del CH₄ de la mezcla de gas, al mismo tiempo, su composición y otras características pueden variar alterando su valor para calefacción, contenido de humedad y concentración de oxígeno. (SPA-Módulo3)

El gas al ser purificado puede ser utilizado para producir: el equivalente de gas de calidad de tubería (gas natural), Gas Natural Comprimido (GNC) o Gas Natural Licuado (GNL). El biogás al ser purificado y distribuido se descartaría la inversión en una planta de utilización, pero a cambio sería necesaria una gran inversión en plantas de purificación. Deben de eliminarse las partículas, líquidos, CO₂ y algunos componentes traza como el H₂S mediante procesos de tratamiento como la absorción química, la adsorción por oscilación de presión y la separación por membrana para poder inyectar el biogás a la red de gas natural. (Carmona, 2020)

7.1.2. Generación de energía eléctrica

La generación eléctrica es el uso más común para la utilización del gas de relleno sanitario, la mayoría de proyectos de aprovechamiento a nivel mundial utilizan motores de combustión interna, turbinas de gas o microturbinas, teniendo como principal ventaja que solo requieren tratamientos primarios para la remoción de partículas y concentraciones de H₂S y / o siloxanos en caso de que sus valores sean altos. (Carmona, 2020)

- Motores de Combustión Interna

Es considerada la tecnología de conversión más aplicada, consiste en un motor el cual funciona en conjunto con un generador eléctrico que produce energía.

Los costos son relativamente bajos, posee una gran eficiencia y existen motores y generadores de diferentes tamaños adecuados al flujo de biogás requerido o existente. El uso de biogás en estos sistemas requiere la remoción de H_2S (mantenerlo por debajo de los 100 ppm). (Carmona, 2020) (Moreno, 2011)

Generalmente estos motores han sido utilizados en rellenos donde la cantidad de biogás es capaz de producir de 800 kW a 3 MW o donde las tasas de flujo de biogás sostenibles a los motores son de aproximadamente 8,5 a 31,15 m^3/min a 50% de metano. Al hablar de eficiencia estos motores pueden variar en un rango de entre 25 a 40%, aunque en procesos de cogeneración se puede lograr un aumento en su rendimiento cuando el calor residual es recuperado para ser utilizado en otras aplicaciones. Una gran ventaja de esta tecnología es la capacidad de añadir o retirar motores según las tendencias de recuperación del gas. Dependiendo del motor que se utilice podrá requerirse o no un tratamiento secundario. (Carmona, 2020) (Arriaza D. Á., 2016)

Uno de los equipos utilizados para la generación de energía es el denominado CHP (*Combined Heat and Power*) el cual está compuesto por un motor de combustión interna, un generador eléctrico y un sistema de recuperación de energía termina del cuerpo del motor de combustión y de los gases de escape (*Imagen 26*). Para casos en donde la potencia es superior a los 400 kW la eficiencia de dicho equipo rondara entre 38 y 43%.



Imagen 26. Unidad de cogeneración energética CHP – Caterpillar (INTI, 2020)

- Turbinas de Gas

Las turbinas de gas han sido uno de los dispositivos más utilizados para producir energía eléctrica ya que pueden desarrollar elevadas potencias para

una relación de tamaño/peso muy elevada. Poseen un motor térmico el cual tiene la función de obtener un trabajo mecánico a partir de la energía liberada del proceso de combustión; sus principales componentes son: un compresor, una cámara de combustión y una turbina, estos componentes se encuentran interconectados entre sí. (Carmona, 2020)

Esta tecnología es aplicada en proyectos de recuperación de gran capacidad, donde el flujo de gas del relleno sanitario es superior a $36,8 \text{ m}^3/\text{min}$ (típicamente sobre los $113,25 \text{ m}^3/\text{min}$) con capacidad de generar una cantidad de energía superior a 3 MW (hasta unos 10 MW por turbina). Al hablar de costos se puede destacar que el costo de producción de energía disminuye con el aumento de la capacidad de la turbina, y a su vez, la eficiencia de generación eléctrica mejora. La eficiencia de estos equipos ronda entre un 20 y un 28% en plena carga, en cambio, en instalaciones de cogeneración en donde se recupera calor residual del escape de la turbina para ser aplicado en otro proceso puede alcanzarse una eficiencia cercana al 40%. (Carmona, 2020) (Arriaza D. Á., 2016)

Las turbinas son más resistentes a la corrosión y tienen menores emisiones de NO_x a la atmosfera que los motores de combustión interna, son más compactos y sus costos tanto de operación como de mantenimiento son menores. A su vez, se exige un mayor tratamiento del biogás para ser aplicado en esta tecnología. (Arriaza D. A., 2016)

- Microturbinas

Las microturbinas son aplicadas generalmente en rellenos donde la producción y captura del biogás es baja y el porcentaje de CH_4 en la mezcla de gas es menor al 50%. Mayormente el costo de producción de kW en estos equipos es superior al de los motores de combustión interna, pero este valor puede ser reducido utilizando microturbinas de mayor capacidad que ofrecen mayor eficiencia. Además, posee las siguientes ventajas con respecto a los motores: Operan con menores caudales, pueden operar con diversos tipos de combustibles tales como gas natural, diésel, gasolina y biogás de bajo poder calorífico (35% de CH_4), generan bajas emisiones de NO_x y se puede agregar

o quitar unidades frente a cambios en la tasa de generación de biogás. La eficiencia de conversión eléctrica de estos equipos ronda entre un 25 y 30%. (Arriaza D. Á., 2016) (Carmona, 2020)

El volumen de biogás desde el cual puede considerarse la utilización de microturbinas como una alternativa de aprovechamiento es inferior a 8,5 m³/min. Usualmente las microturbinas vienen en tamaños de 30, 70 y 250 kW y es necesario la remoción de contaminantes del biogás con tratamientos primarios. (Carmona, 2020)

Tabla 8. Comparación entre las tecnologías de generación eléctrica

Tecnología	Rango típico de flujo (m³/min)	Capacidad de generación de energía	Poder calorífico del CH₄ requerido	Eficiencia de conversión eléctrica (%)
Motores de combustión interna	8,5 a 36,8	800 kW a 3 MW	50%	25 a 40
Turbinas de gas	> 36,8 (valor típico: 113,25)	> 3 MW	50%	20 a 40
Microturbinas	< 8,5	30, 70 Y 250 kW	35%	25 a 30

7.2. Tratamiento del biogás

El biogás no es absolutamente puro, ya que posee partículas y trazas de otros gases. Todas estas impurezas tienen que ser removidas dependiendo del tipo de aplicación que tendrá el biogás; ya sea para la producción de calor, electricidad o para la inyección de gas natural a la red. La limpieza del biogás a su vez depende de las características propias del sitio de captura. (Carmona, 2020) (Moreno, 2011)

Los principales tratamientos se enfocan en la eliminación del exceso de humedad, de partículas y de otras impurezas. La tecnología de aprovechamiento disponible indicara el tipo y la rigurosidad del tratamiento a

realizar. La purificación del biogás es importante por dos razones: Para aumentar el poder calorífico del biogás y, cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones de gas (motores, turbinas, calderas, vehículos, etc.). (Moreno, 2011) (Carmona, 2020)

Compuestos que pueden causar problemas en los equipos:

- Equipos de producción de calor y energía (calderas): Sulfuro de hidrogeno, partículas y siloxanos; causan corrosión y obstrucción de algunas pizas como las tuberías. En calderas de uso industrial las partículas y los siloxanos pueden causar menos problemas de obstrucción.
- Turbinas y microturbinas: Flexibles en su funcionamiento y tolerantes a los compuestos traza. A su vez, la aplicación de estos equipos demanda una determinada calidad del contenido de humedad en el biogás, ya que en la utilización de dichas tecnologías el biogás a aprovechar se comprime.
- Motores de combustión interna: Se ajustan a diferentes composiciones de biogás, pero el sulfuro de hidrogeno (H_2S) y los solixanos pueden llegar a generar problemas.
- Inyección de gas natural a la red o uso vehicular: Se requiere que el biogás posea un alto contenido energético, por lo cual es necesario eliminar el CO_2 presente en el mismo. Otras impurezas que pueden llegar a generar problemas de obstrucción y corrosión en los componentes, ya sean del vehículo o de las tuberías de transporte del gas, son el agua y el H_2S . (Carmona, 2020)

Los sistemas de tratamiento del biogás pueden ser clasificados en primarios y secundarios.

Los sistemas primarios acondicionan el biogás eliminando principalmente a las partículas, la humedad y otras impurezas; generalmente incluyen procesos de

enfriamiento y/o compresión por medio de los cuales se modifican los parámetros que afectan la solubilidad del agua en el gas. (Carmona, 2020)

Los sistemas de tratamiento secundario proveen una limpieza mayor del gas, aplicando dichos tratamientos se eliminan compuestos que los tratamientos primarios son incapaces de eliminar, estos pueden ser compuestos sulfurados y siloxanos (aumentan los efectos de la corrosión y erosión). Se pueden emplear múltiples procesos de limpieza, con tratamientos físicos y químicos. Los sistemas de tratamiento secundarios más empleados son la adsorción y la absorción. La adsorción es un proceso mediante el cual los contaminantes se adhieren a la superficie adsorbente como el carbón activado o gel sílice. La absorción elimina los compuestos al introducir un solvente o reactivo sólido que produce una reacción física / química. (Carmona, 2020) (Arriaza D. A., 2016)

7.2.1. Remoción del Dióxido de Carbono (CO₂)

La remoción del CO₂ no es necesaria para la mayoría de las aplicaciones más sencillas, como es en calentadores, motores de combustión interna o sistemas generadores, en estos casos el CO₂ simplemente pasa a través del quemador o motor. (Moreno, 2011). Pero, como fue mencionado anteriormente, para inyectar biogás a la red de gas natural se requiere que el mismo posea un alto contenido de CH₄ (mayor poder calorífico) eliminando principalmente el CO₂ presente. Para esto se necesitan aplicar sistemas de tratamientos avanzados que puedan garantizar un contenido de CH₄ mayor al 95%. El CO₂ puede removerse del biogás a partir de procesos de adsorción, absorción, separación por membrana y purificación criogénica. (Moreno, 2011) (Carmona, 2020).

Procesos de Absorción

El CH₄ y el CO₂ presentan afinidades distintas a diversos líquidos. En el agua, como agente de lavado, los componentes ácidos del biogás tales como CO₂, son disueltos más fácilmente que los componentes hidrofóbicos apolares tales como los hidrocarburos. El agua caliente presurizada y otros solventes orgánicos (polietilenglicol) pueden utilizarse como medio absorbente. (Moreno, 2011)

- ❖ Lavado con agua: Método de absorción en el que un flujo de biogás a alta presión ingresa en una columna de absorción donde el CO₂ y otras impurezas como el H₂S se eliminan mediante dilución en agua que cae desde la parte superior del recipiente en la dirección opuesta al flujo del gas. El CH₄ no es eliminado ya que posee una menor capacidad de dilución que los demás compuestos. El agua utilizada es eliminada en un recipiente separado para volver a utilizarse, logrando que este sistema sea un circuito cerrado que se mantiene bajo el consumo del agua. Los factores críticos en este método son el pH, la presión y la temperatura. Para elevar el lavado de CO₂ se deberá aumentar la presión, disminuir la temperatura y mantener un pH alcalino. (Carmona, 2020) (Moreno, 2011)

- ❖ Lavado con solventes orgánicos: Posee un mecanismo similar al lavado con agua, es un proceso de absorción física en la que tanto el CO₂ como el H₂S son más solubles que el CH₄ en algunos solventes orgánicos tales como el polietilenglicol. En comparación con el agua, el solvente aumenta las tasas de absorción de CO₂ y, por lo tanto, permite disminuir las tasas de circulación de líquido de absorción. Los sistemas que utilizan este tipo de solventes orgánicos pueden remover el CO₂ del biogás hasta valores por debajo del 0,5 %. Además, la humedad, el H₂S, y los NMOC también se eliminan cuando se lava el biogás en un solvente como el Selexol. Este tipo de lavado es mucho más costoso que los sistemas de lavado con agua (Carmona, 2020) (Moreno, 2011)

Procesos de Adsorción

Permiten obtener un metano muy puro aplicando ciertas presiones; los gases tienden a ser atraídos hacia superficies sólidas como el carbón activado, tamices moleculares de carbón o zeolitas. Mientras mayor sea la presión, mayor cantidad de gas será adsorbido. Este proceso puede utilizarse para separar gases en una mezcla, debido a que los diferentes gases tienden a ser atraídos con mayor o menor afinidad en diferentes superficies sólidas. (Moreno, 2011)

- ❖ Tamiz molecular o adsorción por oscilación de presión: Se aplican procesos de tamiz molecular absorbentes especiales aplicando carbón activado; al emplear este tipo de tratamiento los compuestos gaseosos son retenidos en la superficie de los sólidos (adsorbentes) y quedan atrapados por el tamaño de tamiz molecular. Una planta típica de tamiz molecular emplea etapas de compresión, eliminación de humedad y eliminación de H_2S . Además del CO_2 otras moléculas pueden ser co-adsorbidas (NH_3 y H_2O). El problema que posee este tipo de proceso es que puede llegar a no ser costo-efectivos debido a las altas temperaturas y presiones requeridas. (Carmona, 2020) (Moreno, 2011)
- ❖ Separación de membrana: Aprovecha las propiedades físicas de los gases y las diferentes permeabilidades de los compuestos de gas reteniendo los compuestos deseados y permitiendo el flujo de los demás. Los distintos compuestos atraviesan las membranas poliméricas a velocidades diferentes. Una planta típica de biogás emplea pasos de compresión, eliminación de humedad y eliminación de H_2S ; pero para eliminar los NMOC depende del carbón activado y para eliminar el CO_2 de las membranas. Tanto las membranas como los tamices moleculares dependen de las diferencias en la permeabilidad de los componentes individuales del gas a través de una membrana fina. (Carmona, 2020) (Moreno, 2011)

7.2.2. Remoción de agua

El biogás debe de poseer una humedad relativa inferior al 60% para prevenir la formación de condensado en las tuberías de transporte; este condensado, en combinación con otras impurezas, puede provocar la corrosión de las paredes de las tuberías. No toda la humedad del biogás generado en los rellenos sanitarios se retira en los cárcamos de condensado, por esta misma razón se emplean procesos de secado. El proceso de secado puede ser por compresión y/o enfriamiento del gas, por adsorción en carbón activado o por absorción en soluciones de glicol y sales higroscópicas. Generalmente se emplean separadores de humedad centrífugos como se muestra en la *Imagen 27*.

Puede ser empleado un desnebulizador para obtener una mayor eficiencia de secado. (Moreno, 2011) (Arriaza D. Á., 2016)

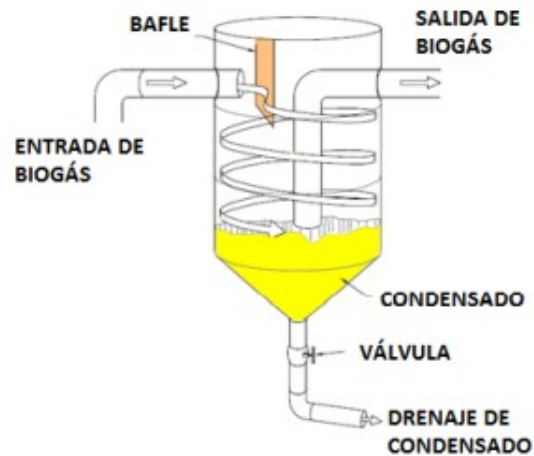


Imagen 27. Esquema de un separador de humedad centrífugo. (Arriaza D. Á., 2016)

7.2.3. Remoción del Sulfuro de Hidrogeno (H_2S)

El H_2S al combinarse con el vapor de agua en el biogás crudo puede formar ácido sulfúrico (H_2SO_4) el cual es corrosivo para motores y sus componentes, además, en concentraciones por encima de los 100 ppm en volumen el H_2S puede ser muy toxico. Para remover el H_2S del biogás puede utilizarse carbón activado convirtiendo el H_2S en azufre elemental (S); también puede removerse aplicando soluciones de NaOH, agua o sales de hierro y utilizando microorganismos los cuales oxidan biológicamente el H_2S . El óxido de hierro remueve el H_2S transformándolo en sulfuro de hierro. Este método puede ser sensible en presencia de un alto contenido de vapor de agua en el biogás. (Moreno, 2011)

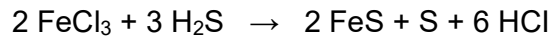
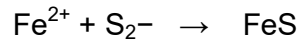
- Desulfuración Biológica

El uso de microorganismos en la remoción de H_2S presente en el biogás, se basa en la oxidación microbiológica de H_2S a compuestos de azufre de fácil eliminación, como azufre elemental (S) o sulfatos (SO_4^{2-}). El sulfuro de hidrógeno es absorbido en agua y es oxidado biológicamente. (Moreno, 2011)

Los principales microorganismos estudiados corresponden a los géneros Beggiatoa, Xanthomonas y, especialmente, Chlorobium, Thiobacillus y Sulfolobus. (Moreno, 2011)

- Precipitación de Sulfuros

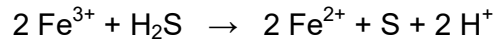
Los iones Fe^{2+} en la forma de cloruro de hierro (II) (FeCl_2) o los iones Fe^{3+} en las formas de cloruro de hierro (III) o sulfato de hierro (II) permiten la precipitación de azufre a una forma estable que permanece en el residuo.



Para la precipitación de sulfuros sólo se requiere un tanque de mezclado adicional y una bomba de dosificación. (Moreno, 2011)

- Absorción en solución férrica quelante

En las soluciones férricas quelantes, los iones de hierro (III) (Fe^{3+}) se reducen a iones Fe^{2+} , proceso en el cual, el H_2S se oxida a azufre elemental.



El equipo consta de un recipiente que contiene la solución de los agentes quelantes o ligandos con hierro (III) a una concentración de 0,01 a 0,05% en peso, en el cual se inyectan el biogás y el aire. Además, se requiere de un contenedor para la regeneración de los iones Fe^{3+} , en donde son regenerados mediante aire inyectado. El azufre elemental se concentra en el fondo del contenedor, por lo que tiene que ser removido con cierta frecuencia. (Moreno, 2011)

- Adsorción en carbón activado

En los casos en que la generación de biogás presente concentraciones de medias a altas de H_2S puede ser adsorbido utilizando carbón activado. En general, la eficiencia de la descontaminación por medio de esta técnica no es lo suficientemente alta, por esta misma razón, el carbón activado es impregnado con catalizadores para incrementar la velocidad de la reacción de oxidación del

H₂S a azufre elemental. Existen varios agentes catalizadores, algunos de estos son: el yoduro de potasio (KI), el carbonato de potasio (K₂CO₃) y el permanganato de potasio (KMnO₄). (Moreno, 2011)

7.2.4. Remoción de Oxígeno

Existen pocos casos en donde el biogás pueda llegar a poseer un alto contenido de oxígeno. En estos, el oxígeno en exceso puede ser eliminado mediante procedimientos de desulfuración, a su vez, puede reducirse este valor aplicando procesos de adsorción con carbón activado o tamices moleculares. (Moreno, 2011)

Es importante destacar que para seleccionar el sistema o la tecnología de aprovechamiento de biogás es necesario conocer el flujo de biogás (el cual puede ser estimado a partir de los modelos matemáticos como el LandGEM). En base a los rangos de flujo de biogás puede determinarse el tipo de tecnología a aplicar para aprovechar el biogás generado. En la siguiente *Imagen 28* se detallan los distintos rangos de flujo del biogás con sus aplicaciones recomendadas, así como también los tratamientos requeridos.

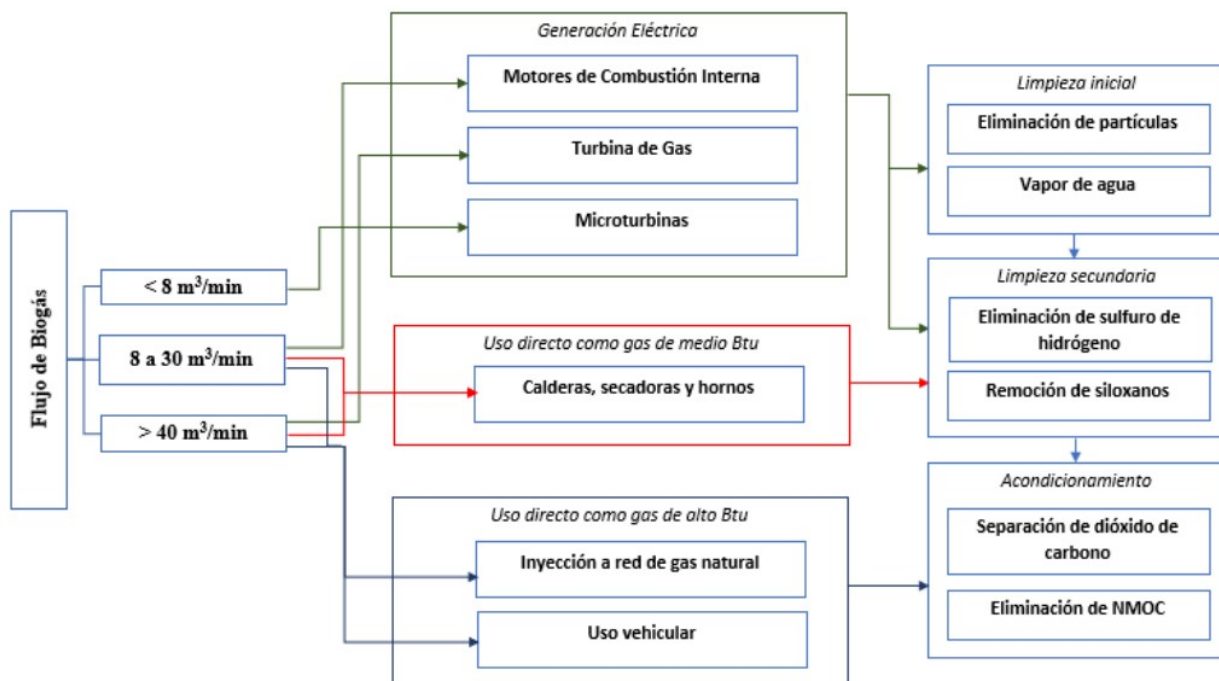


Imagen 28. Diagrama de selección de la tecnología de aprovechamiento y tratamiento requerido (Carmona, 2020)

Los tratamientos han sido clasificados en tres niveles o grupos teniendo en cuenta la complejidad de la tecnología requerida para la limpieza del gas.

Los equipos destinados para la generación eléctrica como las turbinas, motores de combustión interna y microturbinas son tolerantes a los compuestos traza, por lo que no es necesario llevar a cabo una limpieza exhaustiva. Únicamente requieren tratamientos primarios destinados a la remoción de condensado, disminución de humedad y filtración de partículas. Aunque existen casos en los cuales se requiere de la aplicación de tratamientos destinados a la remoción de siloxanos y compuestos sulfurados; generalmente se utilizan tratamientos de carbón activado para remover los componentes trazas del biogás. Este nivel o grupo se clasifica como *Grado bajo de energía*. (Carmona, 2020) (Arriaza D. A., 2016)

Equipos como calderas, secadoras y hornos destinados a la utilización directa del biogás como combustible, requieren una limpieza profunda, con el fin de

evitar la afectación de componentes como tuberías por acción del efecto corrosivo de compuestos como los siloxanos. Se aplican tratamientos secundarios como la compresión y refrigeración para deshidratar el biogás y tratamientos químicos para remover componentes traza como sulfuros, siloxanos y compuestos orgánicos volátiles. A este nivel se lo clasifica como *Medio grado de energía*. (Carmona, 2020) (Arriaza D. A., 2016)

En aplicaciones de uso vehicular o inyección a la red de gas natural, además de la eliminación de contaminantes por medio de tratamientos de limpieza primaria y secundaria se requiere incrementar el contenido de CH₄ elevando el contenido energético, haciéndose necesaria la eliminación del CO₂ y otros gases. Este grupo es clasificado como *Alto grado de energía*. (Carmona, 2020) (Arriaza D. A., 2016)

8. Modelos de estimación de producción de Biogás

Existen dos grupos de métodos para estimar la generación de biogás, estos son los modelos teóricos y la medición directa en campo.

Los modelos teóricos buscan representar los fenómenos químicos, físicos y biológicos que tienen lugar en el tiempo en que los residuos orgánicos se degradan. Estos modelos son ampliamente utilizados debido a la precisión en sus resultados. Actualmente existen modelos de estimación de primer y segundo orden, siendo ampliamente más utilizados los de primer orden por su facilidad. (Carmona, 2020)

En los modelos de primer orden se considera que los componentes orgánicos presentes en los residuos se descomponen lentamente durante unas pocas décadas desde que los residuos son dispuestos en el relleno sanitario generando CH₄ y CO₂ principalmente. En caso de que se mantengan

constantes las condiciones, el índice de producción de CH₄ dependerá únicamente de la cantidad de carbono disponible en los RSU. A partir de esto, la tasa de generación de CH₄ será mayor en los primeros años e ira decreciendo a medida que transcurra el tiempo. (INTI, 2020)

La medición directa se basa en la toma de datos, sin embargo, solo es válido para aquellas instalaciones que cuentan con un sistema de captación de biogás, cualquiera que sea su finalidad. (Carmona, 2020)

8.1. Modelos Teóricos

Existen varios modelos aplicados para calcular el potencial de recuperación de biogás, ya sea para planificar proyectos de aprovechamiento energético o simplemente incineración. (Arriaza D. Á., 2016)

Modelos más conocidos:

- Modelo Landfill Gas Emission Model – LandGEM - USEPA (USA, mexicano, centroamericano, colombiano).²
- Modelo Mexicano de Biogás, 2.0 – EPA.
- Modelo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC 2006).
- Modelo GasSim lite (UK)
- Modelo SWANA (asociación de residuos sólidos de Norteamérica).
- Modelo Scholl Canyon
- Modelo UNFCCC (Naciones Unidas)

La estimación de las emisiones de biogás resulta fundamental en un proyecto de aprovechamiento con el fin de evaluar tanto la viabilidad técnica como económica. Rellenos sanitarios con sistemas activos de extracción proveen información histórica de la captación de biogás y CH₄, pero, no proporcionan datos estimados sobre el potencial futuro de flujo. (Carmona, 2020)

El proceso de degradación de los residuos es un proceso complejo ya que los residuos depositados no son dispuestos de manera uniforme en todas las áreas del relleno, así mismo, influye la alta variabilidad espacial y temporal;

² El Modelo LandGEM fue el escogido para ser utilizado en el presente proyecto.

todos estos factores hacen que la estimación de la generación de biogás sea un proceso complejo. (Carmona, 2020)

Los propósitos por los cuales se aplican este tipo de modelos para estimar la generación de biogás son: Para determinar el tamaño de los sistemas colectores de gas, para realizar evaluaciones, proyecciones e identificar las alternativas más viables sobre el uso del biogás, y por propósitos regulatorios. (Weihs-Biogas)

8.1.1. Modelo Landfill gas emission model (LandGem)

El modelo LandGem fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para estimar la cantidad de biogás generado en los rellenos sanitarios en base a los datos aproximados de: la aceptación de residuos, la caracterización preliminar de residuos y las constantes de generación de metano. El modelo asume que no hay producción de biogás en el primer año después de ser dispuestos los residuos, a su vez, el modelo asume que la generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o al año siguiente, a partir de este valor la tasa decrece junto con la fracción orgánica de los residuos. El propio modelo se encuentra encuadrado en el programa de cálculo "Microsoft Excel". (Carmona, 2020) (Dávila, 2009) (Arriaza D. Á., 2016) (Glen Bryan Madrigal Perez, 2018)

LandGem utiliza la siguiente *Ecuación 3* de descomposición con cinética de primer orden para estimar las emisiones anuales durante un período de tiempo específico.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10}\right) e^{-kt_{ij}}$$

Ecuación 3. Cálculo emisiones anuales CH₄ - Modelo LangGEM

En donde:

\sum : suma desde el año de apertura +1 (i=1) hasta el año de proyección (n)

i=1: tiempo de incremento de cada año

n = (año de cálculo)-(año de inicio de disposición de residuos)

$j=0.1$: tiempo de incremento para cada año

QCH_4 : generación máxima de metano [m^3 / año]

k : índice de generación de metano [1 / año]

L_0 : generación potencial de metano [m^3 / Mg]

M_i : masa de residuos sólidos dispuestos en el año “i” [Mg]

t_{ij} : periodo en que los RSU depositados totales M_i : dispuestos en el año i, con incrementos j.

Índice de generación de metano k : Representa la tasa a la cual los desechos depositados en un relleno se descomponen y producen CH_4 . El valor k depende los siguientes parámetros específicos del relleno sanitario: El contenido de humedad residual, la disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano, el pH y la temperatura. De entre estos, el contenido de humedad dentro del relleno es uno de los parámetros más importantes que inciden en la tasa de generación del gas, ya que sirve como medio para el transporte de nutrientes y bacterias. El rango típico varía desde 0,01 a 0,10. (Carmona, 2020) (Dávila, 2009)

Las tasas de generación más altas están relacionadas a condiciones de humedad alta y a materiales fácilmente degradables, en cambio, las tasas más bajas están asociadas a la baja humedad y a materiales lentamente degradables. (INTI, 2020)

Masa de residuos sólidos dispuestos en el año M_i : El principal determinante en los modelos de estimación de biogás de primer orden son las tasas de eliminación de desechos. El presente modelo no realiza ajustes a las estimaciones anuales de eliminación de residuos para tener en cuenta la composición de los mismos. (Carmona, 2020)

Se tiene que tener en cuenta el historial de residuos dispuestos (pesos o volúmenes estimados), el índice de crecimiento para estimaciones futuras, la

disminución de la cantidad de residuos disponibles para la producción de biogás y en el caso de que los valores estimados de disposición provengan de los volúmenes se deberá considerar la densidad in-situ de los residuos. (Dávila, 2009)

Generación potencial de metano L_0 : Estima la cantidad de metano potencialmente producido por una tonelada de RSU cuando estos son degradados. El valor de L_0 se encuentra en función del contenido orgánico de los residuos. Debe de tenerse en cuenta que el peso húmedo medido no determina el valor de L_0 , sino que lo hace el contenido orgánico seco de los residuos, ya que el agua presente en los residuos no produce biogás. (Carmona, 2020) (Dávila, 2009)

El valor de L_0 puede ser estimado a partir del contenido de carbono y el factor de conversión estequiométrico tal como se indica en la siguiente *Ecuación 4*.

$$L_0 = (MFC) \cdot (DOC) \cdot (DOC_F) \cdot (F) \cdot \left(\frac{16}{12}\right)$$

Ecuación 4. Cálculo de la generación potencial de CH_4 (L_0)

En donde:

MFC: factor de corrección para el metano

DOC: fracción de carbono orgánico degradable

DOC_F: fracción de carbono orgánico degradado asimilado

F: fracción de metano en el biogás

16 / 12: constante estequiométrica

El factor **MFC** es un valor de ajuste para estimar la generación de biogás que el modelo tiene en cuenta ya que depende del grado de degradación anaeróbica de los RSU. Este depende de la profundidad y del tipo del relleno (controlado, no controlado, a cielo abierto, entre otros) y de las prácticas de gestión y

manejo asociadas al mismo. Los valores del factor MFC quedan representados en la siguiente *Tabla 9*. (Carmona, 2020)

Tabla 9. Valores estimados del parámetro MFC (Carmona, 2020)

Descripción del sitio	Profundidad < 5	Profundidad ≥ 5
No controlado	0,4	0,8
Controlado	0,8	1,0
Semi- aeróbico	0,4	0,5
Condición desconocida	0,4	0,8

Los valores del factor **DOC** dependen de la composición de los RSU, por lo tanto, puede tener variaciones acorde a cada relleno sanitario y de la región de un país. Su *Ecuación 5* es la siguiente:

$$DOC = 0,40(A) + 0,17(B) + 0,15(C) + 0,30(D)$$

Ecuación 5. Cálculo de la fracción de carbono orgánico degradable (DOC)

En donde:

- A:** porcentaje de los residuos que corresponde al papel, cartón y los textiles
- B:** porcentaje de los residuos que corresponde a los desechos de jardín y de los parques u otros desechos orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos)
- C:** porcentaje de los residuos que corresponde a alimentos
- D:** porcentaje de los residuos que corresponde a madera.

El parámetro **DOC_F** representa la porción de materia orgánica que es convertida en biogás, el cálculo del mismo está basado en un modelo teórico que varía únicamente con la temperatura en la zona anaeróbica del relleno sanitario. Su *Ecuación 6* es la siguiente.

$$DOC_F = 0,014 \cdot T + 0,28$$

Ecuación 6. Cálculo de la fracción de carbono orgánico degradado asimilado (DOC_F)

En donde la T corresponde a la temperatura [°C]

Los valores típicos de k van desde 0,02 para sitios secos a 0,047 para sitios húmedos. Las tasas más rápidas ($k = 0,2$ o una vida media cercana a los 3 años) están asociados a condiciones de gran humedad y de materiales altamente degradables, tal como, residuos alimenticios. Las tasas más lentas ($k = 0,02$ o una vida media de cercana a los 35 años) están asociados a condiciones de sequedad y de materiales lentamente degradables, tales como la madera o el papel. (Aguilar-Virgen, 2011)

Los valores teóricos de L_0 varían entre 6,2 y 270 m^3/ton de residuo, y los valores típicos de este parámetro se encuentran entre los rangos 125 y 310 m^3/ton de residuo. (Aguilar-Virgen, 2011)

Las emisiones de CH_4 pueden ser estimadas tomando como valores de $L_0 = 170 m^3/ton$ y $k = 0,05 1/año$ según la EPA; estos son los valores recomendados para países en desarrollo en los cuales la composición de los residuos posee una fracción alta de residuos orgánicos (alrededor del 50% en este caso). (Carmona, 2020)

III. Metodología

En el siguiente apartado se desarrollan los procedimientos necesarios para calcular la cantidad de biogás generada en los dos módulos del Relleno Sanitario del Partido de Necochea. Las cuestiones que se abordaran son:

1. Dimensiones establecidas para los módulos a construir
2. Etapa constructiva de los módulos
3. Desarrollo del cálculo de biogás aplicando el Modelo LandGEM
4. Estimación futura del biogás en base al crecimiento poblacional

1. Dimensiones de los Módulos

En el presente apartado quedaran descriptas las dimensiones de los 2 módulos que se pretenden construir en el Relleno Sanitario de la ciudad de Necochea, los cuales fueron mencionados en el *Capítulo Antecedentes*.

1.1. Dimensiones Módulo 1

El módulo 1³ estará compuesto por dos celdas de 70 m. x 50 m., las cuales estarán divididas por una berma central.

Volúmenes y Superficies

Largo total del módulo: **154 m**

Ancho total del módulo: **104 m**

Profundidad de la excavación: **4 m**

Cota de altura máxima de proyecto: **10 m**

Volumen total de residuos y coberturas intermedias: **120.000 m³**

Volumen de material de cobertura intermedia: **12.000 m³**

Volumen de residuos: **108.000 Tn**

Densidad proyectada para los residuos: **0,850 tn/m³**

Toneladas de residuos a disponer: **91.800 Tn**

Volumen de tosca necesario para taludes y cobertura intermedia: **40.000 m³**

Toneladas de tosca necesarias: **64.000 tn**

Toneladas de bentonita aproximadas: **1500 Tn**

Cantidad de Geomembrana necesaria: **25.000 m²**

1.2. Dimensiones Módulo 2

Este módulo se compondrá por dos celdas de 140 m. x 80 m. divididas por una berma central.

Volúmenes y Superficies

³ En la fecha que fue presentado el Anteproyecto (2015) ya se encontraba iniciado el trámite de EIA en la OPDS para la obtención de la Declaración de Impacto Ambiental.

Largo total del módulo: **208 m**

Ancho total del módulo: **160 m**

Profundidad de la excavación: **2 m**

Cota de altura máxima de proyecto: **+12 m**

Volumen total aproximado de residuos y coberturas intermedias: **220.000 m³**

Volumen de material de cobertura intermedia: **22.000 m³**

Volumen de residuos: **198.000 Tn**

Densidad proyectada para los residuos: **0,850 tn/m³**

Toneladas de residuos a disponer: **168.300 Tn**

Volumen de tosca necesario para taludes y cobertura intermedia: **70.000 m³**

Toneladas de tosca necesarias: **112.000 tn**

Toneladas de bentonita aproximadas: **3.000 Tn**

Cantidad de Geomembrana necesaria: **50.000 m²**

1.3. Dimensiones Totales

Volumen total aproximado de residuos y coberturas intermedias: **340.000 m³**

Volumen de material de cobertura intermedia: **34.000 m³**

Volumen de residuos: **306.000 Tn**

Densidad proyectada para los residuos: **0,850 tn/m³**

Toneladas de residuos a disponer: **260.000 Tn**

Volumen de tosca necesario para taludes y cobertura intermedia: **110.000 m³**

Toneladas de tosca necesarias: **176.000 tn**

Toneladas de bentonita aproximadas: **4.500 Tn**

Cantidad de Geomembrana necesaria: **75.000 m²**

2. Etapa Constructiva de los Módulos 1 y 2

La construcción de futuros módulos del relleno sanitario se realizará cumpliendo las siguientes cuestiones.

2.1. Acondicionamiento y nivelación de la base de la celda

La base de la celda contará con una pendiente del 3% hacia el centro, permitiendo el escurrimiento y la colección de los líquidos lixiviados en el dren central. (RELISA, 2015)

La aislación de la base y taludes estará constituida por una Barrera Compuesta.

Tanto la base como los taludes laterales serán impermeabilizados mediante:

1. Una capa de 0,60 m de suelo compactado mezclado con una fracción de bentonita para lograr alcanzar una permeabilidad vertical menor o igual a 1×10^{-7} .
2. Una geomembrana que cumpla con los Criterios de Diseño – Infraestructura Básica – Aislación de base y taludes laterales del recinto (2.2.3) de la **Resolución 1143/02**. La cual dispone lo siguiente:

Barrera Compuesta: *Consiste en un sistema de dos elementos: el elemento superior, que es una Membrana Flexible (Geomembrana), debe poseer como mínimo de 0,80 mm de espesor y el elemento inferior, debe estar formado por lo menos por 0,60 m de suelo compactado, con una permeabilidad vertical K_f menor o igual a 1×10^{-7} cm/seg. Cuando la Barrera Natural o suelo compactado no cumpla con las condiciones indicadas, podrá lograrse o completarse en forma de Barrera Artificial (geológica mineral) con aquellos elementos que proporcionen una barrera equivalente de protección. La Membrana Flexible de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) deberá tener un espesor mínimo de 1,5 mm. La Membrana Flexible debe estar instalada en contacto directo y uniforme con el suelo compactado o barrera artificial de 0,60 m de espesor y una permeabilidad vertical K_f menor o igual a 1×10^{-7} cm/seg. y se cubrirá la Membrana Flexible, con una capa de 0,30 metros de espesor de*

suelo seleccionado compactado, a efectos de su protección. (Resolución 1143/02, 2002)

3. Una capa de suelo final de 0,40 m para resguardar la membrana flexible.

2.1.1. Colocación de Mezcla de Suelo

La primera capa que será colocada tendrá un espesor de unos 60 cm y estará conformada por una parte del suelo del lugar mezclado con una porción necesaria de bentonita, con el objetivo de alcanzar una permeabilidad (Kf) menor o igual a 1×10^{-7} cm/seg. (RELISA, 2015)

El proceso de mezcla del suelo con bentonita posee las siguientes fases:

- Pulverización del suelo
- Distribución de las bolsas de bentonita
- Mezclado
- Humedecimiento para obtener una humedad y compactación óptima

2.1.2. Colocación de la Geomembrana

Una vez llevada a cabo la nivelación de la base y los taludes de la celda se procederá a la colocación de la geomembrana, la cual será de PVC de 0,8 mm de espesor o de polietileno de alta densidad (PEAD) de 1,5 mm. (RELISA, 2015)

2.1.3. Colocación del suelo protector

Luego de que fueron dispuestas en la celda la primera capa de suelo de 60 cm mezclado con bentonita y la geomembrana de PVC de 0,8 mm se procederá a colocar una capa de suelo seleccionado compactado de 15 cm de espesor, con la finalidad de proteger la membrana flexible de posibles rupturas. (RELISA, 2015)

2.2. Colocación de venteo de gases

En el anteproyecto (RELISA, 2015) se incluye la construcción de sistemas de venteo para evacuar el biogás generado dentro de las celdas una vez queden selladas. Se aclara que se construirán alrededor de 70 venteos de hasta 7 metros de profundidad promedio para evacuar el biogás producido en los módulos 1 y 2, únicamente se propone un esquema de construcción de los venteos.

Como el presente Proyecto Final posee como objetivo principal Estimar la producción de biogás en los futuros módulos del relleno sanitario de la ciudad de Necochea, una vez que los mismos se encuentren ocupados, y evaluar la mejor alternativa a implementar de acuerdo a la producción de biogás calculada; no se mantendrá la incorporación del sistema de venteo propuesto en el Anteproyecto de RELISA.

La propuesta de aplicación para el biogás generado quedara representada en el Capítulo IV. 2. *Selección de la alternativa más viable a implementar*, en donde estará descrita la opción escogida en base a la cantidad de gas producido y captado. Se seleccionará una de las alternativas desarrolladas en el Capítulo II. 7. *Aplicaciones y aprovechamiento del Biogás*.

2.3. Cobertura Final y Clausura del Módulo

Una vez el módulo se encuentre próximo a su cierre se colocara una cobertura final la cual estará compuesta por una capa de 0,40 m de suelo de baja permeabilidad (similar al utilizado en la impermeabilización de la base de las celdas) y por una capa final de 0,20 m de suelo vegetal. (RELISA, 2015)

3. Desarrollo del cálculo de biogás aplicando el Modelo LandGEM

En el Capítulo II. 8. *Modelos de estimación de producción de Biogás* se describieron los modelos para estimar la cantidad de biogás generado en un relleno sanitario y en particular el Modelo LandGEM, modelo que fue el seleccionado para ser aplicado en este proyecto.

Como se menciona en el capítulo anteriormente nombrado, la ecuación para calcular la cantidad de metano (Q_{CH_4}) depende de diversas cuestiones, estas son:

- Índice de generación de CH_4 (**k**)
- Generación potencial de CH_4 (**L_0**)
- Vida útil de los módulos (Año de clausura – Año de inicio de disposición de residuos) (**n**)
- Masa de residuos sólidos dispuestos en un determinado año (**M_i**)

A su vez, para determinar el cálculo de biogás también se requiere información acerca de la capacidad del relleno o modulo en el cual serán dispuestos los residuos sólidos, el porcentaje de metano que se espera obtener de la descomposición de los RSU y la concentración de NMOC.

Selección de los valores para aplicar el Modelo LandGEM

Cada una de las cuestiones mencionadas posee distintos valores que varían en cada caso en particular, los escogidos en el presente proyecto están basados en los datos aportados por la empresa RELISA (capacidad de los módulos, cantidad de residuos a disponer) y en información recopilada de distintas fuentes y entidades (valores de L_0 , k, contenido de CH_4 y NMOC).

- Índice de generación de CH_4 (k)

Este índice representa la tasa a la cual los residuos dispuestos se descomponen y generan CH_4 , su valor depende principalmente del contenido de humedad residual, la disponibilidad de nutrientes, el pH y la temperatura. Su rango puede estar entre 0,01 y 0,10. Según la EPA, el valor recomendado de **k** para países en desarrollo en donde la composición de los residuos sólidos es de un 50% aproximadamente de residuos orgánicos es de **0,05 1/año**. Este es el valor seleccionado a aplicar en este caso.

- Generación potencial de CH_4 (L_0)

Estima la cantidad de CH_4 potencialmente producido por cada tonelada de RSU cuando son degradados. Su valor se encuentra en función de la fracción

orgánica de los residuos dispuestos y su rango típico es entre 125 y 310 m³ / ton. El L₀ se encuentra en función de diversos factores, estos son: El factor de corrección para el CH₄ (MFC), la fracción de carbono orgánico degradable (DOC), la fracción de carbono orgánico degradable asimilado (DOC_F) y la fracción de CH₄ en el biogás (F).

Para el desarrollo del modelo LandGEM en esta ocasión se optó por seleccionar el valor de L₀ aportado según la EPA para países en desarrollo con una fracción de residuos orgánicos del 50% aproximadamente, el cual es de **170 m³ / ton.**

- Vida útil de los módulos (Año de clausura – Año de inicio de disposición de residuos) (**n**)

La vida útil de los módulos se encuentra relacionada con la capacidad de residuos a disponer, el módulo 1 posee capacidad para 91.800 toneladas de residuos, mientras que el módulo 2 posee 168.300 toneladas, lo que nos da un total de **260.100** toneladas de capacidad. Para aplicar el modelo se tomara como año de apertura de los módulos el año 2023 y el año de cierre será calculado por el propio modelo teniendo como dato la capacidad total.

- Masa de residuos sólidos dispuestos en un determinado año (**M_i**)

La cantidad de residuos que serán dispuestos año a año variara según de la cantidad de habitantes en ese instante, la cual depende directamente de la tasa de generación en esos momentos.

En el apartado *Tasa de generación de RSU en la Provincia de Buenos Aires y Partido de Necochea* se realizó una estimación de la población futura en el Partido de Necochea desde el año 2022 hasta el 2030 aplicando el Método Aritmético, los resultados fueron los siguientes: *Tabla 4. Población estimada por el Método Aritmético.*

Año	Población
2022	98062
2023	98490
2024	98917

2025	99345
2026	99772
2027	100200
2028	100627
2029	101054
2030	101482

A partir de la tabla anterior y tomando como tasa de generación promedio un valor de 1,108 kg/hab.día (dato a nivel Provincia) se procedió a calcular las toneladas de residuos generadas por año en el Partido de Necochea entre los periodos de 2022 y 2030. Los resultados se ven reflejados en la siguiente *Tabla 10*.

Tabla 10. Toneladas de RSU generadas - Necochea

Año	Población	Ton. RSU Día	Ton. RSU Año
2022	98062	108,6527	39.658
2023	98490	109,1269	39.831
2024	98917	109,6000	40.004
2025	99345	110,0743	40.177
2026	99772	110,5474	40.350
2027	100200	111,0216	40.523
2028	100627	111,4947	40.696
2029	101054	111,9678	40.868
2030	101482	112,4421	41.041

- Contenido de CH₄

El modelo permite ajustar el porcentaje de CH₄ que se espera obtener de la descomposición de los RSU, los valores varían entre un 40 y un 60%. Para este caso se seleccionó el valor propuesto por el *Clean Air Act* (CAA) para rellenos sanitarios con una fracción orgánica alrededor del 50%. El valor propuesto es **50%** en volumen de CH₄ en el biogás.

- Concentración de compuestos orgánicos no metanogénicos (NMOC)

Los NMOC son compuestos orgánicos que contienen carbono y son diferentes al CH₄, su concentración y presencia en el biogás tienen relación con el tipo de residuo dispuesto y la magnitud de las reacciones que producen los distintos compuestos de la descomposición anaeróbica de los residuos. La concentración de NMOC se mide en unidades de partes por millón en volumen (ppmv).

Estos compuestos se encuentran en muy baja proporción con respecto a los demás gases en un relleno sanitario. Algunos de estos compuestos son: la acetona, benceno, clorobenceno, tolueno, xileno, etc.

Para la aplicación del modelo LandGEM se asumió como valor de NMOC el propuesto por el CAA para rellenos sanitarios que posean un 50% aproximadamente de materia orgánica, este valor es de **4.000 ppmv**.

Una vez que se escogieron todos los valores para aplicar el modelo fueron seleccionados los gases a analizar. El modelo permite seleccionar cuatro tipos de gases, para este análisis se seleccionaron: El total de gas generado (la suma de todos los gases), el metano, el dióxido de carbono y los NMOC. El modelo proporciona resultados sobre las cantidades generadas de cada uno de los gases anteriormente mencionados.

Tabla 11. Valores a utilizar en el Modelo LandGEM

Datos	Valores
k	0,05 1/año
L₀	170 m ³ / ton
M_i	<i>Tabla 12</i>
Contenido de CH₄	50%
Concentración NMOC	4.000 ppmv

Año de apertura	2023
Capacidad de Residuos	260.100 Ton

Tabla 12. Valores M_i - Periodo 2022-2030

<i>Año</i>	<i>Ton. RSU Año</i>
2022	39.658
2023	39.831
2024	40.004
2025	40.177
2026	40.350
2027	40.523
2028	40.696
2029	40.868
2030	41.041

IV. Resultados

1. Modelo LandGEM - Resultados

Los distintos valores mencionados en el capítulo anterior se ingresan en el programa de cálculo “Microsoft Excel” de la siguiente manera:

1: Características del Relleno Sanitario

Landfill Open Year	2023	
Landfill Closure Year		
Have Model Calculate Closure Year?	<input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No	
Waste Design Capacity	260.100	

Se ingresa el año de apertura de los módulos y el propio programa determina el año de cierre de dichos módulos en base a la cantidad de residuos sólidos dispuestos año a año. La capacidad total de los módulos es de 260.100 toneladas o mega gramos de residuos sólidos.

2: Determinar los parámetros del modelo

Methane Generation Rate, k ($year^{-1}$)
CAA Conventional - 0.05
Potential Methane Generation Capacity, L_0 (m^3/Mg)
CAA Conventional - 170
NMOC Concentration ($ppmv$ as hexane)
CAA - 4,000
Methane Content (% by volume)
CAA - 50% by volume

El segundo paso consiste en incorporar los parámetros k , L_0 , concentración de NMOC y el contenido de CH_4 anteriormente determinados.

3: Selección de gases a ser analizados

Default pollutant parameters are currently being used by model.	
Gas / Pollutant #1	Total landfill gas
Gas / Pollutant #2	Methane
Gas / Pollutant #3	Carbon dioxide
Gas / Pollutant #4	NMOC
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">Edit Existing or Add New Pollutant Parameters</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">Restore Default Pollutant Parameters</div>	

Los gases seleccionados fueron: la cantidad total de biogás, el metano, dióxido de carbono y los compuestos orgánicos no metanogénicos (NMOC).

4: Tasas de aceptación de residuos (

Tabla 13)

Tabla 13. Tasas de Aceptación de Residuos

Year	Input Units (Mg/year)	Calculated Units (short tons/year)
2023	39.831	43.814
2024	40.004	44.004
2025	40.177	44.195
2026	40.350	44.385
2027	40.523	44.575
2028	40.696	44.766
2029	40.868	44.955
2030	41.041	45.145

Por último se ingresa la cantidad de residuos sólidos dispuestos año tras año. Se seleccionó al año 2023 como el año de inicio de la disposición final de los RSU en los módulos 1 y 2. Los valores ingresados fueron calculados en base al crecimiento poblacional de la ciudad de Necochea a través del Modelo Aritmético, y en base a la tasa de generación promedio de RSU per cápita a nivel provincia. (1,108 kg/hab.día).

El modelo utiliza parámetros predeterminados sobre gases y contaminantes, estos parámetros incluyen la concentración en *ppmv* y el peso molecular de cada compuesto. Si se desea, es posible ingresar parámetros específicos para los contaminantes existentes e introducir nuevos compuestos.

En una hoja siguiente se indica un resumen de todos los valores y cuestiones seleccionadas incluyendo el año de cierre de los módulos calculado por el propio modelo. El cierre quedó establecido para el año 2029. En la siguiente *Imagen 29* puede visualizarse como quedan presentados los valores de entrada en el Modelo LandGEM.

LANDFILL CHARACTERISTICS		
Landfill Open Year	2023	
Landfill Closure Year (with 80-year limit)	2029	
Actual Closure Year (without limit)	2029	
Have Model Calculate Closure Year?	Yes	
Waste Design Capacity	260.100	megagrams
MODEL PARAMETERS		
Methane Generation Rate, k	0,050	year ⁻¹
Potential Methane Generation Capacity, L ₀	170	m ³ /Mg
NMOC Concentration	4.000	ppmv as hexane
Methane Content	50	% by volume
GASES / POLLUTANTS SELECTED		
Gas / Pollutant #1:	Total landfill gas	
Gas / Pollutant #2:	Methane	
Gas / Pollutant #3:	Carbon dioxide	
Gas / Pollutant #4:	NMOC	

Imagen 29. Valores de Entrada - Modelo LandGEM

1.1. Metano generado

En el siguiente apartado ya comienzan a visualizarse los primeros resultados. Se aplica la ecuación de descomposición con cinética de primer orden desarrollado en el Capítulo 8.1.1. *Modelo Landfill gas emission model (LandGem)* y se obtiene la cantidad de CH₄ generada en cada año dependiendo de los residuos sólidos dispuestos. El CH₄ generado queda expresado en m³/año.

La cantidad total de CH₄ generado estará compuesta por la sumatoria de las cantidades de CH₄ producido por los residuos dispuestos en un determinado año. Este valor ira aumentando acorde a la cantidad de RSU que ingrese en el relleno sanitario.

Estos resultados se verán abordados a continuación ya que, además del CH₄, también se obtienen los resultados de la cantidad total de biogás generado, la cantidad de CO₂ y NMOC producido.

1.2. Biogás generado

Como fue mencionado anteriormente, se obtienen los resultados de la cantidad de biogás, CH₄, CO₂ y NMOC generados, estos quedan expresados en ton/año o Mg/año, m³/año y ft³/año o ft³/min. Los resultados obtenidos quedan reflejados en las siguientes tablas *Tabla 14, Tabla 15*

Tabla 16 *Tabla 17* y

Tabla 18; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

Tabla 14. Residuos Aceptados - Modelo LandGEM

Year	Waste Accepted		Waste-In-Place	
	(Mg/year)	(short tons/year)	(Mg)	(short tons)
2023	39.831	43.814	0	0
2024	40.004	44.004	39.831	43.814
2025	40.177	44.195	79.835	87.819
2026	40.350	44.385	120.012	132.013
2027	40.523	44.575	160.362	176.398
2028	40.696	44.766	200.885	220.974
2029	18.519	20.371	241.581	265.739
2030	0	0	260.100	286.110
2031	0	0	260.100	286.110
2032	0	0	260.100	286.110

Tabla 15. Biogás generado - Modelo LandGEM

Year	Total landfill gas		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(ft ³ /year)
2023	0	0	0
2024	8,269E+02	6,621E+05	2,338E+07
2025	1,617E+03	1,295E+06	4,573E+07
2026	2,372E+03	1,900E+06	6,708E+07
2027	3,094E+03	2,478E+06	8,750E+07
2028	3,785E+03	3,030E+06	1,070E+08
2029	4,445E+03	3,559E+06	1,257E+08
2030	4,612E+03	3,693E+06	1,304E+08
2031	4,388E+03	3,513E+06	1,241E+08
2032	4,174E+03	3,342E+06	1,180E+08

Tabla 16. Metano generado - Modelo LandGEM

Year	Methane		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(ft ³ /year)
2023	0	0	0
2024	2,209E+02	3,311E+05	1,169E+07
2025	4,319E+02	6,474E+05	2,286E+07
2026	6,336E+02	9,498E+05	3,354E+07
2027	8,265E+02	1,239E+06	4,375E+07
2028	1,011E+03	1,515E+06	5,351E+07
2029	1,187E+03	1,780E+06	6,285E+07
2030	1,232E+03	1,847E+06	6,522E+07
2031	1,172E+03	1,757E+06	6,204E+07
2032	1,115E+03	1,671E+06	5,901E+07

Tabla 17. Dióxido de Carbono generado - Modelo LandGEM

Year	Carbon dioxide		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(ft ³ /year)
2023	0	0	0
2024	6.060E+02	3.311E+05	1.169E+07
2025	1.185E+03	6.474E+05	2.286E+07
2026	1.739E+03	9.498E+05	3.354E+07
2027	2.268E+03	1.239E+06	4.375E+07
2028	2.774E+03	1.515E+06	5.351E+07
2029	3.258E+03	1.780E+06	6.285E+07
2030	3.380E+03	1.847E+06	6.522E+07
2031	3.216E+03	1.757E+06	6.204E+07
2032	3.059E+03	1.671E+06	5.901E+07

Tabla 18. NMOC generado - Modelo LandGEM

Year	NMOC		
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(ft ³ /year)
2023	0	0	0
2024	9.494E+00	2.649E+03	9.353E+04
2025	1.857E+01	5.179E+03	1.829E+05
2026	2.724E+01	7.598E+03	2.683E+05
2027	3.552E+01	9.911E+03	3.500E+05
2028	4.345E+01	1.212E+04	4.281E+05
2029	5.103E+01	1.424E+04	5.028E+05
2030	5.296E+01	1.477E+04	5.217E+05
2031	5.037E+01	1.405E+04	4.963E+05
2032	4.792E+01	1.337E+04	4.721E+05

Como se puede ver en la primer *Tabla* 14, los módulos dejan de aceptar residuos en el año 2029, recibiendo un total de 18.519 toneladas en ese mismo

año. También podemos visualizar en la segunda *Tabla 15* que la generación máxima de biogás se da en el año siguiente a la clausura de los módulos (2030), tal como asume el Modelo LandGEM; a partir de este año la generación de biogás ira disminuyendo poco a poco.

El valor total producido de biogás será la suma de la cantidad de CH₄, CO₂ y NMOC principalmente. Se puede contemplar que el volumen generado de CH₄ y CO₂ (m³/año y ft³/año) es el mismo en cada año, esto se debe a que al ingresar el contenido de CH₄ al programa se seleccionó un valor de 50% en volumen y el modelo asume que el porcentaje en volumen restante corresponde al CO₂, debido a que el contenido de biogás se encuentra conformado en su mayoría por CH₄ y CO₂ (entre un 95 y 98%).

A objetivos del presente proyecto es necesario destacar que los resultados de mayor relevancia son los presentados en unidades de volumen, principalmente en m³/año. A partir de estos resultados es posible determinar (basándose en las cantidades obtenidas de biogás) una posible alternativa de aprovechamiento energético de dichos gases.

1.3. Gráficos

En los siguientes gráficos se encuentran reflejados los resultados anteriormente presentados en toneladas por año (*Imagen 30*) y en metros cúbicos por año (*Imagen 31*). Queda expuesto como la cantidad de biogás generado aumenta hasta el año 2030 (un año después de la clausura) y posteriormente empieza a disminuir lentamente.

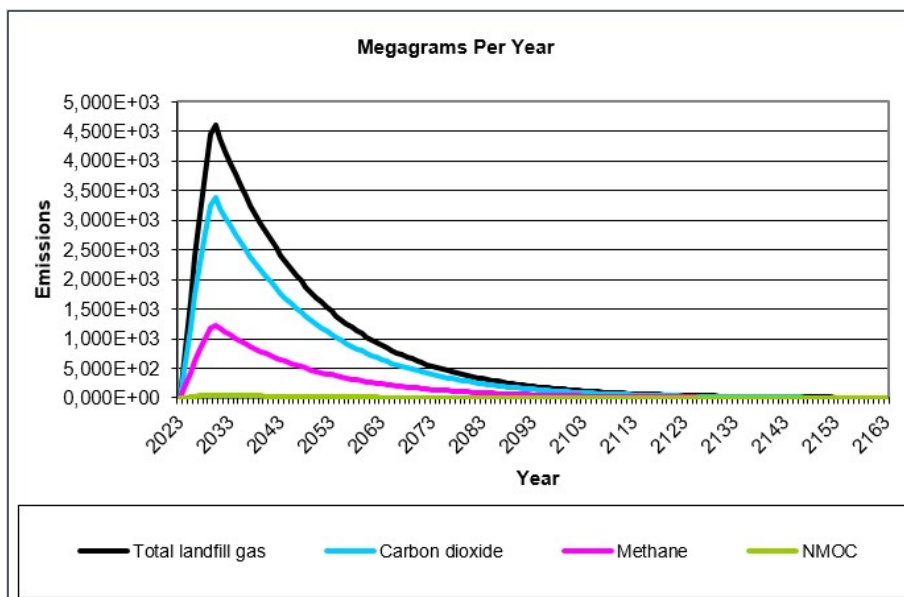


Imagen 30. Emisiones en Toneladas por Año - Modelo LandGEM

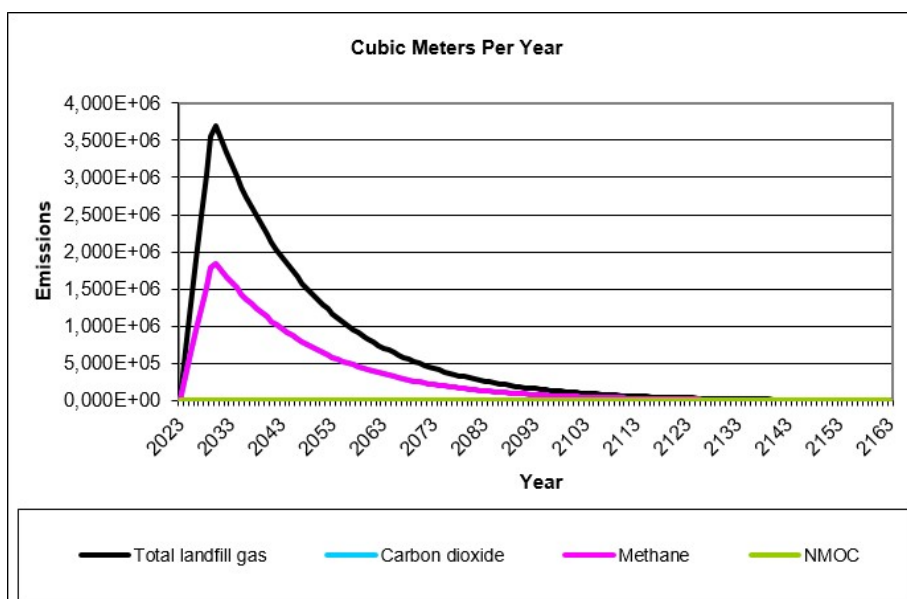


Imagen 31. Emisiones en m³ por Año – Modelo LandGEM

En este último gráfico el valor de CO₂ no puede visualizarse ya que es el mismo que el CH₄ debido a que poseen el mismo contenido en volumen dentro del biogás.

1.4. Inventario

Posterior a los gráficos se encuentra el inventario (*Imagen 32*), en este es posible introducir un determinado año a analizar si es que se requiere obtener

resultados más específicos sobre los distintos contaminantes presentes en el biogás generado o también visualizar las cantidades y volúmenes de los gases producidos en ese mismo año.

Gas / Pollutant	Emission Rate				
	(Mg/year)	(m ³ /year)	(av ft ³ /min)	(ft ³ /year)	(short tons/year)
Total landfill gas	4,612E+03	3,693E+06	2,482E+02	1,304E+08	5,074E+03
Methane	1,232E+03	1,847E+06	1,241E+02	6,522E+07	1,355E+03
Carbon dioxide	3,380E+03	1,847E+06	1,241E+02	6,522E+07	3,718E+03
NMOC	5,296E+01	1,477E+04	9,927E-01	5,217E+05	5,825E+01
1,1,1-Trichloroethane (methyl chloroform) - HAP	9,837E-03	1,773E+00	1,191E-04	6,261E+01	1,082E-02
1,1,2,2-Tetrachloroethane - HAP/VOC	2,836E-02	4,063E+00	2,730E-04	1,435E+02	3,120E-02
1,1-Dichloroethane (ethylene dichloride) - HAP/VOC	3,649E-02	8,864E+00	5,956E-04	3,130E+02	4,014E-02
1,1-Dichloroethene (vinylidene chloride) - HAP/VOC	2,978E-03	7,387E-01	4,963E-05	2,609E+01	3,276E-03
1,2-Dichloroethane (ethylene dichloride) - HAP/VOC	6,233E-03	1,514E+00	1,017E-04	5,348E+01	6,856E-03
1,2-Dichloropropane (propylene dichloride) - HAP/VOC	3,124E-03	6,648E-01	4,467E-05	2,348E+01	3,437E-03
2-Propanol (isopropyl alcohol) - VOC	4,617E-01	1,847E+02	1,241E-02	6,522E+03	5,079E-01
Acetone	6,246E-02	2,585E+01	1,737E-03	9,130E+02	6,870E-02
Acrylonitrile - HAP/VOC	5,135E-02	2,327E+01	1,563E-03	8,217E+02	5,649E-02
Benzene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	2,280E-02	7,018E+00	4,715E-04	2,478E+02	2,508E-02
Benzene - Co-disposal - HAP/VOC	1,320E-01	4,063E+01	2,730E-03	1,435E+03	1,452E-01
Bromodichloromethane - VOC	7,802E-02	1,145E+01	7,693E-04	4,043E+02	8,582E-02
Butane - VOC	4,464E-02	1,847E+01	1,241E-03	6,522E+02	4,911E-02
Carbon disulfide - HAP/VOC	6,783E-03	2,142E+00	1,439E-04	7,565E+01	7,462E-03
Carbon monoxide	6,024E-01	5,171E+02	3,474E-02	1,826E+04	6,627E-01
Carbon tetrachloride - HAP/VOC	9,453E-05	1,477E-02	9,927E-07	5,217E-01	1,040E-04
Carbonyl sulfide - HAP/VOC	4,522E-03	1,810E+00	1,216E-04	6,391E+01	4,974E-03
Chlorobenzene - HAP/VOC	4,323E-03	9,234E-01	6,204E-05	3,261E+01	4,755E-03
Chlorodifluoromethane	1,727E-02	4,802E+00	3,226E-04	1,696E+02	1,900E-02
Chloroethane (ethyl chloride) - HAP/VOC	1,289E-02	4,802E+00	3,226E-04	1,696E+02	1,417E-02
Chloroform - HAP/VOC	5,502E-04	1,108E-01	7,445E-06	3,913E+00	6,052E-04
Chloromethane - VOC	9,308E-03	4,432E+00	2,978E-04	1,565E+02	1,024E-02
Dichlorobenzene - (HAP for para isomer/VOC)	4,742E-03	7,756E-01	5,211E-05	2,739E+01	5,217E-03
Dichlorodifluoromethane	2,972E-01	5,910E+01	3,971E-03	2,087E+03	3,269E-01
Dichlorofluoromethane - VOC	4,111E-02	9,603E+00	6,452E-04	3,391E+02	4,522E-02
Dichloromethane (methylene chloride) - HAP	1,827E-01	5,171E+01	3,474E-03	1,826E+03	2,009E-01
Dimethyl sulfide (methyl sulfide) - VOC	7,445E-02	2,881E+01	1,936E-03	1,017E+03	8,189E-02
Ethane	4,111E+00	3,287E+03	2,209E-01	1,161E+05	4,522E+00
Ethanol - VOC	1,911E-01	9,972E+01	6,700E-03	3,522E+03	2,102E-01
Ethyl mercaptan (ethanethiol) - VOC	2,195E-02	8,495E+00	5,708E-04	3,000E+02	2,415E-02
Ethylbenzene - HAP/VOC	7,502E-02	1,699E+01	1,142E-03	6,000E+02	8,252E-02
Ethylene dibromide - HAP/VOC	2,886E-05	3,693E-03	2,482E-07	1,304E-01	3,175E-05
Fluorotrichloromethane - VOC	1,604E-02	2,807E+00	1,886E-04	9,913E+01	1,764E-02
Hexane - HAP/VOC	8,738E-02	2,438E+01	1,638E-03	8,609E+02	9,612E-02
Hydrogen sulfide	1,885E-01	1,330E+02	8,934E-03	4,696E+03	2,073E-01
Mercury (total) - HAP	8,937E-06	1,071E-03	7,197E-08	3,783E-02	9,831E-06
Methyl ethyl ketone - HAP/VOC	7,865E-02	2,622E+01	1,762E-03	9,261E+02	8,652E-02
Methyl isobutyl ketone - HAP/VOC	2,923E-02	7,018E+00	4,715E-04	2,478E+02	3,216E-02
Methyl mercaptan - VOC	1,848E-02	9,234E+00	6,204E-04	3,261E+02	2,032E-02
Pentane - VOC	3,658E-02	1,219E+01	8,189E-04	4,304E+02	4,023E-02
Perchloroethylene (tetrachloroethylene) - HAP	9,426E-02	1,367E+01	9,182E-04	4,826E+02	1,037E-01
Propane - VOC	7,450E-02	4,063E+01	2,730E-03	1,435E+03	8,196E-02
1,1,2-Dichloroethene - VOC	4,170E-02	1,034E+01	6,949E-04	3,652E+02	4,587E-02
Toluene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC	5,520E-01	1,440E+02	9,678E-03	5,087E+03	6,072E-01
Toluene - Co-disposal - HAP/VOC	2,406E+00	6,279E+02	4,219E-02	2,217E+04	2,647E+00
Trichloroethylene (trichloroethene) - HAP/VOC	5,652E-02	1,034E+01	6,949E-04	3,652E+02	6,217E-02
Vinyl chloride - HAP/VOC	7,009E-02	2,696E+01	1,812E-03	9,522E+02	7,710E-02
Xylenes - HAP/VOC	1,957E-01	4,432E+01	2,978E-03	1,565E+03	2,153E-01

Imagen 32. Inventario de Gases y Contaminantes Año 2030 - Modelo LandGEM

1.5. Reporte

Por último se encuentra el reporte, en este quedan reflejados los datos y valores ingresados en el modelo, los resultados obtenidos y los gráficos realizados a partir de estos. A su vez, cuenta con una explicación del propio programa/modelo.

Es un reporte pre-elaborado que automáticamente se genera a partir de los datos introducidos y los resultados obtenidos.

2. Selección de la alternativa más viable a implementar

En base a los resultados obtenidos aplicando el Modelo LandGEM y los distintos tipos de aplicaciones de biogás descritos en el Capítulo 7. *Aplicaciones y aprovechamiento del Biogás* se seleccionó como la aplicación más viable a ejecutar en el relleno sanitario de la ciudad de Necochea a partir del biogás producido a la generación de energía eléctrica por medio de Microturbinas.

2.1. Calculo de Generación de Energía Eléctrica

El biogás obtenido a partir de la degradación de los residuos sólidos dispuestos en un relleno sanitario posee un poder calorífico de aproximadamente entre 4.500 y 5.500 Kcal/m³.⁴ Las kilocalorías son unidades de energía térmica, a partir de estas es posible determinar el aprovechamiento energético del biogás, en este caso en forma de energía eléctrica. Esta se mide generalmente en kWh o MWh, por lo que la relación entre kilocalorías y kilo Watts hora es la siguiente:

$$1,162 \text{ kWh} \rightarrow 1.000 \text{ Kcal}$$

En el capítulo 7.1.2. *Generación de energía eléctrica* se describen tres tipos de tecnologías para el aprovechamiento energético del gas de relleno sanitario, estas son: Motores de Combustión Interna, Turbinas de Gas y Microturbinas, para los tres casos se requiere un volumen mínimo de flujo del biogás (m³/min) para que dicha tecnología sea considerada útil.

Los resultados obtenidos a partir del modelo LandGEM indican que la cantidad de biogás generado ronda en los 2,83 m³/min y 6,79 m³/min entre el año 2024 y 2048, por lo que la mejor alternativa de aprovechamiento energético a seleccionar son las Microturbinas, ya que son recomendables para volúmenes

⁴ A modo de comparación, el poder calorífico del gas natural es de aproximadamente 10.500 Kcal/m³.

inferiores a los 8,5 m³/min. A su vez, es importante destacar que la eficiencia de conversión eléctrica de dicha tecnología es de entre 25 y 30%.

En la siguiente *Tabla 19* queda representado el aprovechamiento energético en cada año tanto en kWh/año como en kWh/mes entre los años 2023 y 2065. Los resultados se obtuvieron aplicando un poder calorífico del biogás igual a 4.500 kcal y con un 30% de eficiencia de conversión eléctrica de las microturbinas.

Tabla 19. Energía Eléctrica obtenida a partir del Biogás generado

Año	Residuos Acumulados	Biogas (m³/año)	Kcal/año	Energía Eléctrica (kWh/año)	Energía Eléctrica (kWh/mes)
2023	0	0	0	0	0
2024	39.831	662.130	893.875.553	1.038.683	86.557
2025	79.835	1.294.843	1.748.038.696	2.031.221	169.268
2026	120.012	1.899.575	2.564.426.225	2.979.863	248.322
2027	160.362	2.477.689	3.344.880.480	3.886.751	323.896
2028	200.885	3.030.484	4.091.153.947	4.753.921	396.160
2029	241.581	3.559.195	4.804.913.642	5.583.310	465.276
2030	260.100	3.693.462	4.986.173.174	5.793.933	482.828
2031	-	3.513.329	4.742.994.639	5.511.360	459.280
2032	-	3.341.982	4.511.676.061	5.242.568	436.881
2033	-	3.178.992	4.291.639.023	4.986.885	415.574
2034	-	3.023.951	4.082.333.318	4.743.671	395.306
2035	-	2.876.471	3.883.235.573	4.512.320	376.027
2036	-	2.736.184	3.693.847.939	4.292.251	357.688
2037	-	2.602.738	3.513.696.849	4.082.916	340.243
2038	-	2.475.801	3.342.331.832	3.883.790	323.649
2039	-	2.355.055	3.179.324.385	3.694.375	307.865
2040	-	2.240.198	3.024.266.905	3.514.198	292.850
2041	-	2.130.942	2.876.771.667	3.342.809	278.567
2042	-	2.027.015	2.736.469.858	3.179.778	264.981
2043	-	1.928.156	2.603.010.648	3.024.698	252.058
2044	-	1.834.119	2.476.060.320	2.877.182	239.765
2045	-	1.744.668	2.355.301.434	2.736.860	228.072
2046	-	1.659.579	2.240.432.027	2.603.382	216.949
2047	-	1.578.641	2.131.164.868	2.476.414	206.368
2048	-	1.501.649	2.027.226.731	2.355.637	196.303
2049	-	1.428.413	1.928.357.717	2.240.752	186.729
2050	-	1.358.749	1.834.310.601	2.131.469	177.622
2051	-	1.292.482	1.744.850.217	2.027.516	168.960
2052	-	1.229.447	1.659.752.868	1.928.633	160.719
2053	-	1.169.486	1.578.805.765	1.834.572	152.881
2054	-	1.112.449	1.501.806.500	1.745.099	145.425
2055	-	1.058.194	1.428.562.532	1.659.990	138.332
2056	-	1.006.586	1.358.890.716	1.579.031	131.586
2057	-	957.494	1.292.616.833	1.502.021	125.168
2058	-	910.796	1.229.575.166	1.428.766	119.064
2059	-	866.376	1.169.608.078	1.359.085	113.257
2060	-	824.123	1.112.565.619	1.292.801	107.733
2061	-	783.930	1.058.305.153	1.229.751	102.479
2062	-	745.697	1.006.691.002	1.169.775	97.481
2063	-	709.329	957.594.102	1.112.724	92.727
2064	-	674.735	910.891.687	1.058.456	88.205
2065	-	641.827	866.466.975	1.006.835	83.903

A partir de los resultados obtenidos es posible calcular un ahorro económico estimado teniendo en cuenta que el valor de 1 kWh actualmente es de \$ 7,8 (desde el 1 de junio de 2022) según el Ente Nacional Regulador de la Electricidad en la Resolución 172/2022. (EDESUR.S.A., 2022)

A su vez, es posible determinar a cuantos hogares se podría abastecer con la electricidad obtenida teniendo en cuenta que un hogar promedio en Argentina consume alrededor de 150 y 300 kWh por mes. También es posible calcular cuantas lámparas de alumbrado público podrían abastecerse al año si tenemos en cuenta que una luminaria consume aproximadamente 200 Wh y se encuentra encendida alrededor 12 horas al día.

Los resultados obtenidos en cuanto al ahorro económico, número de hogares suministrados al año y número de lámparas de alumbrado público abastecidas al año entre los años 2023 y 2065 pueden visualizarse en la siguiente *Tabla 20*. Los cálculos se ejecutaron tomando como consumo energético promedio de una casa 250 kWh/mes.

Tabla 20. Casas Suministradas y Ahorro Económico a partir de la Energía Eléctrica obtenida

Año	Energía Eléctrica (kWh/año)	Energía Eléctrica (kWh/mes)	Casas suministradas al año	Alumbrado público al año	Ahorro Económico \$
2023	0	0	0	0	0
2024	1.038.683	86.557	346	1.202	8.141.200
2025	2.031.221	169.268	677	2.351	15.920.710
2026	2.979.863	248.322	993	3.449	23.356.168
2027	3.886.751	323.896	1.296	4.499	30.464.355
2028	4.753.921	396.160	1.585	5.502	37.261.232
2029	5.583.310	465.276	1.861	6.462	43.761.981
2030	5.793.933	482.828	1.931	6.706	45.412.849
2031	5.511.360	459.280	1.837	6.379	43.198.038
2032	5.242.568	436.881	1.748	6.068	41.091.245
2033	4.986.885	415.574	1.662	5.772	39.087.201
2034	4.743.671	395.306	1.581	5.490	37.180.896
2035	4.512.320	376.027	1.504	5.223	35.367.562
2036	4.292.251	357.688	1.431	4.968	33.642.666
2037	4.082.916	340.243	1.361	4.726	32.001.894
2038	3.883.790	323.649	1.295	4.495	30.441.143
2039	3.694.375	307.865	1.231	4.276	28.956.511
2040	3.514.198	292.850	1.171	4.067	27.544.285
2041	3.342.809	278.567	1.114	3.869	26.200.934
2042	3.179.778	264.981	1.060	3.680	24.923.100
2043	3.024.698	252.058	1.008	3.501	23.707.586
2044	2.877.182	239.765	959	3.330	22.551.353
2045	2.736.860	228.072	912	3.168	21.451.511
2046	2.603.382	216.949	868	3.013	20.405.308
2047	2.476.414	206.368	825	2.866	19.410.130
2048	2.355.637	196.303	785	2.726	18.463.486
2049	2.240.752	186.729	747	2.593	17.563.012
2050	2.131.469	177.622	710	2.467	16.706.453
2051	2.027.516	168.960	676	2.347	15.891.670
2052	1.928.633	160.719	643	2.232	15.116.624
2053	1.834.572	152.881	612	2.123	14.379.378
2054	1.745.099	145.425	582	2.020	13.678.087
2055	1.659.990	138.332	553	1.921	13.010.999
2056	1.579.031	131.586	526	1.828	12.376.445
2057	1.502.021	125.168	501	1.738	11.772.839
2058	1.428.766	119.064	476	1.654	11.198.671
2059	1.359.085	113.257	453	1.573	10.652.505
2060	1.292.801	107.733	431	1.496	10.132.976
2061	1.229.751	102.479	410	1.423	9.638.785
2062	1.169.775	97.481	390	1.354	9.168.696
2063	1.112.724	92.727	371	1.288	8.721.533
2064	1.058.456	88.205	353	1.225	8.296.179
2065	1.006.835	83.903	336	1.165	7.891.570

En base a los resultados obtenidos se puede destacar que entre los años 2027 y 2043 podrían llegar a suministrarse de electricidad más de 1.000 hogares por año; en cuanto al alumbrado público, dentro del periodo que se sitúa desde el año 2026 hasta el 2046 podrían llegar a abastecerse por encima de 2.000 lámparas de alumbrado público al año, incluso llegando a más de 6.000 lámparas en determinados años. A su vez, en el mismo periodo mencionado anteriormente, el ahorro económico se encontraría por encima de los 20 millones de pesos, incluso pudiendo llegar a sobrepasar los 40 millones entre los años 2029 y 2032.

V. Conclusiones

Tanto el objetivo general, como los objetivos específicos propuestos fueron abordados en su totalidad en el presente proyecto.

El biogás potencial a generarse dentro de los futuros módulos del relleno sanitario de la ciudad de Necochea se determinó en base a la aplicación del Modelo LandGEM anteriormente seleccionado.

Se identificaron distintas alternativas para su uso y se escogió la más viable en base a las cantidades generadas, la cual fue la utilización de microturbinas para la generación de energía eléctrica.

Debido a la falta de información específica acerca de la caracterización (composición, tipo y origen) y cuantificación (toneladas generadas, tasa de generación de RSU) de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Necochea los datos de entrada que han sido utilizados en el modelo han sido extrados de bibliografía confiable.

Para que la propuesta desarrollada en este documento se pueda llevar a cabo, se considera imprescindible que el Partido de Necochea realice una caracterización y cuantificación específica para obtener datos con mayor certeza.

La estimación de población futura del Partido de Necochea fue realizada aplicando el modelo aritmético. Debido a que los resultados del CENSO 2022 por el momento no fueron publicados se utilizaron datos de censos anteriores (2001 y 2010). Para una mayor aproximación, se considera recomendable realizar la estimación cuando dichos datos sean dados a conocer.

Es necesario resaltar la importancia de medir y controlar el contenido de biogás generado dentro de un relleno sanitario debido a las cuestiones negativas que pueden desencadenarse a partir de una ineficiente gestión del mismo.

Por otra parte, se ha demostrado que el biogás producido a partir descomposición de la fracción orgánica de los RSU puede ser aplicado como una fuente energética renovable en diversas formas de aprovechamiento. Este

tipo de energías últimamente están teniendo mayor impacto en la sociedad y se espera que en los próximos años estén presentes de una forma más relevante dentro de la industria energética.

Finalmente, se considera que el presente trabajo podría ser complementado efectuando un análisis sobre los tratamientos requeridos para acondicionar el biogás generado y capturado del relleno sanitario para su uso en microturbinas. Dicho estudio desencadenaría en una disminución en la cantidad de biogás posible a aprovechar para la generación de energía eléctrica debido a las posibles pérdidas ocasionadas por los tratamientos específicos a implementarse. Al mismo tiempo, se podría integrar al trabajo un análisis económico a modo de complementar el proyecto realizado, en el cual sean considerados los costos derivados en la instalación del sistema de captación del biogás y en los tratamientos específicos requeridos para acondicionar el gas.

VI. Bibliografía

- Aguilar-Virgen, T.-G. O.-B. (2011). Modelo Mexicano para la estimacion de la generacion de biogas. Mérida Mexico.
- Aristizabal, H. O. (2007). *Informacion Tecnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climatico - Instituto de Hidrologia, Meteorologia y Estudios Ambientales - IDEAM.*
- Arriaza, D. A. (2016). *Modelo para el diseño de sistemas de captacion y aprovechamiento de biogas producido en rellenos sanitarios.* Santiago de Chile.
- Arriaza, D. Á. (2016). *Modelo para el diseño de Sistemas de Captacion y Aprovechamiento de Biogas producido en Rellenos Sanitarios.* Santiago de Chile.
- Bonmatí, A. (2008). Capitulo 8 - Gestion y Tratamiento de Residuos Solidos Urbanos. En P. A. Rodriguez, *Evaluacion y Prevencion de Riesgos Ambientales en Centroamerica* (pág. 414).
- Carmona, A. S.-A. (2020). *Metodologia para el diseño de un sistema de captacion y aprovechamiento de biogas proveniente de residuos solidos urbanos.* Pereira - Colombia.
- Dávila, I. J. (2009). *Biogas de Rellenos Sanitarios - Generalidades - Methane to Markets.* Guadalajara - Jalisco.
- EDESUR.S.A., E. N.-C. (31 de Mayo de 2022). *Argentina.gob.ar.* Obtenido de Resolucion 172/2022: <https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/resolución-172-2022-365659/texto>
- Ellenbogen, K. (s.f.). *Oceana* . Obtenido de Gases de Efecto Invernadero: <https://europe.oceana.org/es/node/46897>
- Garcia, A. E.-A. (s.f.). *La Acumulación de Basuras como Material Geotécnico.* Universidad de los Andes.
- George Tchobanoglous, H. T. (1982). *Desechos Solidos - Principios de Ingenieria y Administracion - Capitulo 4.*
- Gilly, I. E. (2011). *Gestion Integral de Residuos Solidos Urbanos en la Provincia de Buenos Aires Argentina - OPDS.*
- Giraldo, E. (s.f.). *Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios.*
- Glen Bryan Madrigal Perez, J. J. (2018). *Calculo de la generación de biogás para el relleno sanitario de la ciudad de Juliaca, utilizando el modelo LandGEM Versión 3.02 de la USEPA y estimación del potencial de producción eléctrica.* Lima, Peru.
- INTI, I. N. (2020). *Evaluacion del potencial de captura y aprovechamiento energetico del metano generado en el relleno sanitario Mar del Plata.* Mar del Plata.

- Lopez, D. I. (7 de Septiembre de 2018). *El Blog de los Lixiviados*. Obtenido de Cambios parametricos en los lixiviados de los vertederos - Produccion de biogas: <https://lixiviados.wordpress.com/2018/09/07/cambios-parametricos-en-los-lixiviados-de-los-vertederos-produccion-de-biogas/>
- Medina, M. E. (s.f.). *PROBLEMAS GEOTÉCNICOS EN LOS RELLENOS SANITARIOS*. Obtenido de <https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/3768/Trabajo%20Final%20-%20Problemas%20Geotécnicos%20en%20Rellenos%20Sanitarios%20-%20Medina%20María%20Emilia.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=La%20American%20Society%20of%20Civil,salud%20y%20la%20seg>
- MethaneToMarkets. (s.f.). *Fundamentos sobre el Biogas*.
- Montes, W. M. (2011). *Tratamiento de Lixiviados generados en el relleno de la Cd. de Chihuahua, Mex*. Chihuahua.
- Moreno, P. M. (2011). *Manual de Biogás - Capítulo 4, Usos del Biogás*. Santiago de Chile.
- Nickisch, I. e. (s.f.). *Uso de bentonita para impermeabilizacion de represas - INTA*.
- RELISA. (2015). *Anteproyecto - Plan de Trabajo - Plan de Inversiones - Licitacion Publica para la concesion del Servicio Publico de "Higiene Urbana" del Partido de Necochea*. Necochea - Provincia de Buenos Aires.
- Resolucion 1143/02*. (2002). Obtenido de Sistema de Informacion Normativa y Documental Malvinas Argentinas - Gobierno Provincia de Buenos Aires: <https://normas.gba.gob.ar/documentos/xbROGRcG.html>
- SAyDS. (2019). *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero - Argentina*.
- SAyDS, M. d.-S. (2005). *Estrategia Nacional Para la Gestion Integral de Residuos Sólidos Urbanos - ENGIRSU*.
- SAyDS-BuenosAires, S. d. (2005). *ENGIRSU - Provincia de Buenos Aires*.
- SPA-Módulo2. (s.f.). *Programa de Capacitacion y Educacion Ambiental - Modulo 2 - Introduccion a la tematica de RSU. Caracterizacion y Cuantificacion de residuos*.
- SPA-Módulo3. (s.f.). *Programa de Capacitacion y Educacion Ambiental - Modulo 3 - Rellenos Sanitarios*.
- Weihls, I. J. (2011). *Fundamentos sobre los Rellenos Sanitarios*. Bahia Blanca.
- Weihls-Biogas, J. P. (s.f.). *Conceptos Basicos sobre Biogas*.