



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE CIENCIAS APLICADAS A LA INDUSTRIA

INGENIERIA QUIMICA ORIENTACION MEDIO AMBIENTE

“Análisis de viabilidad de la construcción de un relleno sanitario en San Rafael con producción y aprovechamiento de biogás”

ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD

Autores: Gabriel Alejandro Perez - Fernando Javier Donaire

Director del proyecto: Mgter. Ing. Jorge de Ondarra

Codirector del proyecto: Esp. Ing. Laura Najjar

.....
Presidente: Nombre y Firma

.....
Vocal: Nombre y Firma

.....
Vocal: Nombre y Firma

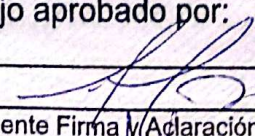
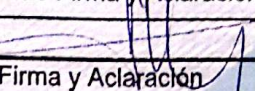
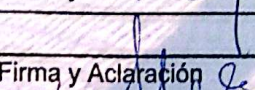
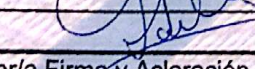
Análisis de viabilidad de la construcción de un relleno sanitario en San Rafael con producción y aprovechamiento de biogás

Autor/a: Donaire, Fernando
Perez, Gabriel

Título al que se aspira:
Ingeniería Química

Nota Final: 10 (diez)

Trabajo aprobado por:

 Presidente Firma y Aclaración	<u>LAURA NAJAR</u> Fecha <u>26/09/25</u>
 Vocal Firma y Aclaración	<u>TERUYA JORGELINA</u> Fecha <u>26/09/2025</u>
 Vocal Firma y Aclaración	 Fecha
 Director/a Firma y Aclaración	<u>de Ondariz Jorge S</u> Fecha <u>26/09/2025</u>

Observaciones de corrección: —

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO
FACULTAD DE CIENCIAS APLICADAS A LA INDUSTRIA**

San Rafael, Mendoza, 2025



AGRADECIMIENTOS

El siguiente proyecto representa la culminación de un camino de formación académica y personal, recorrido con esfuerzo, disciplina y compromiso. Cada desafío afrontado en este trayecto ha contribuido a nuestro crecimiento, consolidando en nosotros la convicción de que la perseverancia y la dedicación son pilares esenciales en la vida profesional.

Expresamos nuestra más profunda gratitud a nuestras familias, cuyo apoyo incondicional y aliento constante nos sostuvieron en cada etapa de esta carrera. Su ejemplo de esfuerzo y valores nos guió para llegar a este logro.

A nuestros amigos y compañeros de estudio, gracias por compartir experiencias, brindar compañía en las horas más exigentes y aportar la motivación necesaria para continuar adelante.

Queremos agradecer también a la Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria, a todos sus docentes y personal académica, quienes nos acompañaron en este trayecto e hicieron posible que nuestra formación se desarrollara en un entorno de excelencia y respeto.

Finalmente, agradecemos a nuestro Director, Mgter. Ing. Jorge De Ondarra, y a nuestra Co-Directora, Esp. Ing. Laura Najar, por su orientación, acompañamiento y dedicación durante este proceso, constituyéndose en referentes y guías en esta etapa decisiva de la carrera.



ÍNDICE

RESUMEN EJECUTIVO	11
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	12
1.1 OBJETIVO.....	12
1.1.1. Objetivos principales	12
1.1.2. Objetivos específicos	13
1.2. ALCANCE	14
1.3. JUSTIFICACIÓN	14
1.4. ANTECEDENTES	14
CAPÍTULO 2 ESTUDIO DE MERCADO	15
2.1. MERCADO GLOBAL DEL BIOGÁS.....	15
2.1.1. Principales regiones y países productores	16
2.1.2. Tendencias tecnológicas y regulatorias.....	16
2.1.3. Aplicaciones del biogás.....	17
2.1.4. Principales actores del mercado global	17
2.2. MERCADO EN ARGENTINA DEL BIOGÁS	17
2.3. MERCADO EN SAN RAFAEL DEL BIOGÁS.....	18
2.3.1. Demanda energética local.....	19
2.3.2. Actores clave en la zona	19
2.3.3. Modalidades de comercialización.....	19
2.3.4. Estimación de ingresos y escalabilidad	20
2.3.5. Barreras de mercado	20
CAPÍTULO 3 TAMAÑO	22
3.1. CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS RSU.....	22
3.1.1 Tasa de generación	22
3.1.2 Composición de los residuos	23
3.1.3. Precios de los reciclables	25
3.2. PROYECCIÓN DEMOGRÁFICA DE LA POBLACIÓN DE SAN RAFAEL.....	27
3.3. CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL VERTEDERO	29
3.4. CÁLCULO DEL ÁREA REQUERIDA.....	30
3.4 PLANTA MANUAL DE SEPARACIÓN DE RESIDUOS	31
3.4.1 Áreas funcionales de la planta	31
3.4.2 Diagrama funcional	31
3.4.3 Parámetros de diseño	32
CAPITULO 4 LOCALIZACIÓN	33



4.1. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	33
4.1.1 Introducción	33
4.1.2 Herramientas de selección para la macrolocalización	33
4.1.3 Conclusión	36
CAPÍTULO 5 INGENIERÍA BÁSICA.....	38
5.1. MARCO TEÓRICO	38
5.1.1. Factores ambientales	38
5.2. PLANTA DE SEPARACIÓN	39
5.3. VERTEDERO CONTROLADO	40
5.3.1. Tipos de vertederos controlados	41
5.3.2. Criterios de admisión en el vertedero	44
5.4 GENERACIÓN DE LÍQUIDOS LIXIVIADOS	44
5.4.1. Captación de lixiviado	45
5.4.2 Red de captación	47
5.4.3. Tratamiento de agua de lixiviado.....	48
5.4.4 Membrana impermeabilizante	50
5.5. GAS DE RELLENO	52
5.6. COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS	56
5.7. APLICACIONES DEL BIOGÁS.....	57
5.8. GENERACIÓN ELÉCTRICA.....	57
5.8.1. Uso directo como gas de medio-btu	58
5.8.2. Conversión a gas de alto-btu.....	58
5.9. CAPTACIÓN DE GASES	58
5.9.1 Pozos verticales	59
5.9.2. Pozos horizontales.....	61
5.10. PURIFICACIÓN DE BIOGÁS	62
5.11. PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA	63
CAPÍTULO 6 INGENIERÍA DE DETALLE	65
6.1. INTRODUCCIÓN.....	65
6.2 PLANOS GENERALES Y DE DETALLE DE TODAS LAS OBRAS, INSTALACIONES Y EQUIPOS.....	65
6.2.1. Superficie del proyecto.....	65
6.2.3 Diagrama de bloques	66
6.2.4. Diagrama de flujo de procesos.....	66
6.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES Y DE DETALLE.	67
6.3.1. Planta de separación	67



6.3.2. Diseño de módulo	70
6.3.3. Operación de relleno	70
6.3.4. Cálculo de biogás generado	73
6.3.5. Equipos de la planta de purificación de biogás	77
6.4. CÁLCULO DE LIXIVIADOS	82
6.4.1. Sistema de captación:	84
6.4.2 Cálculo de laguna de contención de lixiviados	85
6.5. CÁLCULO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA	86
6.5.1. Equipos de la planta de generación eléctrica	87
CAPITULO 7 GESTIÓN DE LA ORGANIZACIÓN	89
7.1 INTRODUCCIÓN	89
7.2 PRINCIPIOS DE ORGANIZACIÓN	89
7.3 ORGANIGRAMA	89
7.4 DISTRIBUCIÓN DEL PERSONAL	92
7.5 FICHAS DEL PERSONAL	93
7.6 NORMAS DE SEGURIDAD Y PREVENCIÓN DE ACCIDENTES	98
7.6.1 Elementos de protección personal (epp)	98
7.6.2 Seguridad en el manejo de biogás	98
7.6.3 Seguridad en instalaciones eléctricas y moto generadores	99
7.6.4 Operación de maquinaria pesada	99
7.6.5 Manejo de residuos y lixiviados	99
7.6.6 Plan de emergencias y respuesta a incidentes	99
7.6.7 Capacitación y cultura preventiva	99
CAPITULO 8 ASPECTOS LEGALES Y NORMATIVOS	100
8.1. INTRODUCCIÓN	100
8.2. MARCO LEGAL NACIONAL	100
8.3. MARCO LEGAL PROVINCIAL	101
8.4. MARCO LEGAL MUNICIPAL	102
CAPITULO 9 EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL	104
9.1. INTRODUCCIÓN	104
9.2. IMPACTOS SOCIOECONOMICOS	104
9.2.1 Educación ambiental	106
9.2.2 Educación ambiental formal	106
9.2.3 Educación ambiental no formal	106
9.2.4 Programa de educación ambiental	107
9.3. IMPACTOS AMBIENTALES	107



9.3.1 Fase de construcción	107
9.3.4. Fase de operación	108
9.3.3 Fase de cierre	108
9.4. MATRIZ DE IMPACTOS AMBIENTALES	109
9.4.1 Identificación de factores susceptibles a recibir impactos.....	109
9.4.2. Identificación de acciones que pueden causar impactos	110
9.4.3. Matriz de identificación de impactos ambientales	111
9.4.4. Matriz de cálculo de importancia	113
9.4.5. Matriz de valoración de impacto ambiental.....	116
9.5. PLAN DE CONTINGENCIAS.....	118
CAPITULO 10 ESTUDIO ECONÓMICO	120
10.1. INTRODUCCIÓN.....	120
10.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	120
10.3. DETERMINACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL.....	121
10.3.1. Inversión en capital fijo	121
10.3.2. Costos diferidos	124
10.3.3. Inversión total necesaria	125
10.3.4. Cronograma de inversiones	125
10.4. COSTOS DE OPERACIÓN	127
10.4.1. Costos fijos anuales	127
10.4.2. Resumen de costos fijos	129
10.5. COSTOS VARIABLES ANUALES	130
10.5.1. Supuestos de operación:.....	131
10.5.2. Costos totales anuales	131
10.6. COSTOS UNITARIOS	131
10.7. INGRESOS PROYECTADOS	132
10.8. ANÁLISIS DE RENTABILIDAD.....	134
10.7.1. Horizonte de evaluación y supuestos	134
10.7.2. Flujo de caja.....	135
10.7.3. Valor Actual Neto (VAN).....	137
10.7.4. Tasa Interna de Retorno (TIR)	137
10.7.5. Período de Recuperación (Payback).....	137
10.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	137
10.9. CONCLUSIONES ECONÓMICAS.....	139
CAPITULO 11 CONCLUSIONES DEL PROYECTO	140





ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Esquema de economía circular	13
Figura 2.1: Tamaño de mercado del Biogás de 2024 a 2034	15
Figura 2.2: Principales fuentes de producción de biogás	16
Figura 2.3: Tasa de crecimiento del biogás en el mundo	16
Figura 2.4: Mercado del biogás en Argentina	18
Figura 3.1: Gráfico de torta sobre la caracterización de la basura en San Rafael	24
Figura 3.2: Celda sin terminar y con gran cantidad de lixiviados	26
Figura 3.3: Celda Sin compactar	26
Figura 3.4: Nulo control de lixiviados en celdas	27
Figura 3.5: Crecimiento poblacional estimado para 2045	29
Figura 3.6: Diagrama de bloques de planta de separación	32
Figura 3.7: plano de planta de separación	32
Figura 4.1: Ubicación del departamento de San Rafael	34
Figura 4.2: Localización N°1 “La Tombina”	35
Figura 4.3: Localización N°2 “Parque industrial”	35
Figura 4.4: Referencia de la superficie aproximada que ocuparía el vertedero.	37
Figura 5.1: Esquema de un vertedero controlado	41
Figura 5.2: Metodo de trincheras	42
Figura 5.3: Método de área	43
Figura 5.4: Método mixto	43
Figura 5.5: Tuberías de recolección de lixiviados	46
Figura 5.6: Perfil típico de un relleno sanitario	47
Figura 5.7: Colocación de una tubería para recolección de lixiviados	47
Figura 5.8: Diseño espina de pescado	48
Figura 5.9: Típico perfil de diseño de transporte de lixiviados	48
Figura 5.10: Proceso de recirculación de lixiviados	49
Figura 5.11: Distribución de pozos de control de lixiviados.	50
Figura 5.12: Anclaje de membrana PEAD	52
Figura 5.13: Comportamiento del gas y del lixiviado en función del tiempo	55
Figura 5.14: Degradación anaeróbica de los RSU	55
Figura 5.15: Aplicaciones del biogás	57
Figura 5.16: Sistema de pozos verticales	60
Figura 5.17: Perfil de un pozo vertical	61
Figura 5.18: vista lateral de una trinchera	61
Figura 5.19: Detalle de un cabezal de trinchera	62
Figura 6.1: Área del proyecto	66
Figura 6.2: Diagrama de bloques del proyecto	66
Figura 6.3: Diagrama de flujo del proceso global	67
Figura 6.4: Tolva de recepción	68
Figura 6.6: Prensa enfardadora	69
Figura 6.7: Conformación del fardo	69
Figura 6.8: Forma de módulos que componen el vertedero controlado.	72
Figura 6.9: Secuencia constructiva del módulo	73
Figura 6.10: Compresor seleccionado	77
Figura 6.11: Principio de funcionamiento del compresor	78
Figura 6.12: Unidad de secado de biogás	78



Figura 6.13: Filtro para la entrada del compresor	79
Figura 6.14: Sistema de eliminación de sulfuro de hidrógeno	80
Figura 6.15: Sistema de remoción de siloxanos	81
Figura 6.16: Antorcha estática de tipo cerrada	82
Figura 6.17: Conducción hacia el pozo de lixiviados	84
Figura 6.18: Bomba sumergible	85
Figura 6.19: Bomba de recirculación de lixiviados.....	85
Figura 6.20: Motor de combustión interna	88
Figura 7.1: Organigrama del proyecto	91
Figura 10.1: Resumen de costos fijos	130
Figura 10.2: Análisis de sensibilidad	139



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Análisis de posibilidades de aprovechamiento energético del biogás	20
Tabla 3.1: Caracterización de la basura	23
Tabla 3.2: Tabla resumida de la caracterización de la basura	24
Tabla 3.3: Precios de los reciclables	25
Tabla 3.4: Proyección del crecimiento poblacional	28
Tabla 3.5: Diseño preliminar de la planta de clasificación	32
Tabla 4.1: Matriz de ponderación para la micro localización	36
Tabla 5.1: Propiedades físicas y químicas del biogás	56
Tabla 5.2: Potencial de generación eléctrica Fuente: Elaboración propia.....	57
Tabla 5.3: Alternativas de generación energética.....	64
Tabla 6.1: Estimación de la generación de Biogás en el Relleno Sanitario de San Rafael ..	76
Tabla 6.2: Generación de lixiviados	83
Tabla 7.1: Distribución del personal	92
Tabla 9.1: Factores ambientales que pueden ser afectados por el proyecto	110
Tabla 9.2: Principales acciones del proyecto	111
Tabla 9.3: Matriz de identificación de impactos ambientales	112
Tabla 9.4: matriz de importancia del impacto para la acción 1 (A1 = Desmonte, limpieza y movimiento de suelos)	115
Tabla 9.5: calificación de impactos.....	116
Tabla 9.6: Matriz de valoración de impactos ambientales	117
Tabla 9.7: Plan de contingencias ambientales	119
Tabla 10.1: Inversión inicial en edificios e instalaciones	122
Tabla 10.2: Inversión inicial en equipos e instalaciones principales	123
Tabla 10.3: Rodados.....	124
Tabla 10.4: Muebles y Útiles	124
Tabla 10.5: Costos diferidos.....	125
Tabla 10.6: Cronograma de Inversiones	126
Tabla 10.7: Personal empleado en la planta	128
Tabla 10.8: Costos por servicio.....	128
Tabla 10.9: Depreciaciones y amortizaciones	129
Tabla 10.10: Resumen de costos fijos	129
Tabla 10.11: Costos variables anuales	131
Tabla 10.12: Ingresos por venta de reciclables	133
Tabla 10.13: precios de los reciclables	134
Tabla 10.14: Ingresos del proyecto	134
Tabla 10.15: Flujo de caja del proyecto.....	136
Tabla 10.16: Análisis de sensibilidad	139



RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la factibilidad técnica, económica-financiera, social y ambiental de la inserción de un Vertedero Controlado, con una separación previa de los residuos sólidos de San Rafael, y un posterior aprovechamiento del biogás generado por los residuos sólidos urbanos depositados en el Vertedero Controlado.

La ubicación de la planta será en el predio actual de “La Tombina” en San Rafael, Mendoza.

El objetivo principal del proyecto es la correcta deposición final de los residuos en el municipio de San Rafael e implementar mejoras sobre el Basural a cielo abierto de la misma ciudad.

La separación de los residuos y la posterior generación de energía renovable, colaboran así a solucionar el grave problema medioambiental de las emisiones de metano a la atmósfera y por ende a disminuir el impacto de los residuos sobre el calentamiento global. El aprovechamiento del biogás no es solo una medida mitigadora, sino también una solución de la ingeniería por transformar lo desechable en un recurso valioso, el cual no solo aportará de energía verde a la matriz energética del país, sino que también resguardará los recursos naturales del territorio argentino.

Todo el biogás generado por los RSU dispuestos en el vertedero, se captará a través de un sistema de captación de trincheras, y luego será introducido a la planta, el cual pasará por una serie de equipos que tratarán la mezcla de gases para poder llevarlo a la calidad requerida por los moto-generadores que realizarán el trabajo de transformarlo en energía eléctrica. La planta está diseñada para cumplir con la normativa vigente de emisiones gaseosas a la atmósfera.



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto nace con el objetivo de seleccionar un sistema de tratamiento apropiado para los residuos sólidos urbanos de San Rafael y la factibilidad de producir biogás a partir de los mismos, es importante considerar dos planteamientos que pueden incidir en la sostenibilidad del modelo de gestión; el primero es si la tecnología seleccionada es la más apropiada para las realidades locales y lo segundo es si los costos que ameritan su implementación y operación justifican esta inversión.

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 denominada biogás. La recuperación y purificación de este biogás genera grandes beneficios medioambientales e impulsa el desarrollo de una economía circular.

Argentina cuenta con un alto potencial para desarrollar la industria del biogás debido a la abundancia de biomasa húmeda y a una demanda energética insatisfecha, especialmente en regiones alejadas de los centros urbanos. En un contexto global que avanza hacia la transición energética, el biogás surge como una solución sustentable: es una mezcla de metano y otros gases generada por la descomposición principalmente anaeróbica de materia orgánica, como residuos agrícolas, estiércol animal y basura doméstica.

Este recurso renovable puede utilizarse como sustituto del gas natural en redes existentes, en la generación de electricidad y calor mediante cogeneración, tras su purificación. Además, su producción permite valorizar residuos, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir con el abastecimiento energético.

En países como Alemania, China, India y Brasil, el biogás ya forma parte del sistema energético. En Argentina, su desarrollo permitiría reducir la dependencia de hidrocarburos, mejorar el acceso a la energía en zonas aisladas y fomentar inversiones privadas en el marco de un modelo energético más resiliente y sostenible.

1.1 OBJETIVO

1.1.1. Objetivos principales

Evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica de producir biogás a partir de residuos orgánicos dispuestos en un relleno sanitario para San Rafael, con fines energéticos y sostenibilidad ambiental.

El objetivo del proyecto será el potencial de generación de biogás de los Residuos Sólidos Urbanos dispuestos en un relleno sanitario, analizando las tecnologías de captación y purificación del biogás, promoviendo la economía circular y aprovechar al máximo la energía sobrante que tienen los Residuos al fin de su vida útil. La Figura presentada ilustra el modelo de **economía circular**, el cual busca optimizar el uso de los recursos a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos, desde el diseño y la producción hasta su consumo, reutilización



y disposición final. En este esquema, los residuos dejan de considerarse un desecho para transformarse en insumos que regresan al sistema productivo en forma de materiales reciclados o energía, fomentando así la eficiencia, la innovación y la sostenibilidad ambiental. Este enfoque se alinea con los objetivos del presente proyecto, que propone la valorización de los residuos sólidos urbanos a través de la recuperación de materiales reciclables y la generación de biogás como fuente de energía renovable.

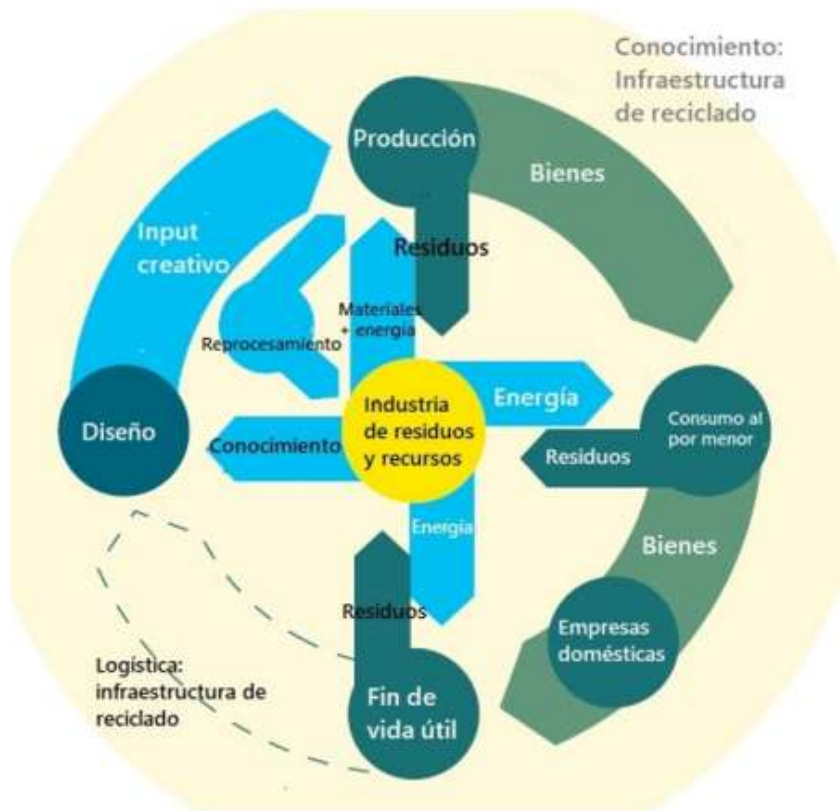


Figura 1.1: Esquema de economía circular

Fuente: Economía circular, tendencias e ideas emergentes, ISWA, 2014

1.1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los residuos sólidos urbanos de San Rafael, identificando su composición y potencial para la generación de biogás.
- Analizar las condiciones operativas del relleno sanitario, incluyendo su diseño, su manejo actual y capacidad para implementar un sistema de captación de biogás.
- Evaluar el potencial de producción de biogás, considerando las tasas de generación de metano y los factores que influyen en su rendimiento.
- Diseñar un esquema preliminar para la captación, tratamiento y utilización del biogás, explorando opciones como generación de energía eléctrica, uso térmico o inyección en redes de gas natural.
- Realizar un análisis de viabilidad económica y ambiental, considerando los costos de implementación, los beneficios derivados de la generación de energía y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Proponer lineamientos técnicos y estratégicos para la implementación del proyecto en el relleno sanitario, promoviendo su integración en políticas locales de gestión de residuos y desarrollo sostenible.



1.2. ALCANCE

Comprende la etapa de diseño del relleno sanitario, análisis de factibilidad técnica, captación y purificación del biogás, caudal de biogás a generar y evaluación económica de la planta.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la Ciudad de San Rafael dispone sus residuos en un vertedero a cielo abierto conocido como La Tombina. En el cual no existe separación in situ por lo que se pierde valor agregado de los residuos reciclables ya que todos los residuos son dispuestos en el mismo lugar. Los lixiviados y gases generados no son tratados por lo cual generan una contaminación significativa al medio ambiente. Esta práctica genera serios riesgos ambientales: contaminación de aguas subterráneas, emisión de gases sin control, proliferación de vectores animales, etc.

Debido a lo mencionado anteriormente, el presente proyecto propone el diseño preliminar de un vertedero controlado, de una planta de separación de residuos, sistemas de captación y tratamiento de lixiviados para mitigar los impactos que pueden tener sobre el agua subterránea, sistema de captación y purificación de biogás y posterior valorización.

El diseño de este proyecto permite reducir al mínimo los desperdicios y la contaminación, manteniendo el valor de los productos materiales y recursos en la economía durante el mayor tiempo posible.

1.4. ANTECEDENTES

La Planta de producción de energía eléctrica “El Borbollón” sentó un precedente en la Argentina y a que es el primer sistema piloto de generación de energía eléctrica a partir del biogás captado de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en el Relleno Sanitario ubicado en El Borbollón, Las Heras, Mendoza. Esta planta cuenta con una potencia instalada de 130kW según datos de Emesa.



CAPÍTULO 2

ESTUDIO DE MERCADO

2.1. MERCADO GLOBAL DEL BIOGÁS

El mercado global del biogás ha crecido fuertemente en los últimos años. Según Fortune Business Insights, el valor global fue de USD 133,61 mil millones en 2024, con una proyección de crecimiento a USD 191,19 mil millones en 2032 (CAGR ~4,5 %). Precedence Research estima incluso que la cifra alcanzará USD 291,66 mil millones en 2034 (CAGR 4,33 %). En 2025 el mercado global se estima en USD 170,9 mil millones. Estas cifras reflejan la creciente adopción del biogás como fuente renovable para generación eléctrica, térmica y biometano. Europa es actualmente la región líder (39,6 % del mercado global en 2024).

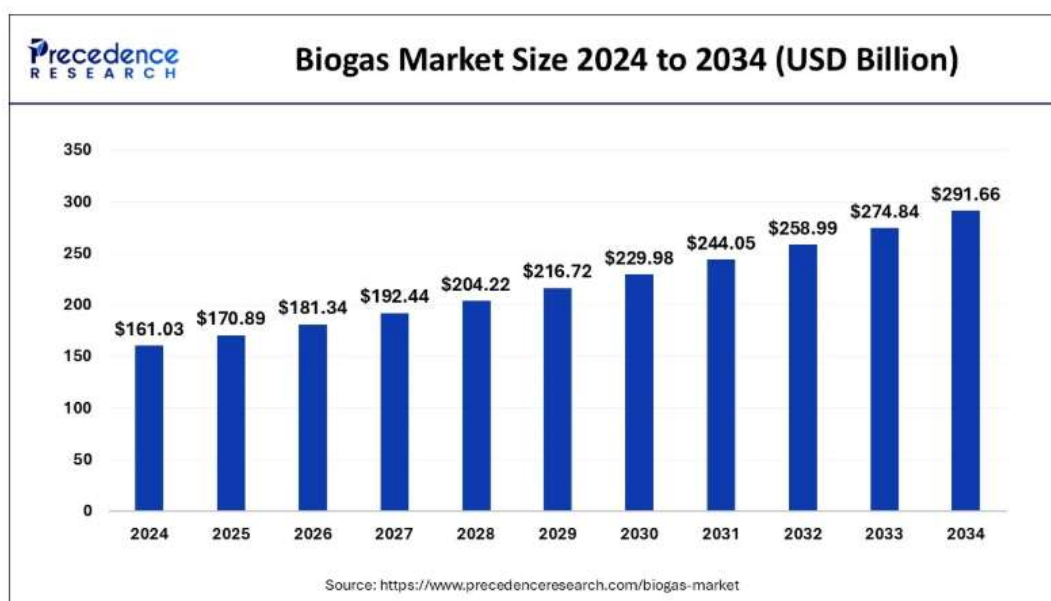


Figura 2.1: Tamaño de mercado del Biogás de 2024 a 2034
Fuente: Precedence research

<https://www.precedenceresearch.com/biogas-market#:~:text=The%20global%20biogas%20market%20size,from%202025%20to%202034>

El segmento municipal tuvo la mayor participación de mercado, con un 45% en 2024. La principal fuente de biogás son los residuos municipales, que incluyen periódicos, ropa, muebles, botellas, latas, alimentos y electrodomésticos. Los residuos municipales, también conocidos como basura, se recolectan de cada persona en cada localidad. Esta amplia gama de residuos se utiliza para la producción de biogás. La abundancia de residuos municipales impulsa el crecimiento de este segmento.

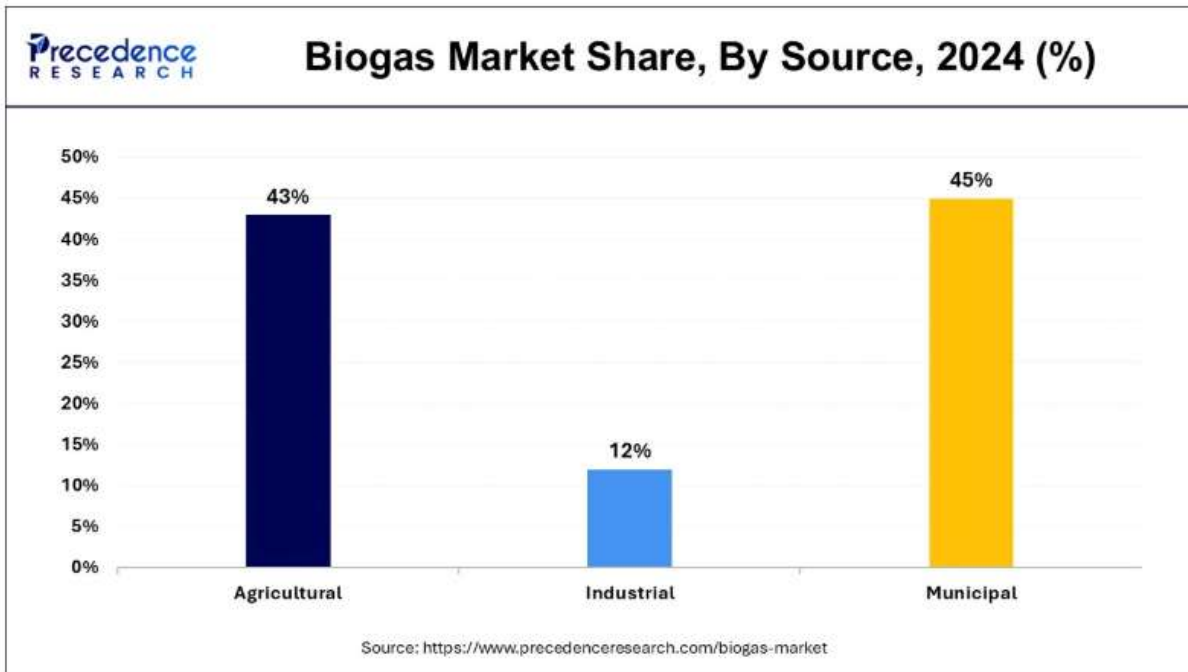


Figura 2.2: Principales fuentes de producción de biogás

2.1.1. Principales regiones y países productores

Europa concentra la mayor parte de la producción de biogás: produce aproximadamente 2.000 millones de metros cúbicos anuales. En la Unión Europea, los países clave son Alemania, Reino Unido, España, Italia y Suecia. De hecho, Alemania es el país con más biogás instalado en el mundo (más de 10.000 plantas operando). Asia-Pacífico (particularmente India y China) muestra rápido crecimiento por políticas de gestión de residuos. Norteamérica también juega un papel importante: EE.UU. dispone de 2.200 plantas de biogás (incluyendo digestores en granjas, depuradoras y rellenos sanitarios). En conjunto, Europa, América del Norte y Asia-Pacífico dominan la producción mundial de biogás, apoyados por marcos regulatorios favorables y altos objetivos de energías renovables.



Figura 2.3: Tasa de crecimiento del biogás en el mundo
Fuente: Mordor intelligence

2.1.2. Tendencias tecnológicas y regulatorias



El impulso regulatorio global es fuerte: la transición energética y compromisos climáticos (Pacto Verde Europeo, Acuerdo de París) fomentan la inversión en biogás. Por ejemplo, la Directiva de Energías Renovables de la UE fija un objetivo del 32 % de renovables para 2030, incentivando el biometano. En EEUU se han promovido incentivos fiscales a biogás (ley IRA) y en Asia hay programas de manejo de residuos que incluyen digestión anaeróbica. Tecnológicamente, se avanza en **purificación** de biogás a biometano de alta calidad, así como en sistemas de co-digestión y optimización de la digestión (p.ej. con IA para monitoreo). También hay crecientes aplicaciones móviles (estaciones de GNL/LBG, uso vehicular).

2.1.3. Aplicaciones del biogás

El biogás se aprovecha principalmente para generación eléctrica y térmica (cogeneración en plantas) y, tras purificación, como biometano equivalente al gas natural. Al 2024, el segmento de generación eléctrica aporta ~32 % de los ingresos globales del biogás, en línea con su aplicación masiva en redes eléctricas rurales o industriales. El biometano puede inyectarse a redes de gas o usarse en transporte (vehículos de GNC), reduciendo emisiones hasta 60–80 % respecto a combustibles fósiles.

Más allá de la energía, los *subproductos* del biogás tienen alto valor: el digestato resultante es un fertilizante orgánico rico en nitrógeno, fósforo y potasio. Digestato de alta calidad puede sustituir fertilizantes sintéticos, cerrando el ciclo de nutrientes y mejorando la materia orgánica del suelo. Este fertilizante orgánico es eficiente y reduce la contaminación (al reciclar fosfatos, mitigar lixiviados, etc.). En ocasiones el biogás también se destina a la obtención de biocombustibles avanzados (como bio-MEG o hidrógeno renovable) o a la industria química para generar materias primas renovables, aunque esto es menos difundido. En resumen, las aplicaciones energéticas lideran, con usos secundarios en agricultura (fertilizante) e industria química.

2.1.4. Principales actores del mercado global

El mercado del biogás es muy fragmentado, con numerosos actores locales e internacionales. Entre los líderes mundiales destacan empresas europeas y americanas como Envitec Biogas (DE), Air Liquide (FR), Ameresco (EE.UU.) y StormFisher (CA). Otras firmas clave incluyen Future Biogas (UK), Weltec (DE), PlanET Biogas (DE), Scandinavian Biogas (SE), Renergon (CH) y Quantum Green (IN). Estas compañías invierten en expansión de capacidad, tecnologías de upgrading y alianzas locales. Por ejemplo, en 2020 Brightmark (EE.UU.) lanzó un proyecto de biogás lácteo en Nueva York. Adicionalmente operan cooperativas y empresas energéticas regionales (p.ej. Gasum en Escandinavia, GAIL en India) que impulsan la generación de biogás o biometano bajo esquemas locales.

2.2. MERCADO EN ARGENTINA DEL BIOGÁS

El biometano es un recurso energético renovable, flexible y limpio, que en la Argentina puede adquirir una gran participación en la utilización en redes de distribución, el transporte o sistemas cerrados sin mayor costo de infraestructura. Actualmente, en el país hay 28 plantas de biogás en funcionamiento que permiten la generación de unos 51 Mwh de energía eléctrica, esto es el equivalente a unos 370.000 m³ día de gas natural, y hay otras 24 en construcción a partir de la licitación RenMDI, por otros 30 Mwh que deberían estar operando por contrato para 2026.



Sólo en las provincias de Córdoba, Santa Fe y Buenos Aires, se estima que tiene el potencial para impulsar la construcción de 324 plantas, con una inversión de US \$2.170 millones y la creación de más de 10.000 empleos directos e indirectos en la operación de las plantas. A nivel nacional, el potencial de la industria permite elevar las proyecciones a una producción equivalente a 14 MMm3/día de gas natural, es decir el 10% de la demanda actual del país, que se alcanzaría con unas mil plantas de producción que requerirían US\$ 5000 millones de inversión.

Esa disponibilidad que ofrece esta generación renovable ofrece una potencia de base que otras tecnologías como la solar o la eólica no pueden ofrecer, lo que permite en un principio un complemento de las otras fuentes con una energía más estable las 24 horas. Así, además del menor costo ambiental esta alternativa es mucho más económica que la generación eléctrica a partir de diésel.

Actualmente hay una industria tecnológicamente desarrollada que tiene en análisis la sustentabilidad y la sustitución de biofertilizantes derivados del biogás y las nuevas tendencias en relación al biometano que permita llevarlo a un equivalente del gas natural para ser inyectado a las redes. Otra alternativa de uso es el BIO-GNC en el transporte público, es decir, biometano comprimido para utilizar en los colectivos urbanos.

- En 2023, el mercado argentino de biogás alcanzó USD 618 millones, con una proyección de USD 1 000 millones para 2030
- En 2023, Argentina representó aproximadamente el 0,9 % del mercado global de biogás
- Se prevé que el mercado argentino crezca a una tasa de crecimiento anual compuesta del 7,1% entre 2024 y 2030.

Argentina biogas market, 2018-2030 (US\$M)

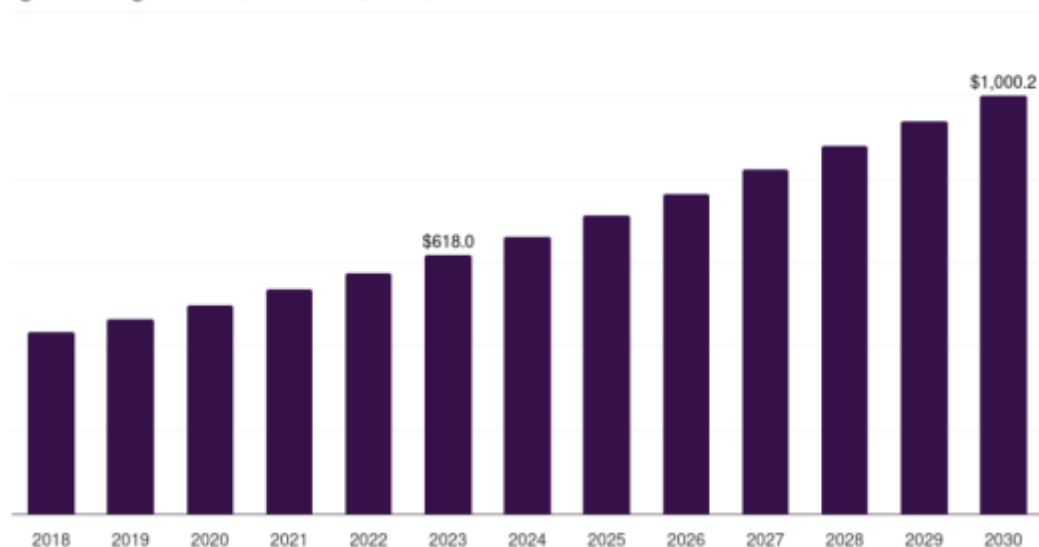


Figura 2.4: Mercado del biogás en Argentina
Fuente: Grand view research

2.3. MERCADO EN SAN RAFAEL DEL BIOGÁS



Actualmente no existe producción de biogás a partir de RSU en San Rafael, sin embargo, a continuación, se describe, de manera estimativa, el posible mercado del biogás en el departamento.

2.3.1. Demanda energética local

El departamento de San Rafael muestra una demanda de energía en crecimiento. En 2024 la ciudad recibió **100 toneladas diarias de RSU** en el relleno, además de 120 t/d de residuos de barrido, reflejo de una población mayormente urbana y actividad comercial/viticultora importante.

2.3.2. Actores clave en la zona

Los principales actores locales en energía y residuos son:

- **Municipio de San Rafael:** gestiona el vertedero y políticas de residuos. Ha impulsado iniciativas como el “Complejo Ambiental San Rafael + Verde” para reciclar residuos y prolongar la vida del vertedero.
- **Cooperativas eléctricas/distribuidoras:** Una cooperativa local surte electricidad a los usuarios; el regulador provincial (EPRE) define tarifas y proyectos.
- **Empresas industriales:** Bodegas, frutales y maquinaria tienen alto consumo eléctrico/industrial. Podrían demandar energía renovable local o biometano como combustible para procesos o transporte interno.
- **Transporte y GLP:** En el Sur mendocino aún no se ha finalizado la construcción del gasoducto, la población usa GLP distribuido en garrafas o GNC. Flotas de camiones, buses rurales o estacionarios podrían estar interesados en biometano comprimido (GNC) como sustituto de GLP/combustibles.
- **Cooperativas de gas y GLP:** Aunque falta gas natural canalizado, distribuidoras de GLP (YPF Gas, etc.) sirven la región. Un productor local de biometano tendría que coordinar con ellas si se opta por reemplazar el GLP.
- **Instituciones públicas:** EPRE que regula tarifas en Mendoza y proyectos eléctricos; ENARGAS que es el ente regulador de gas y ENRE que es el ente regulador de la Energía en la nación, definen condiciones para la inyección de biogás. Estas instancias serían intermediarios ante la inyección de cualquier planta nueva.

2.3.3. Modalidades de comercialización

El biogás del relleno puede destinarse a:

- **Venta de electricidad:** Instalar un generador de energía que funcione a partir de biogás.
- **Biometano para red o GNC:** Purificar el biogás para obtener **biometano**. Si existiera conexión a gasoducto, podría inyectarse al sistema nacional, comprimirse y venderse como **GNC** a flotas locales o licuarse parcialmente para reemplazar GLP.
- **Uso directo térmico o en instalaciones:** Parte del biogás podría quemarse en calderas industriales u hornos para secado de productos.



Las **opciones principales** son entonces: generar electricidad o producir biometano para uso en transporte/GLP. A continuación, se compara esquemáticamente la escala económica aproximada de ambos:

Producto	Producción anual estimada	Precio local (USD unidad)	Ingreso anual (USD)	Ingreso 20 años (USD)
Electricidad	~12 GWh/año (1,5 MW continuo)	≈ USD 0,05/kW	~600 000 USD/año	~12 000 000 USD (sin descontar)
Biometano (GNC)	0,91 Mm ³ CH ₄ /año (50% captura)≈1,8 Mm ³ /año (80% captura)	≈ USD 0,15/m ³	273 000 USD/año	5,46 MUSD

Tabla 2.1: Análisis de posibilidades de aprovechamiento energético del biogás

El potencial de metano se estima en ~50 Nm³ de CH₄ por tonelada de RSU, equivalente a ~910 000 m³ CH₄ al año con 50 % de captura (doble si se optimiza). A USD 0,15/m³ (precio de GNC) da ~140 000 USD/año; con 80 % de captura, sería ≈273 000 USD/año. Para electricidad se asumió venta a red a tarifa minorista (~USD 0,05/kW). Los ingresos a 20 años se calculan multiplicando anual por 20, sin considerar decrecimiento de producción ni inflación.

2.3.4. Estimación de ingresos y escalabilidad

Considerando un horizonte de 25 años (vida útil del vertedero), se esperan ingresos sustanciales, aunque decrecientes. Un proyecto de **cogeneración eléctrica** (≈1–2 MW) podría generar 10–15 GWh/año inicialmente, con ingresos ~USD 0,5–0,9 M/año (USD 10–18 M en 20 años). Por su parte, si se purifica a **biometano** la fracción de metano capturada (hasta ~80 %), se obtendrían ~1,8 Mm³/año de CH₄ y unos USD 0,27 M/año (USD 5,4 M en 20 años) vendiendo a precio de GNC. La venta de digestato orgánico (como fertilizante) aportaría beneficios indirectos en materia orgánica agrícola, pero se considera secundario como flujo de ingresos.

En resumen, la **venta de electricidad** es la alternativa con mayor potencial de ingresos, aunque requiere inversión en generador y conexión a la red local. El **biometano** ofrece menor facturación, pero diversifica mercados (por ejemplo, transporte y GLP). La mejor opción puede combinar ambas: generar electricidad en etapas iniciales y, conforme crezca la infraestructura de gas renovable (p.ej. posibles futuras conexiones), avanzar hacia biometano. La viabilidad dependerá de incentivos regionales (tarifas, créditos de carbono) y de la colaboración con actores locales como cooperativas eléctricas, industrias consumidoras y autoridades provinciales.

2.3.5. Barreras de mercado

De Entrada:



- Nivel alto requerido de inversión inicial.
- Competencia imperfecta.
- Falta de experiencia y conciencia medioambiental en la zona.
- Falta de conocimientos y habilidades técnicas.
- Capacidad de producción limitada debido a los niveles generados de Biogás.
- Falta de apoyo y estímulo por parte de las autoridades en proyectos de inversión medioambiental.

De Salida:

- Negativa del gobierno a la decisión de salida debido a la falta de empleo, a la necesidad de tratamiento de los desechos y al aporte energético consecuente.
- Compromiso con instituciones financieras y proveedores a largo plazo.
- Altos costos hundidos: Inversión en biodigestores, sistemas de captura de gas, pozos, redes de transporte del gas ya que son activos poco reutilizables.
- En un contexto de compromisos climáticos como el Acuerdo de París, abandonar un proyecto de energía renovable puede generar sanciones de reputación o dificultades para conseguir financiación internacional futura.



CAPÍTULO 3 TAMAÑO

Para realizar y diseñar un proyecto de Relleno Sanitario necesitamos primeramente la elaboración de un diagnóstico sobre la gestión de los residuos en el municipio con el fin de saber y proyectar el volumen de residuos sólidos urbanos o asimilables que se dispondrá en el relleno sanitario en los próximos 20 años. Es sumamente importante conocer el origen y tipo de residuos que han de ser recolectados y dispuestos, cuál es su composición, la tasa de generación de los mismos y sus características físicas tales como densidad, humedad y poder calorífico.

3.1. CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS RSU

La caracterización de residuos es una herramienta esencial para la gestión efectiva de los mismos, ya que proporciona información valiosa para tomar decisiones informadas sobre cómo manejar los residuos en una ciudad. Ésta consiste en determinar las características y propiedades de los residuos generados en una ciudad, incluyendo su composición, cantidad, tipo y origen.

3.1.1 Tasa 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.

En primer lugar, se deben determinar las cantidades de cada clase de residuo. Para este proyecto se dividirán los residuos tratados por el vertedero en dos clases:

- Residuos clase A: serán todos aquellos residuos domiciliarios orgánicos e inorgánicos recolectados por los camiones compactadores.
- Residuos clase B: serán aquellos residuos de poda y jardín. Incluyendo también escombros y chatarra.

A través de los datos aportados por el municipio del departamento se tiene que la tasa de generación promedio de residuos clase A es de 0,5 kg/hab.día.

Según los datos relevados por el INDEC en el censo del año 2022, la población del departamento de San Rafael cuenta con 210.478 habitantes.

A partir de estos datos se estima que la generación diaria de basura en San Rafael es de aproximadamente 105.239 kg/día para residuos clase A.

Respecto a los residuos de clase B no se tienen datos certeros sobre la cantidad de generación de estos residuos, pero ayudan con la compactación y relleno de la celda. Al ser de gran tamaño generan porosidad en el relleno ayudando al movimiento de los gases y de los lixiviados para su posterior tratamiento. Por lo que sería bueno agregarlos al vertedero en caso de no estar contaminados.



Observando poblaciones similares se puede estimar un volumen aproximado de 65.000 kg/día, haciendo un promedio de todo el año. Lo que da como resultado una tasa de generación de 0.3 kg/hab.día

En cuanto a la caracterización de los residuos cabe destacar que para la ciudad de San Rafael no se ha realizado un muestreo formal por parte del municipio, por ende, no se cuenta con datos reales de la composición de una basura típica. Ante esta situación se ha optado por investigar poblaciones similares en las cuales se haya realizado una caracterización relevante. Se han obtenidos datos del departamento colindante de General Alvear el cual cuenta con una población de 46.429 (INDEC, 2010), una tasa de generación de residuos de 0,43 kg/hab. día de residuos clase A y de 1,37 kg/hab. día de residuos clase B. Se debe mencionar que el elevado valor para los residuos de clase B se debe en gran parte a que el estudio fue realizado en época otoñal.

3.1.2 Composición de los residuos

Estimando que los hábitos de consumo de los departamentos vecinos son similares se puede proceder a relacionar la caracterización hecha para General Alvear con la del departamento de este proyecto.

La composición típica de residuos será la siguiente:

Tipo de residuo	Porcentaje
PET cristal	1,90%
PET color	0,50%
PET aceite	0,25%
PEBD	1,63%
PEAD	0,80%
PP	0,50%
PS expandido	0,43%
PS	0,50%
PVC	0,07%
Otros plasticos	7,83%
Papel	1,27%
Carton	5,61%
Tetra	0,82%
Sanitarios	21,52%
Restos de comida	38,22%
Restos jardin	4,77%
Textiles	4,70%
Vidrio	3,09%
Metal ferroso	0,89%
Metal no ferroso	0,43%
Otros	3,16%
Peligrosos	0,51%
Liquidos	0,60%
Total	100,00%

Tabla 3.1: Caracterización de la basura



Tipo de residuo	Porcentaje
Plasticos no reciclables	5,58%
Plasticos reciclables	8,83%
Materia organica	42,99%
Papel y carton	6,88%
Vidrio	3,09%
Metales	1,32%
Sanitarios	21,52%
Otros	9,79%
Total	100,00%

Tabla 3.2: Tabla resumida de la caracterización de la basura

La Figura muestra la caracterización de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), diferenciando los principales tipos que componen la corriente de desechos. Se observa que la fracción más significativa corresponde a la materia orgánica (43%), seguida por los residuos sanitarios (21%) y los plásticos no reciclables (10%), mientras que materiales valorizables como papel y cartón, plásticos reciclables, vidrio y metales representan porcentajes menores, pero de gran importancia para los procesos de recuperación y reciclaje. Esta clasificación resulta esencial para dimensionar la planta de separación y definir las estrategias de aprovechamiento de materiales y generación de biogás.



Figura 3.1: Gráfico de torta sobre la caracterización de la basura en San Rafael
Fuente: Elaboración propia

Como se ha mencionado en más de una oportunidad, la producción de biogás va a depender fuertemente de la cantidad de materia orgánica que se pueda procesar en el relleno sanitario. La planta de separación de residuos va a retirar todos aquellos que sean reciclables, siendo estos, aquellos que poseen una vía de valorización posterior.



A partir de los datos obtenidos de la tabla resumida podemos ver que estos son el vidrio (3,09%), metales (1,32%), papel y cartón (6,88%) y plásticos reciclables (8.83%). Lo que nos da como resultado que aproximadamente el 20% de la basura contiene residuos reciclables que deben separarse en la planta de clasificación previo al ingreso del vertedero. De esta manera la composición final de la basura que ingresa al vertedero queda determinada por la sumatoria de los polímeros no reciclables, materia orgánica, sanitarios y otros.

Los resultados de la caracterización nos servirán para determinar la cantidad de residuos que se podrán valorizar como productores de biogás, de los 0,5 kg/hab.día que se producen de residuos de clase A, un 43% es contenido de materia orgánica, por ende, la tasa de generación de materia orgánica será de 0,215 kg/hab.día. Por otro lado los residuos de clase B suelen contener aproximadamente un 30% de escombros y chatarra, los cuales no serán productores de biogás, entonces para este caso se tendrá una tasa de generación de materia orgánica del 0,21 kg/hab.día. Dando como resultado una tasa total de 0,425 kg/hab.día.

3.1.3. Precios de los reciclables

La siguiente tabla muestra los valores en pesos argentinos de cada uno de los materiales reciclables. Esta información es de gran utilidad a la hora de calcular ingresos por venta de reciclables.

Material	Mínimo (\$/Kg)	Máximo (\$/Kg)	Promedio (\$/Kg)
PEAD	590	612	601
PET	60	600	330
Papel	50	200	125
Cartón	85	180	132,5
Vidrio	41	50	45,5
Aluminio	1300	2210	1755
Material ferroso	700	800	750

Tabla 3.3: Precios de los reciclables

Fuente: <https://www.conexionreciclado.com.ar/recursos>

Se toma un valor promedio de los productos reciclables, ya que su valor depende de la calidad y de la limpieza y separación estricta que tengan.

- Situación actual del vertedero

El vertedero “La Tombina” comenzó su operación en septiembre de 2007 y en la actualidad se encuentra desbordado. El vuelco es indiscriminado con respecto a las zonas impermeabilizadas poniendo en riesgo las capas acuíferas, no existe un control de lixiviados, hay presencia de vectores transmisores de enfermedades, efectos adversos como la quema



espontánea de basura, emisiones de biogás no controlados y el impacto paisajístico negativo que todo esto implica.

No existe una barrera perimetral que impida el acceso de personas y animales.

La gestión de residuos es nula e ineficiente por lo que hay materiales de valor que son depositados en el vertedero.



Figura 3.2: Celda sin terminar y con gran cantidad de lixiviados



Figura 3.3: Celda Sin compactar



Figura 3.4: Nulo control de lixiviados en celdas

3.2. PROYECCIÓN DEMOGRÁFICA DE LA POBLACIÓN DE SAN RAFAEL

Realizar una proyección demográfica permite estimar la cantidad de residuos generados en el futuro por la población de la ciudad, lo cual posibilita determinar el tamaño y la capacidad necesarios para el Relleno Sanitario. Si no se realiza una proyección precisa, el Relleno Sanitario podría estar subdimensionado, y por lo tanto quedarse sin espacio antes de lo planificado, lo que resultaría en la necesidad de encontrar nuevas ubicaciones o costosos procesos de expansión, o, por el contrario, podría estar sobredimensionado, lo cual hace que sea demasiado grande y costoso de operar.

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).

$$r = \frac{Pob\ B - Pob\ A}{Año\ B - Año\ A} \quad (1)$$

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 = Población del penúltimo censo

$$Pob\ N = Pob\ n + r * (Año\ N - Año\ n) \quad (2)$$

Según el censo INDEC del año 2010 y 2022, la cantidad de habitantes en el departamento de San Rafael era de 188.018 y de 210.478 respectivamente; en base a estos resultados se pueden establecer valores aproximados del crecimiento poblacional año por año aplicando el método anteriormente explicado.



$$r = \frac{210.478 - 188.018}{2022 - 2010} = 1871,66 \text{ hab/año}$$

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 3.4:

Año	Población	Tn de RSU	Tn de MO	Tn de Reciclables	Tn depositadas en vertedero
2022	210478	61460	26120	9834	51626
2023	212350	62006	26353	9921	52085
2024	214221	62553	26585	10008	52544
2025	216093	63099	26817	10096	53003
2026	217965	63646	27049	10183	53462
2027	219836	64192	27282	10271	53921
2028	221708	64739	27514	10358	54381
2029	223580	65285	27746	10446	54840
2030	225451	65832	27979	10533	55299
2031	227323	66378	28211	10621	55758
2032	229195	66925	28443	10708	56217
2033	231066	67471	28675	10795	56676
2034	232938	68018	28908	10883	57135
2035	234810	68564	29140	10970	57594
2036	236681	69111	29372	11058	58053
2037	238553	69657	29604	11145	58512
2038	240425	70204	29837	11233	58971
2039	242296	70751	30069	11320	59430
2040	244168	71297	30301	11408	59890
2041	246040	71844	30534	11495	60349
2042	247911	72390	30766	11582	60808
2043	249783	72937	30998	11670	61267
2044	251655	73483	31230	11757	61726
2045	253526	74030	31463	11845	62185
Total (2025-2045)		1439853	611937	230376	1209476

Tabla 3.4: Proyección del crecimiento poblacional

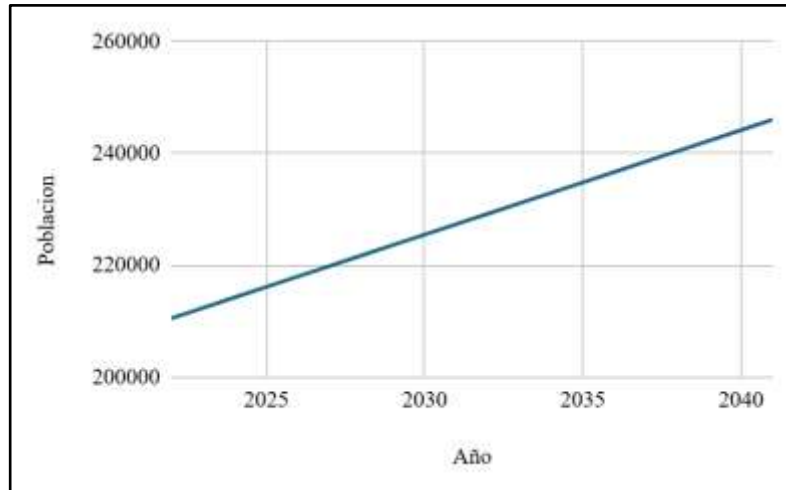


Figura 3.5: Crecimiento poblacional estimado para 2045

3.3. CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL VERTEDERO

Para proceder al cálculo del volumen del vertedero además de la tasa de generación se debe determinar la densidad de residuos compactados en el vertedero, la cual se define como la relación entre el peso de los residuos y el volumen que ocupan.

La densidad de los residuos dispuestos y compactados es un dato crítico para el cálculo del volumen de residuos a disponer. La densidad de los RSU pasa por distintos valores de acuerdo a la etapa de gestión en la que se encuentra. En estado suelto es decir en origen, la densidad oscila entre 80 a 120 kg/m³, y después de la compactación en Camión Recolector, su valor aumenta a 350-500 kg/m³, en función del estado de la prensa de dicho equipo. En el relleno, los residuos pueden alcanzar valores desde 600 kg/m³ hasta 1.100 kg/m³, dependiendo su valor final promedio del espesor de residuos compactados, el peso del equipo compactador y el número de pasadas realizadas para cada capa compactada.

Existen pocos datos regionales de la densidad alcanzada en rellenos sanitarios, a excepción de las estadísticas del CTDF del Valle de Uco, donde se han alcanzado densidades superiores a 1,1 Tn/m³. Dicha densidad ha sido alcanzada con equipos pesados (Topadora sobre Orugas de 20 Tn de peso) en capas compactadas de espesores menores de 30 cm.

Por lo tanto, y teniendo en cuenta datos regionales, se adopta para el diseño del primer Módulo, la densidad de 1,0 Tn/m³, para los residuos compactados en su posición final, teniendo en cuenta que los equipos serán similares a los utilizados en el vertedero mencionado.

- **Población estimada:** 210.478 habitantes
- **Tasa de generación total:** 0.8 kg/hab·día
- **Densidad compactada:** 1000 kg/m³
- **Vida útil del vertedero proyectada:** 20 años

Cálculos:

Volumen necesario:

$$1.209.476 \text{ ton} / 1 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} = 1.209.476 \text{ m}^3$$



Serán necesarios $s \text{ m}^3$ para disponer los RSU acumulados durante 20 años.

3.4. CÁLCULO DEL ÁREA REQUERIDA

Para determinar el área requerida en primer lugar debemos definir la profundidad del vertedero. Se realizó investigación bibliográfica para decidir qué profundidad utilizar.

Tchobanoglous, Theisen & Vigil (1993)

- Recomiendan celdas con 6 m de altura para garantizar un buen grado de compactación y facilidad de operación (distribución, triturado y cobertura) sin generar presiones excesivas sobre la barrera impermeable primaria.
- Citan además que alturas mayores (hasta 10 m) pueden emplearse en sitio con geología estable y tras un estudio geotécnico riguroso, pero añaden que las celdas de 6 m son “las más comunes para vertederos municipales”.

U.S. EPA

- Para garantizar la integridad de la barrera de impermeabilización, la Agencia recomienda mantener volúmenes por celda que no superen los 7 m de altura entre fondo y cobertura diaria. Esto facilita la inspección de filtraciones y el mantenimiento de los sistemas de lechada y gas.

En primer lugar, se propone una profundidad de 6m:

$$A = \frac{V}{h}$$
$$A = \frac{1209476 \text{ m}^3}{6\text{m}} = 201.579 \text{ m}^2$$

Superficie equivalente a 21 ha aproximadamente.

En segundo lugar, se propone una profundidad de 8m

$$A = \frac{1209476 \text{ m}^3}{8\text{m}} A = 151.184,5 \text{ m}^2$$

Es una superficie equivalente a 15 ha aproximadamente

Se **recomienda diseñar las celdas con una altura de aproximadamente 6 m**, de este modo:

- Se facilita la operación diaria (distribución, compactación y cobertura).
- Se reduce la presión sobre la barrera impermeable primaria.
- Se mantiene un balance favorable entre capacidad y seguridad estructural.

A los efectos de proceder a la disposición de los Residuos Sólidos aplicando la técnica de Relleno Sanitario, el área destinada para la realización de las obras, deberá resultar acondicionada conforme a las siguientes pautas.

Delimitación del área: El área deberá estar limitada perimetralmente contando con un cerco natural o artificial a efectos de evitar el ingreso de todo aquello ajeno a la obra.



Control de Ingreso: Deberá preverse la infraestructura edilicia necesaria para efectuar las tareas de control de ingreso y egreso de residuos, personas, vehículos y equipos.

Se preverá la colocación de postes, barreras y señales para dirigir el tránsito dentro de la obra hacia las oficinas de control y trámites y hacia la zona de descarga, y carteles que indiquen las normas y disposiciones de circulación dentro del predio, como así también las de Higiene y Seguridad en el Trabajo.

Zona de Amortiguación: Se debe establecer una superficie perimetral al sitio, contigua al cercado perimetral de por lo menos 30 m de ancho, sobre la cual se realizarán tareas de forestación a modo de cortinas, parquización, infraestructura edilicia administrativa y obradores.

3.4 PLANTA MANUAL DE SEPARACIÓN DE RESIDUOS

El proceso consiste en disponer varias personas a lo largo de una cinta transportadora e instruir a ellas a seleccionar varios tipos de residuos. Los subproductos resultantes de este proceso son los materiales potencialmente reciclables y aprovechables, que pueden ser valorizados y comercializados para posteriores procesos productivos e industriales, estos son principalmente productos reciclables como papel, cartón, plástico, vidrio, entre otros.

3.4.1 Áreas funcionales de la planta

Recepción y Control

- Tolva de recepción de residuos.
- Báscula para pesaje de camiones.
- Rampa de descarga.
- Espacio para maniobras y control sanitario.

Selección y Clasificación Manual

- Desgarrador de bolsas
- Cinta transportadora de 8 a 12 metros de largo.
- 6 a 10 puestos de clasificación.
- Contenedores para papel, cartón, plástico (PET, PEAD), metales, vidrio.

Acondicionamiento

- Prensa hidráulica (fardera) para compactación.
- Imán para separación de metales ferrosos.

Almacenamiento de Materiales Recuperados

- Depósitos techados para fardos.
- Bins o jaulas para plásticos.
- Contenedores para vidrio y metales.

Fracción Orgánica

- Fosa secundaria para fracción no recuperable.
- Enlace directo a planta de biogás o relleno sanitario.

3.4.2 Diagrama funcional

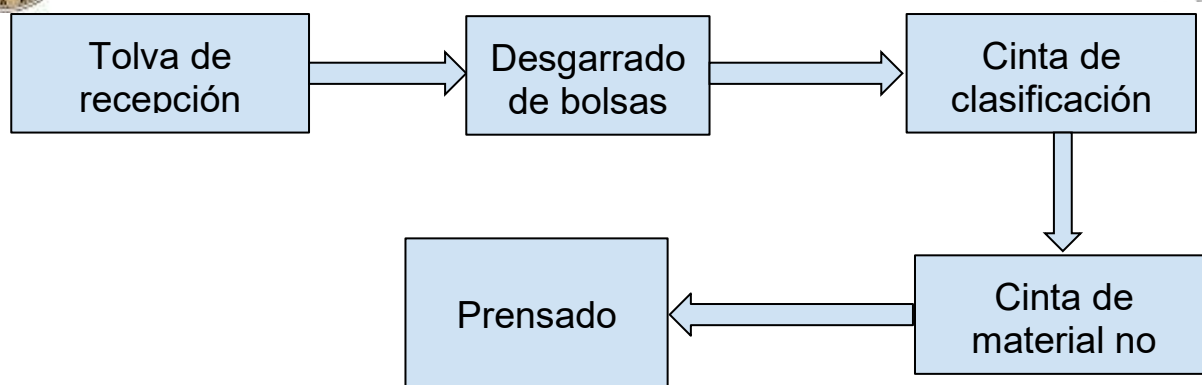


Figura 3.6: Diagrama de bloques de planta de separación

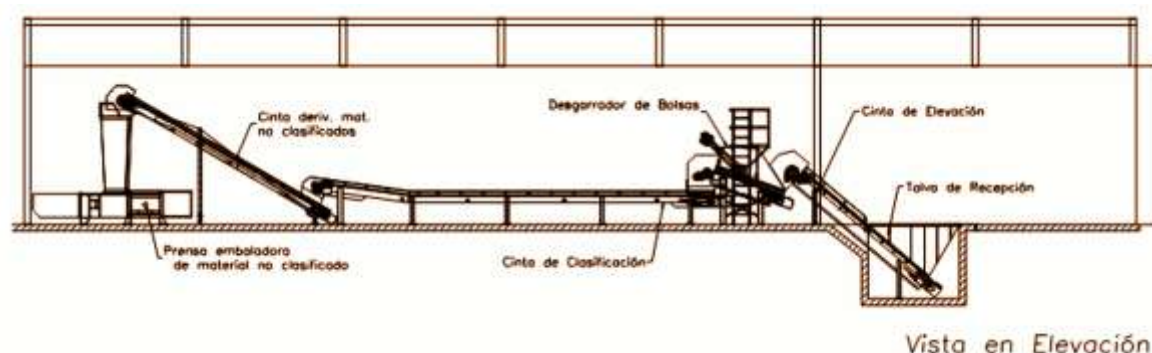


Figura 3.7: plano de planta de separación

Fuente: <https://desarrollosindustriales.com/equipos-y-plantas/rsu-plantas-de-clasificacion-y-tratamiento/>

3.4.3 Parámetros de diseño

Elemento	Valor aproximado
Superficie total	800 - 1.200 m ²
Capacidad de tratamiento	160 t/día RSU
Puestos de clasificación	6 a 10 operarios
Ancho de cinta	0,8 - 1 m
Personal total	10 - 15 personas/turno

Tabla 3.5: Diseño preliminar de la planta de clasificación

Los parámetros de diseño propuestos para la planta de separación manual, responden a criterios técnicos y funcionales basados en experiencias reales de plantas similares en contextos urbanos medianos. Esta planta no solo permitirá una mejora en la gestión integral de los residuos del distrito, sino que también contribuirá a la sostenibilidad del sistema de generación de biogás, al reducir impurezas, aumentar la proporción de materia orgánica disponible y fomentar una economía circular local. Además, su diseño modular y adaptable permitirá acompañar el crecimiento poblacional y del relleno sanitario proyectado a 20 años.



CAPITULO 4 LOCALIZACIÓN

4.1. LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

4.1.1 Introducción

El relleno Sanitario deberá ser ubicado en las cercanías de la ciudad de San Rafael. Esta decisión es tomada debido a que la localización afecta directamente los costos de transporte y acarreo de los residuos sólidos. El análisis de este capítulo se centrará en la evaluación de distintas alternativas, valorando tanto factores objetivos como subjetivos, con el fin de determinar la ubicación óptima para este proyecto.

Es crucial considerar que la localización del proyecto juega un papel vital en la maximización de utilidades y la sostenibilidad del proyecto. Una mala elección puede impactar significativamente en el rendimiento económico y operativo del proyecto. La selección de la ubicación debe tener en cuenta la proximidad a las fuentes de generación de residuos sólidos urbanos, y la logística necesaria para garantizar la viabilidad del proyecto tanto en el presente como en el futuro.

Además, se debe considerar la posibilidad de expansión, las regulaciones locales, y el impacto ambiental asociado con la operación de la planta.

4.1.2 Herramientas de selección para la macrolocalización

El primer análisis por realizar para elegir la localización más idónea para el proyecto, es determinar el arquetipo poblacional donde se va a ubicar. Para esto, es necesario realizar un estudio detallado de algunos factores, entre los que destacan:

- **Proximidad a los centros urbanos** para reducir los costos de transporte de los residuos.
- **Disponibilidad de infraestructura** con servicios como energía eléctrica, agua, y red de gas natural. Además, la infraestructura debe soportar la operación continua de máquinas de gran tamaño.
- **Cumplimiento de las normativas ambientales y de seguridad**, para lo cual es vital realizar un análisis de impacto ambiental para asegurar que el vertedero pueda operar sin contratiempos legales y con un bajo impacto ecológico.
- **La profundidad del agua subterránea** que es un factor clave para prevenir la contaminación de acuíferos, el sitio idealmente debe de tener una profundidad considerable.
- **Pendiente del terreno** una pendiente moderada facilita la gestión de los recursos y el captamiento de los lixiviados generados por el compactamiento de los residuos.
- **Permeabilidad del suelo:** Suelos de baja permeabilidad ayudan a prevenir la filtración de lixiviados.
- **Susceptibilidad a inundaciones** se busca evitar zonas propensas a inundaciones y así evitar la contaminación del agua
- **Incentivos económicos y fiscales** pueden ser decisivos en la elección de la ubicación.

- **Macrolocalización**

El principal objetivo que persigue la localización de un proyecto es minimizar los costos de logística y optimizar la celeridad en la respuesta del servicio. Este análisis es de suma



importancia y arroja consecuencias considerables a mediano y largo plazo, ya que una vez emplazado el vertedero, no es sencillo (y comúnmente es inviable) cambiar la localización.

Teóricamente, las alternativas de localización de un proyecto son infinitas. Pero en realidad, el ámbito de elección no es tan amplio, pues las restricciones propias del proyecto descartan muchas de ellas.

En la provincia de Mendoza, se generan aproximadamente 670,000 toneladas de residuos sólidos urbanos al año, lo que equivale a alrededor de 1,850 toneladas por día. En la ciudad de San Rafael se generan aproximadamente 105,239 Toneladas de basura por año con estos datos podemos considerar la localización del proyecto en la ciudad de San Rafael ya que es el lugar de interés de estudio y desarrollo del proyecto.



Figura 4.1: Ubicación del departamento de San Rafael

- Microlocalización

Para poder determinar la micro localización de la planta, se recurrió al método de ponderación por puntos haciendo una comparación entre dos lugares elegidos en la ciudad de San Rafael. Este método consiste en definir los principales factores determinantes de una localización, para asignarles valores ponderados de peso relativo, de acuerdo con la importancia que se le atribuye.

Al comparar las dos localizaciones, se procede a asignar una calificación a cada factor en una localización de acuerdo con una escala predeterminada como, en este caso, de 0 a 10.

La suma de las calificaciones ponderadas permitirá seleccionar la localización que acumule el mayor puntaje.

Cabe destacar que este método consiste en una técnica subjetiva que utiliza solamente factores cualitativos no cuantificados.

Los factores a tener en cuenta la ponderación son:

- Tipo de suelo y geología: Impermeabilidad, estabilidad, presencia de fallas
- Nivel freático: Se busca tener una alta profundidad en el agua subterránea para evitar contaminaciones.
- Proximidad a cuerpos de agua como ríos, canales, humedales



- Dirección y velocidad del viento: Para evitar afectación por olores/polvo a zonas pobladas
- Riesgo de inundación: Evitar zonas con riesgo de inundación que podría dejar sin uso al vertedero y generar contaminación.
- Distancia a centros poblados para evitar conflictos con vecinos
- Impacto visual y paisajístico: especialmente en zonas turísticas como San Rafael.
- Aceptación social / percepción comunitaria Reacciones posibles de la población local
- Accesibilidad vial y distancia de acarreo para camiones compactadores y maquinaria
- Disponibilidad de servicios: electricidad, agua para operaciones básicas
- Costos del terreno y de construcción y operación.

En cuanto a las localizaciones se eligieron para comparar, por un lado, una ubicación en las cercanías del actual basural “La Tombina” y por otro lado otra ubicación en la zona del parque industrial.



Figura 4.2: Localización N°1 “La Tombina”



Figura 4.3: Localización N°2 “Parque industrial”



Nombre del factor	Peso relativo porcentual (%)	Cercanías al basural "La Tombina"		Parque Industrial San Rafael	
		Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
Impermeabilidad de suelo	10%	9	9	5	5
Nivel Freático	10%	10	10	6	6
Proximidad a cuerpos de agua	5%	9	4,5	7	3,5
Dirección y velocidad del viento	3%	7	2,1	6	1,8
Riesgo de inundación	5%	8	4	4	2
Distancia a zonas residenciales	7%	8	5,6	3	2,1
Impacto visual y paisajístico	10%	9	9	2	2
Aceptación social	5%	6	3	1	0,5
Distancia de acarreo	5%	7	3,5	9	4,5
Accesibilidad vial	10%	8	8	9	9
Servicios industriales disponibles	10%	7	7	10	10
Costos del terreno	10%	8	8	4	4
Costos de construcción y operación	10%	9	9	9	9
Total	100%	-	82,7	-	59,4

Tabla 4.1: Matriz de ponderación para la micro localización

Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Conclusión

Con los factores ya nombrados e identificados se realizó la matriz de ponderación para la micro localización del proyecto y se obtuvo que la mejor localización para el mismo sería en un emplazamiento a las cercanías de "La Tombina" por la cantidad de terreno disponible, estudios hidrológicos y geológicos ya realizados y no se verá afectada la distancia de acarreo por ser similar a las rutas ya existentes trazadas por el municipio de San Rafael.

Con el área ya calculada de 201579 m^2 y la localización ya ponderada y ubicada procedemos a diseñar un área estimada en la locación. Cabe mencionar que a esta superficie proyectada se le debe adicionar un área en la que se ubicará la planta de purificación y otros edificios administrativos e infraestructura.





CAPÍTULO 5

INGENIERÍA BÁSICA

5.1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se hará una descripción detallada del vertedero controlado, donde distintos aspectos serán tenidos en cuenta como la naturaleza del biogás, los factores que intervienen en su obtención a partir de métodos de aproximación y los métodos de purificación existentes en el mercado.

También serán tenidos en cuenta los procesos secundarios que ocurren como la generación de lixiviados y serán evaluadas las distintas tecnologías para la generación de energía eléctrica.

5.1.1. 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.
- **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.
- **Relación C/N:** La relación C/N debe estar dentro de unos límites en que las proporciones de carbono y de nitrógeno sean las adecuadas para la bioquímica del proceso de compostaje. Si la relación C/N es muy elevada habrá un exceso de elementos energéticos (C) y un déficit de elementos plásticos para el crecimiento (N); el proceso será lento por el déficit de N. Por otra parte, si un "compost" con relación elevada de C/N se añade al suelo, se producirá una asimilación del nitrógeno del suelo en favor del "compost" y en total detrimento de la cosecha, como sucede cuando se entierran los rastrojos sin adición de N. Por otra parte, si la relación C/N es baja, se utilizará todo el carbono y tendremos pérdida de N en forma de amoníaco. Una cifra óptima para la relación C/N suele estar entre 25 y 30. Por encima de 30 la duración del compostaje es mayor. Si la relación es baja, se deben añadir productos celulósicos. Cuando la relación sea alta una práctica muy recomendable es la adición de fangos deshidratados procedentes de plantas depuradoras de aguas residuales.

5.2. PLANTA DE SEPARACIÓN

El proceso consiste en disponer varias personas a lo largo de una cinta transportadora e instruir a ellas a seleccionar varios tipos de residuos. Los subproductos resultantes de este proceso son los materiales potencialmente reciclables y aprovechables, que pueden ser valorizados y comercializados para posteriores procesos productivos e industriales, estos son principalmente productos reciclables como papel, cartón, plástico, vidrio, entre otros.

El reciclaje de los materiales encontrados en los RSU implica:

1. La recuperación de materiales en origen o en planta.
2. El procesamiento intermedio, como puede ser la selección y la compactación.
3. El transporte.
4. El procesamiento final, para proporcionar materia prima para los fabricantes o bien, un producto final.

La principal ventaja del reciclaje es un ahorro del espacio del vertedero; sin embargo, la recogida y el transporte de materiales requieren el uso de cantidades importantes de energía y de mano de obra. Los requisitos para el éxito de un programa son: la existencia de una fuerte demanda para los materiales recuperados y un valor de mercado para los materiales que sea suficiente como para cubrir los costos de energía y transporte.

Las ventajas se derivan del aprovechamiento de materias primas, economía energética, uso racional de los recursos naturales y devolución a la tierra de su riqueza orgánica, así como la reducción del volumen depositado en el vertedero.

Los inconvenientes pueden ser: las fuertes inversiones iniciales; el sometimiento a paros y averías, que impone un sistema alternativo; la producción de rechazos, que exige un vertedero complementario; la gestión especializada y cuidadosa, etc.

El proyecto de reciclaje debe tener en cuenta los mercados para los materiales recuperados, la infraestructura de recogida y el costo global. Los mercados para los materiales recuperados existen solamente cuando los fabricantes o procesadores necesitan estos materiales o pueden usarlos como sustitutos rentables de materias primas; por tanto, el mercado depende



de la calidad de los materiales, de la capacidad global de la industria y del costo de las materias primas en competencia. En la mayoría de los casos, los materiales recuperados son inferiores en calidad a los materiales vírgenes, por lo que el precio en el mercado tiene que ser atractivo para los compradores. También se crean mercados con una legislación que desarrolle una demanda a largo plazo y con los avances tecnológicos.

Los materiales más factibles a recuperar son:

- Latas de aluminio
- Papel y cartón
- Plásticos como PET Y PEAD
- Vidrio
- Materiales férreos.
- Material orgánico

5.3. VERTEDERO CONTROLADO

El relleno sanitario es una instalación para la disposición final de los residuos sólidos. La unidad básica de este es una celda, que consiste en la zona de descarga diaria de basura. Un relleno está conformado por una o más celdas. Esta instalación emplea técnicas para confinar la basura en un área lo más estrecha posible, cubriéndose con capas de tierra diariamente y compactando para reducir su volumen. Además, prevé los problemas que puedan causar los líquidos y gases producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica. Un relleno sanitario, en la práctica, es un reactor bioquímico en el que sus principales entradas son residuos y agua, mientras que sus principales salidas son líquidos percolados (lixiviados) y biogás.

Un vertedero controlado puede ser considerado como un biorreactor, debido a la descomposición que sufre la materia orgánica contenida en dichos residuos. La cantidad de biogás que se produce en los rellenos sanitarios depende de la composición de los desechos contenidos en éstos y es directamente proporcional a la cantidad de materia orgánica biodegradable disponible.

En la siguiente imagen se puede ver el esquema típico de un vertedero controlado y con captación de gases y de lixiviado.

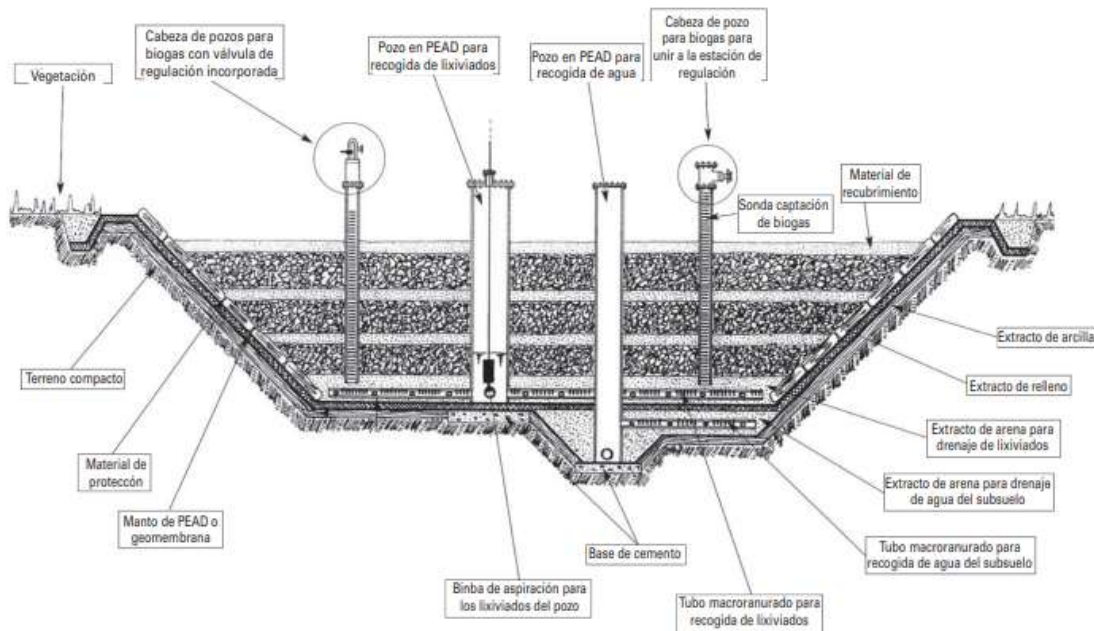


Figura 5.1: Esquema de un vertedero controlado
Fuente: Futura System / 2017

5.3.1. Tipos de vertederos controlados

- Método de trinchera o zanja

Este método se utiliza en regiones planas y consiste en excavar periódicamente zanjas de dos o tres metros de profundidad con una retroexcavadora o un tractor de orugas. Hay experiencias de excavación de trincheras de hasta de 7 metros de profundidad. Los RSM se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con la tierra excavada.

Se debe tener especial cuidado en periodos de lluvias dado que las aguas pueden inundar las zanjas. De ahí que se deba construir canales perimétricos para captarlas y desviarlas e incluso proveer a las zanjas de drenajes internos. En casos extremos, se puede construir un techo sobre ellas o bien bombear el agua acumulada. Sus taludes o paredes deben estar cortados de acuerdo con el ángulo de reposo del suelo excavado.

La excavación de zanjas exige condiciones favorables tanto en lo que respecta a la profundidad del nivel freático como al tipo de suelo. Los terrenos con nivel freático alto o muy próximo a la superficie no son apropiados por el riesgo de contaminar el acuífero. Los terrenos rocosos tampoco lo son debido a las dificultades de excavación.

En la siguiente imagen podemos observar un vertedero controlado en método de trincheras.

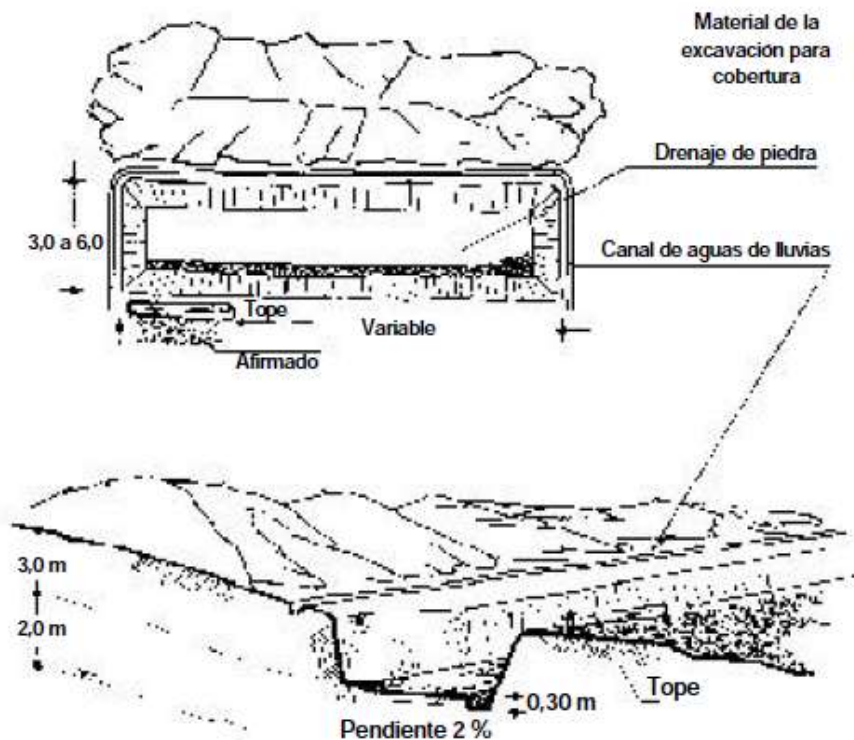


Figura 5.2: Metodo de trincheras
Fuente: Jorge Jaramillo / 2002

- Método de área

En áreas relativamente planas, donde no sea factible excavar fosas o trincheras para enterrar la basura, esta puede depositarse directamente sobre el suelo original, el que debe elevarse algunos metros, previa impermeabilización del terreno.

En estos casos, el material de cobertura deberá ser transportado desde otros sitios o, de ser posible, extraído de la capa superficial. Las fosas se construyen con una pendiente suave en el talud para evitar deslizamientos y lograr una mayor estabilidad a medida que se eleva el relleno

Sirve también para rellenar depresiones naturales o canteras abandonadas de algunos metros de profundidad. El material de cobertura se excava de las laderas del terreno o, en su defecto, de un lugar cercano para evitar los costos de acarreo. La operación de descarga y construcción de las celdas debe iniciarse desde el fondo hacia arriba

El relleno se construye apoyando las celdas en la pendiente natural del terreno, es decir, la basura se descarga en la base del talud, se extiende y apisona contra él y se recubre diariamente con una capa de tierra. Se continúa la operación avanzando sobre el terreno, conservando una pendiente suave en el talud, es decir, la relación vertical/horizontal de 1:3 a 1:2, respectivamente.

En la siguiente imagen podemos observar un vertedero controlado en método de área

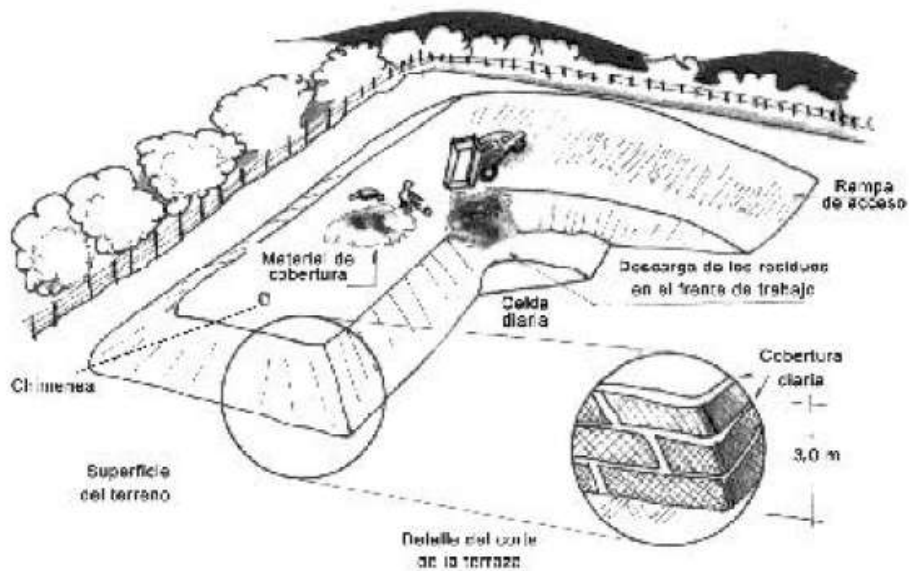


Figura 5.3: Método de área
Fuente: Jorge Jaramillo / 2002

- Método Mixto o combinado

Este método inicia como un método de Trinchera o Zanja, es decir, se realiza la excavación y acondicionamiento del terreno y luego se empieza a operar. Una vez llegada a la altura culmine del pozo, se comienza a operar en sentido positivo creando una elevación en el terreno con una suave pendiente. Esto permite un mayor aprovechamiento del terreno y el material de cobertura, así como para obtener mejores resultados. Además de una vida útil mayor.

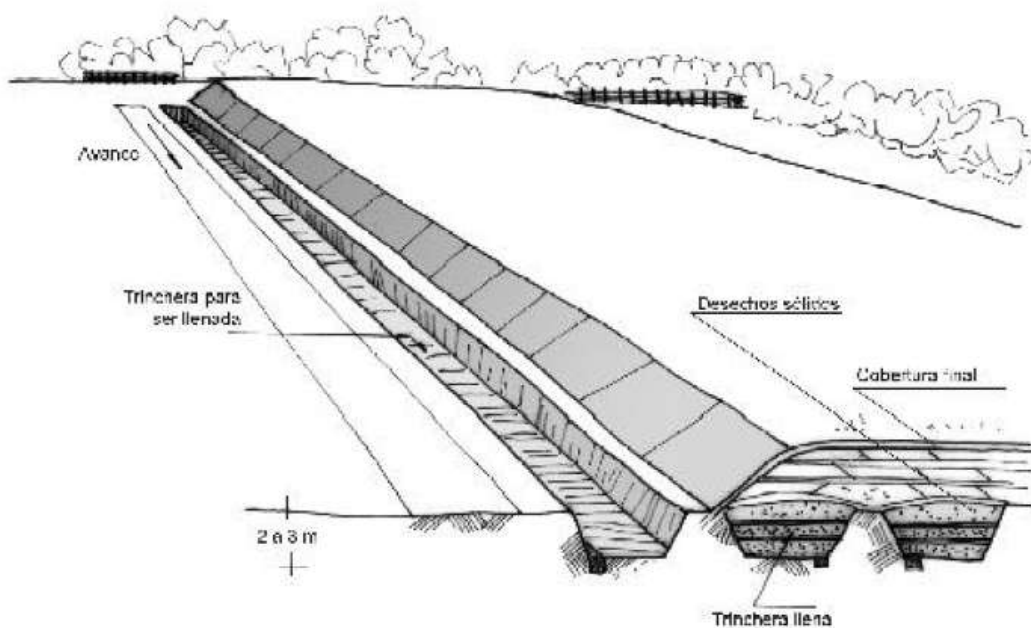


Figura 5.4: Método mixto
Fuente: Jorge Jaramillo / 2002



5.3.2. Criterios de admisión en el vertedero

Serán admitidos en el Vertedero controlado los residuos sólidos urbanos (RSU), entendiéndose a estos como todo residuo generado por actividades en los núcleos urbanos y rurales, incluyendo aquellos cuyo origen sea doméstico, comercial, institucionales, industriales compatibles con los domésticos.

Residuos que no deberán ser admitidos

- Residuos peligrosos: Regulados por la Ley Nacional 24.051.
- Residuos patogénicos tipos B y C de establecimientos médicos (comprendidos en la Ley de la Provincia de Mendoza N°7168) o veterinarios que sean infecciosos.

5.4 GENERACIÓN DE LÍQUIDOS LIXIVIADOS

El lixiviado es un líquido de color oscuro y olor fuerte con alta carga orgánica e inorgánica. El lixiviado se genera como consecuencia de la humedad de los residuos y la infiltración y percolación de parte de las precipitaciones pluviales. Un correcto diseño del relleno debe prever una cobertura superior que incluya capas impermeables y capas drenantes para minimizar el porcentaje de lluvia infiltrado, dicha cobertura debe presentar las pendientes adecuadas a los efectos de facilitar la escorrentía. A su vez, deben preverse un sistema de separación de las aguas pluviales superficiales del lixiviado que se genera dentro del relleno y una canalización adecuada para este último.

La calidad del lixiviado depende de factores tales como la composición de los residuos y las condiciones en que opera el relleno: grado de compactación, grado de humedad, etc. A su vez, y como producto de la actividad biológica que se desarrolla dentro del relleno, varía en el tiempo, tendiendo con el transcurso de los años y la estabilización de los residuos a concentraciones cada vez menores de contaminantes. El producto de la concentración de materia orgánica por el caudal nos dará una serie de datos en el tiempo, de la carga del efluente que permitirán el dimensionamiento de la Planta de Tratamiento de Lixiviados.

Los lixiviados procedentes de un relleno de RSU suelen registrar niveles muy altos de nitrógeno (como amoníaco), cloruro y potasio, así como sustancias orgánicas disueltas con demanda biológica y química de oxígeno. Minimizar el frente de trabajo expuesto a diario y utilizar drenajes perimetrales y compactación de la celda rellena, pendientes y materiales de cobertura diaria es importante para reducir la infiltración de las lluvias en los residuos depositados.

El Vertedero Controlado se comporta como un reactor biológico donde los microorganismos presentes en la basura se encargan de hidrolizar el material particulado, en esta hidrólisis juega un papel importante la humedad propia de la basura, así como el agua que se infiltra. El material que pasó a la fase líquida sigue siendo sustrato para los microorganismos presentes y comienza una etapa de degradación de la materia orgánica en solución. Debido al rápido agotamiento del oxígeno presente, la mayor parte de los mecanismos de degradación son de tipo anaerobio y tienen como resultado último la producción de biogás. Debido a esta acción microbiológica el relleno se va estabilizando progresivamente, cambiando asimismo la concentración de contaminantes (medida como DQO, Demanda Química de Oxígeno) y disminuyendo la fracción biodegradable.



Hay que tratar los lixiviados en las propias instalaciones y/o descargarlos en una planta de tratamiento específica. Los posibles métodos de tratamiento incluyen lagunas aireadas, lodos activados, digestión anaerobia, humedales artificiales, recirculación, filtración por membrana, ultra y nano filtración, lechos de turba, filtros de arena y extracción del metano. El potencial de formación del lixiviado puede valorarse mediante la preparación de un balance hidrológico del relleno sanitario. El balance implica la suma de todas las posibles entradas y salidas de agua al relleno.

La cantidad de agua consumida en las reacciones químicas durante el proceso de transformación de la materia orgánica contenida en los residuos no se tiene en cuenta en este balance simplificado. Según (Ec. 1)

$$(Ec.1) S_t = S_{t-1} + P_t - Q_t - ETR_t$$

- S_t : Almacenamiento de agua en el suelo en el período t,
- S_{t-1} : Almacenamiento de agua en el suelo en el período anterior t-1,
- P_t : Precipitación en el período t
- Q_t : Esguerrimiento superficial o directo en el período t,
- ETR_t : Evapotranspiración en el período t,

Inicialmente, algo de lixiviado se generará intermitentemente debido a las canalizaciones del agua a través de los residuos, pero luego de un período de algunos años, la producción de lixiviado será más consistente. A pesar que la cantidad de lixiviado puede predecirse a través de la ecuación (1) de balance de agua, su tiempo para alcanzar la base del relleno es menos predecible y se retardará de los eventos de precipitación por un período dependiente de la capacidad de humedad de los residuos. También la permeabilidad de las capas de cobertura intermedia controlará la migración del percolado.

5.4.1. Captación de lixiviado

En cada sector y sobre la diagonal de menor cota, del módulo del relleno sanitario se construyen zanjas de pequeña magnitud, que permitan la colocación de cañerías ranuradas de material plástico, cubiertas de piedra y geotextil no tejido, de modo que puedan captar los líquidos que escurren por el fondo del módulo.

En los sectores internos del módulo, los drenes de fondo se conectarán con los de los sectores perimetrales, a fin de dar continuidad al flujo de lixiviados en el fondo del relleno sanitario. La desembocadura de las cañerías estará conformada por un pozo de bombeo, que se materializa con piedra partida y que tiene una porosidad suficiente para almacenar un volumen de líquido adecuado para su posterior bombeo. Desde dichos sumideros será bombeado el líquido mediante bombas sumergibles para ser reinyectado en forma superficial nuevamente en el seno de la masa de residuos, con la intención de mantener y homogeneizar la humedad total del módulo, acelerar la descomposición de los componentes biodegradables y, consecuentemente, estabilizar más rápidamente al módulo, minimizando los asentamientos diferenciales. Dicha recirculación se efectuará solo hasta alcanzar la capacidad de campo de los residuos.

En rellenos de menor magnitud se construye el módulo del relleno sanitario con un fondo con desniveles en cada sector y cañerías HDPE perforadas, recubiertas de piedras y geotextil para mejorar las condiciones de flujo y minimizar las posibilidades de colmatación por



asentamiento y acumulación de material fino, de manera que sea más eficiente la captación y el transporte de los líquidos lixiviados hacia los puntos de extracción.

El sistema de captación finaliza en sumideros, ubicados en los puntos de menor cota de cada sector, contruidos con piedra partida en su parte inferior y cañerías de hormigón que superan la capa de cobertura del módulo en 1.20 m, aproximadamente y tendrá su superficie libre, a fin de poder colocar fácilmente las mangueras del camión atmosférico o de la bomba sumergible, dependiendo del sistema operativo que se desee utilizar.

Las pendientes de las cañerías, tanto del sistema de captación como del sistema de conducción tiene la pendiente de fondo del relleno sanitario. La cañería perforada estará rodeada de piedra partida, que a su vez estará recubierta con un geotextil no tejido, a fin de evitar el ingreso de material fino y mejorar las condiciones hidráulicas del flujo. El paquete filtrante que recubre la cañería tendrá permeabilidad mayor al entorno (los residuos sólidos dispuestos) y contará con una granulometría adecuadamente graduada que impida el flujo del material fino que podría impermeabilizar el dren, para lo cual se colocará piedra partida.



Figura 5.5: Tuberías de recolección de lixiviados

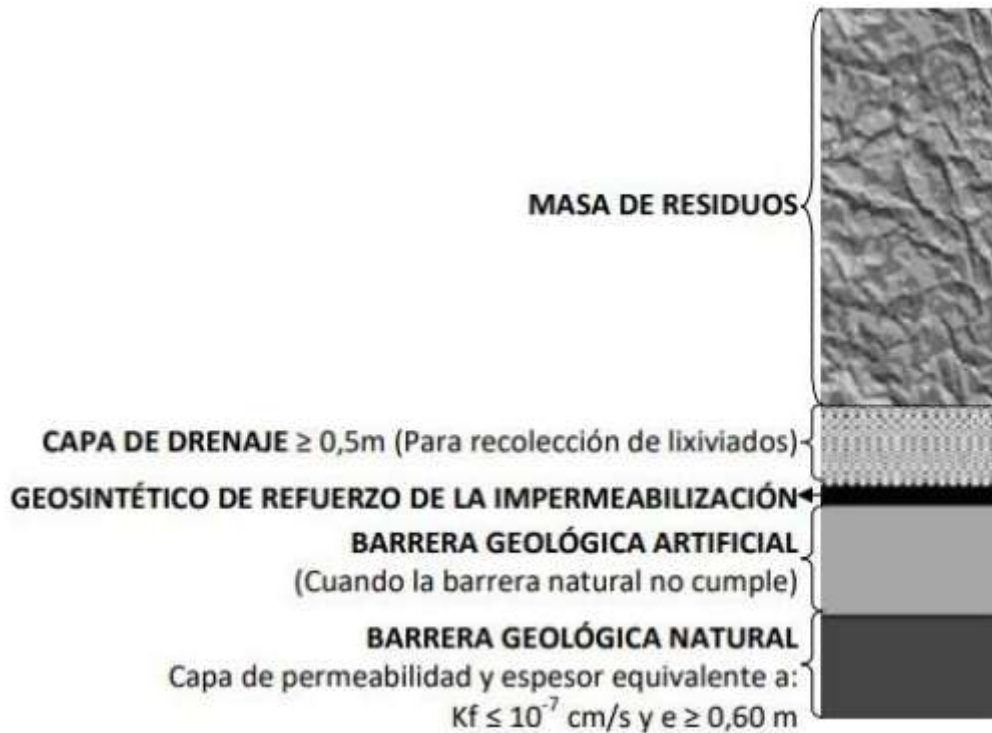


Figura 5.6: Perfil típico de un relleno sanitario
Fuente: Agua Sigma



Figura 5.7: Colocación de una tubería para recolección de lixiviados

5.4.2 Red de captación

Dada la poca extensión superficial de los rellenos sanitarios manuales, en primer lugar, se recomienda minimizar el ingreso de las aguas de lluvia no solo controlando las aguas de escorrentía por medio de canales interceptores a nivel perimetral. También se puede impedir que las lluvias caigan directamente sobre los terraplenes o zanjas con residuos si se construye un techo que funcione a manera de paraguas. De esta manera, la cantidad de lixiviado tiende a ser nula, con lo que se evita uno de los mayores problemas de este tipo de obras, sobre todo en las zonas lluviosas.

En segundo lugar, es conveniente construir un sistema de almacenamiento del lixiviado en forma de espina de pescado al interior del relleno, en concreto en la base que servirá de soporte de cada plataforma. El sistema debe estar conectado entre sí y debe tener un canal



central de mayor diámetro para transportar el lixiviado recolectado proveniente de todas las afluentes.

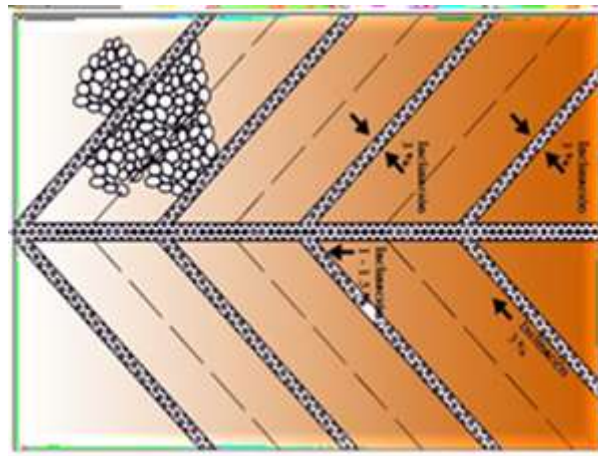


Figura 5.8: Diseño espina de pescado
Fuente: Efecto de las lluvias en desechos sólidos

Este sistema de drenaje tratará que la absorción o infiltración de los lixiviados sea nula en el área rellena, puesto que el lixiviado seguirá produciéndose por muchos años posteriores al cierre del relleno, esta capa de drenaje deberá ser bien construida.

Normalmente se construye la capa de drenaje de grava. Las piedras utilizadas deben ser grandes (con dimensiones más o menos homogéneas) recomendándose piedra de 6" o 8" y no contener partículas finas, con eso se asegura una buena permeabilidad hidráulica. El espesor hidráulicamente eficiente debe ser al menos 30 cm; se recomienda construir una capa con espesor de 50 cm con el fin de proteger la permeabilidad hidráulica durante muchos años.

Se extiende una capa de geotextil o de materiales reemplazantes sobre la capa de drenaje, al fin de evitar que se congestione la capa de drenaje con partículas sólidas escurridas en las aguas lixiviadas.



Figura 5.9: Típico perfil de diseño de transporte de lixiviados
Fuente: Efecto de las lluvias en relleno sólidos

5.4.3. Tratamiento de agua de lixiviado



- **Evaporación en Piletas y recirculación al relleno**

La pileta ecualizadora o balsa de lixiviados, tiene la función de recibir el flujo de lixiviado generado por el Relleno Sanitario y almacenarlo de manera temporal permitiendo homogeneizar las características del mismo. En caso de lluvias, el estanque debe estar diseñado para retener el volumen de precipitaciones en promedio de San Rafael.

En el caso de San Rafael las precipitaciones son escasas y el contenido de humedad de la tierra también lo es, por lo que se buscará almacenarlo en una laguna artificial y posteriormente recircular el lixiviado al relleno para tener la humedad suficiente para que las reacciones dentro del relleno sigan ocurriendo. Esto incrementa la degradación y por ende la generación de gas de relleno.

Por eso el circuito típico que harán los lixiviados en el proyecto será de la siguiente manera.

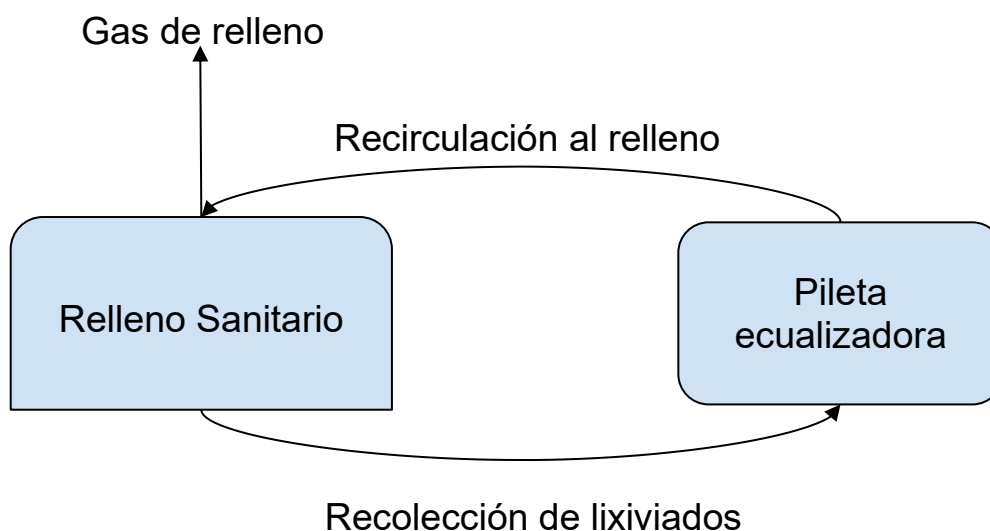


Figura 5.10: Proceso de recirculación de lixiviados

- **Monitoreo de la calidad de agua**

Es importante que antes, durante y después de construir un relleno sanitario se tomen una serie de medidas relacionadas con la prevención de riesgos potenciales para la calidad del ambiente. Un relleno sanitario deberá cumplir algunas normas ambientales y de seguridad, sobre todo en lo que se refiere a las aguas superficiales y subterráneas. En este caso, convendría contar con pozos de monitoreo para prevenir cualquier riesgo de inundación.

No podemos olvidar que gran parte de los RS son obras de gran magnitud y que se generan una gran cantidad de reacciones químico-biológicas, aparte de ser un gran punto de generación de contaminación. De ahí que las exigencias y controles ambientales también deben estar acordes con la magnitud del problema y los recursos disponibles. Además, si se cuenta con un suelo limo-arcilloso, con un coeficiente de permeabilidad, $k < 10^{-7}$ cm/seg, y si el espesor del suelo por encima del nivel freático es mayor de un metro, las probabilidades de contaminación de las aguas subterráneas disminuyen considerablemente.

Los pozos de monitoreo deberán estar situados como mínimo a unos 10, 20 y 50 m del área del relleno y del drenaje exterior del líquido percolado; con unos 3 o 4 pozos será suficiente.



Estos pozos deben situarse aguas arriba y aguas abajo del vertedero con el fin de obtener diferentes datos del estado del agua y de las posibles filtraciones que puedan ocurrir.

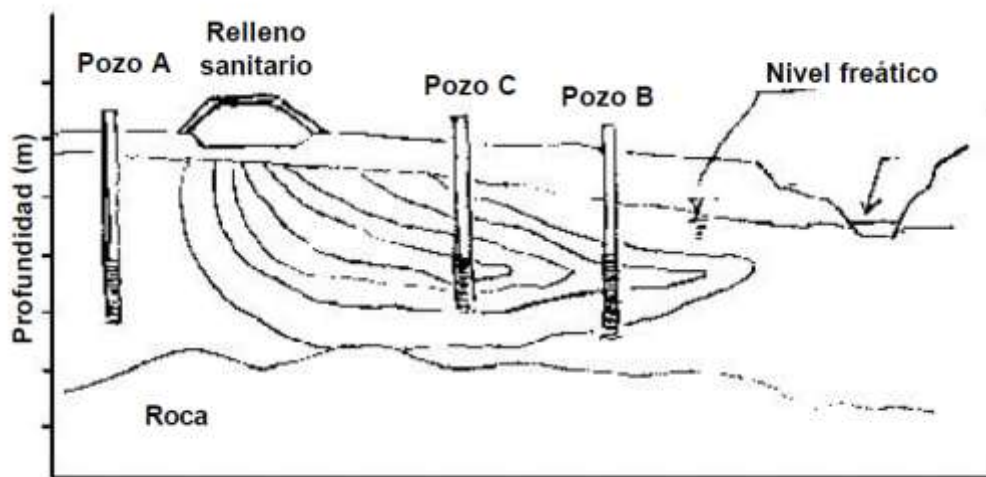


Figura 5.11: Distribución de pozos de control de lixiviados.

Fuente: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente- 2002

5.4.4 Membrana impermeabilizante

Las barreras geológicas y sintéticas se encargan de impedir que los fluidos contaminantes puedan filtrarse en la superficie y contaminar, aunque la primera no suele ser suficiente para contener los lixiviados, debe ser reforzada con materiales geo sintéticos. Esta se ocupa de:

- Evitar la infiltración de lixiviados al subsuelo.
- Proteger el acuífero y las napas freáticas de contaminación.
- Aumentar la eficiencia del sistema de captación de lixiviados.

Funciona como parte del sistema de impermeabilización compuesto, que incluye generalmente:

- Una capa de suelo compactado (arcilloso).
- Una o más capas de geo membrana.
- Una capa geotextil de protección o drenaje.

Antes de la puesta en marcha de la geo membrana, deben tenerse en cuenta las siguientes premisas:

- El acondicionamiento de la zona de obra debe quedar totalmente terminado, es decir, la excavación alrededor del anclaje no debe presentar agua estancada
- La superficie del suelo que queda en contacto con la geo membrana debe cumplir una serie de requisitos indispensables.

La geo membrana es el mejor material que funciona a la hora de impermeabilizar una superficie, pero al mismo tiempo se debe elegir geomembranas de alta densidad (PEAD) en la instalación de rellenos sanitarios. Dado que la presentación de las láminas se da en forma de rollo, solamente personal calificado deberá manipular los rollos con el objetivo de extender adecuadamente la geo membrana por todo el relleno sanitario. De hecho, el espesor de este



material depende de factores como la altura del relleno, la maquinaria de compactación o el tamaño y forma de la grava drenante.

- **Instalación de geomembranas**

La colocación de la geo membrana se realizará de forma continuada y se soldarán una vez instaladas teniendo en cuenta de que la temperatura sea la misma y evitando tensiones. Las operaciones de cierres, detalles y anclajes deberán realizarse en las horas más frías del día. Se recomienda que para efectuar la soldadura de la geo membrana, se utilice el proceso de cuña caliente debido a que es la que genera una menor perturbación en su estructura molecular.

El proceso de instalación es el siguiente:

1. Compactación del suelo.
2. Nivelación sin piedras ni objetos punzantes.
3. Colocación de una capa de suelo arcilloso compactado (mínimo 30 cm). A veces se incluye una capa geotextil para protección o filtración.
4. Se coloca en rollos y se despliega cuidadosamente sobre el terreno, superponiendo las uniones entre láminas con un promedio de 10 cm unas de otras.
5. Las láminas de geo membrana se unen mediante técnicas de soldadura térmica, que garantizan una unión continua, impermeable y resistente. El método más común es la soldadura por doble cuña caliente, que utiliza calor y presión para fundir los bordes de las láminas y crear una junta homogénea. También se emplea la soldadura por extrusión, especialmente en detalles o reparaciones.
6. Se verifica con pruebas de vacío, aire o líquidos la hermeticidad
7. Sobre la primera geo membrana una serie de elementos como geotextiles protectores, el sistema de drenaje de lixiviados (grava + tuberías perforadas) y Cobertura con capa de protección o material granular.

Estas geomembranas deben estar seleccionadas cuidadosamente ya que deben resistir el peso de los residuos, el sistema de recolección de lixiviados y la presión que ejercen sobre ella los distintos elementos.

Las geomembranas más usadas en rellenos sanitarios son las de HDPE (Polietileno de alta densidad) ya que son muy resistentes al paso del tiempo y se utilizan en labores de impermeabilización como en la construcción de balsas o embalses. También existen otros productos como las láminas de EDPM (Etileno Propileno Dieno Monómero o caucho sintético) o de PVC (poli cloruro de vinilo) que servirán para otras aplicaciones, principalmente en la impermeabilización de cubiertas, protección de terrenos en la agricultura o protección e impermeabilización de fachadas.

Las láminas impermeables presentan entre sus cualidades una gran resistencia al ataque de agentes químicos y rayos U.V., actúan como barrera contra el paso de líquidos y gases, resistencia al impacto, a ácidos y a temperaturas extremas.

La más recomendada es una geo membrana de HDPE de 1,5 mm o 2 mm de espesor, por su gran resistencia al paso del tiempo y su resistencia mecánica y química en ambientes agresivos como los de un relleno.



- **Anclajes**

Existe la posibilidad de encontrarse con distintos tipos de anclaje en los rellenos sanitarios. Según el tipo de anclaje:

Anclaje en zanja: La geo membrana se ancla en la parte superior del talud en una zanja de dimensiones mínimas. La zanja se debe separar del borde del talud 1 metro como mínimo para poder facilitar la unión con fases futuras. En el momento en el que la geo membrana queda instalada en la ladera, se rellena la zanja con el propio producto de la excavación y se compacta.

Anclaje de bernas: en el supuesto de que hayan tenido que ser instaladas bernas en el talud dada su empinamiento, se utilizarán sobrepesos para el anclaje de los sistemas de impermeabilización, los cuales pueden ser prefabricados de hormigón prefabricados con un geotextil para no dañar la superficie de la geo membrana

Anclaje a chimeneas, arquetas, tuberías y puntos singulares: Para poder obtener una total estanqueidad en el vaso, siempre que exista un elemento singular se procederá de la siguiente forma:

Cuando se trate de un elemento de hormigón se embutirá sobre este cuando esté fresco un perfil de polietileno de alta densidad. Fraguado el hormigón se procederá a soldar la geo membrana al perfil mediante extrusión. Cuando el elemento singular fuera una chimenea o una tubería se podrá fabricar un elemento tipo bota con la geo membrana el cual se sujetará a la tubería o chimenea mediante una abrazadera. También podemos utilizar el sistema de uniones de brida y contra brida.

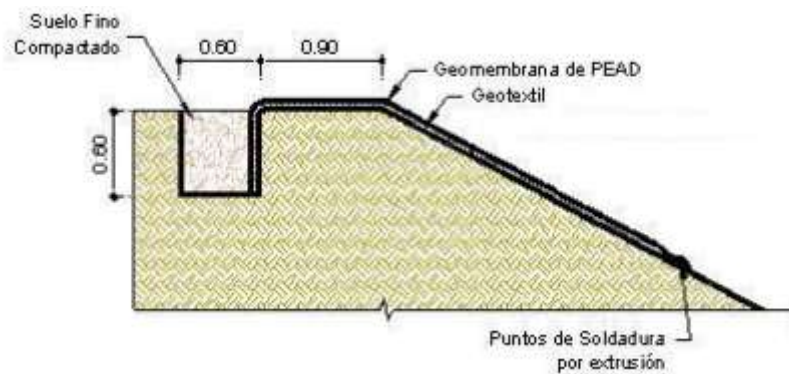


Figura 5.12: Anclaje de membrana PEAD

Fuente: Constructora SAI

5.5. GAS DE RELLENO

La degradación de los residuos que son dispuestos en rellenos sanitarios genera una mezcla de gases conocida como gas de relleno (LFG, del inglés Landfill Gas). La producción de esos gases es el resultado de un proceso de degradación anaeróbica de la fracción orgánica de los residuos en el que intervienen reacciones bioquímicas complejas que son realizadas por diversas especies de bacterias. La composición del gas de relleno se ve afectada en el tiempo por varios factores físico-químicos.



Luego de una degradación aeróbica inicial que ocurre durante un corto período de tiempo (menor a un mes, por lo general) hasta que el oxígeno que se encuentra contenido en los residuos se agota por completo, las condiciones ambientales dentro del relleno se vuelven favorables para comenzar el proceso anaeróbico. Teóricamente, el proceso de generación del gas de relleno se produce a través de cuatro fases distintas. Cada una de las cuales explica la degradación de un tipo de compuesto diferente, la actividad de un grupo específico de bacterias y la formación de diversos compuestos intermedios (Shah et al., 2014). Estas fases pueden coexistir simultáneamente dentro del relleno debido a que los desechos se disponen en diferentes momentos y están compuestos por sustratos orgánicos con diferentes tasas de biodegradabilidad. Las mismas se clasifican de la siguiente manera:

Fase aeróbica: Durante esta corta etapa inicial, los microbios aerobios usan el oxígeno contenido en los desechos para producir dióxido de carbono y calor. otra fuente podría ser el lixiviado reciclado o generado en el propio relleno. Los gases principalmente sintetizados son el dióxido de carbono (CO_2) y el vapor de agua. Esta etapa puede abarcar entre algunas semanas o varios meses.

Hidrólisis: Durante la etapa de hidrólisis, la mayoría de los compuestos orgánicos se descomponen en monómeros y dímeros solubles, que son monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos, a través de enzimas extracelulares producidas por una cepa apropiada de bacterias hidrolíticas.

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 hidrógeno.

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.

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 solubilizan 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.

Metanogénesis: En esta fase se produce la transformación de los productos intermedios formados en la etapa previa por las bacterias metanogénicas en metano y dióxido de carbono. Durante esta fase que puede ser de entre 2 a 5 años, dándose la mayor generación de CH_4 y CO_2 en los primeros años, el gas se produce a una velocidad y composición estables, hasta que la mayoría de los nutrientes y sustratos orgánicos se han eliminado de los desechos y la tasa de producción de gas disminuye.



Normalmente, durante la fase metanogénica el gas de relleno se compone principalmente de metano (45-60% v / v), dióxido de carbono (40-60% v / v) junto con otras trazas de gases tales como sulfuro de hidrógeno, hidrógeno, monóxido de carbono, nitrógeno, amoníaco, vapor de agua (<1% v / v). Sin embargo, la tasa y el volumen del gas producido, así como su composición (% de metano) y la duración de cada fase anaeróbica dependen de varios factores que varían de acuerdo a las características intrínsecas de los residuos depositados (contenido orgánico, solubilidad y degradabilidad de la materia orgánica, tamaño de la partícula), a las condiciones ambientales (pH, temperatura, contenido de agua, disponibilidad de nutrientes, compuestos tóxicos) y a la tecnología y gestión operativa del relleno.

Debido a la formación de CH₄ y CO₂ a partir de los ácidos y del gas de hidrógeno, el pH del lixiviado subirá a valores más neutros, entre 6,8 y 8. A su vez, las concentraciones de DBO₅ 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. (López, 2018) (SPA-Módulo 3)

Fase de maduración: Su comienzo se da luego de que el material inorgánico biodegradable se convierte en CH₄ y CO₂. 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.

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.

En la siguiente imagen se puede ver como es la composición del biogás y la generación del líquido lixiviado en las distintas etapas anteriormente mencionadas.

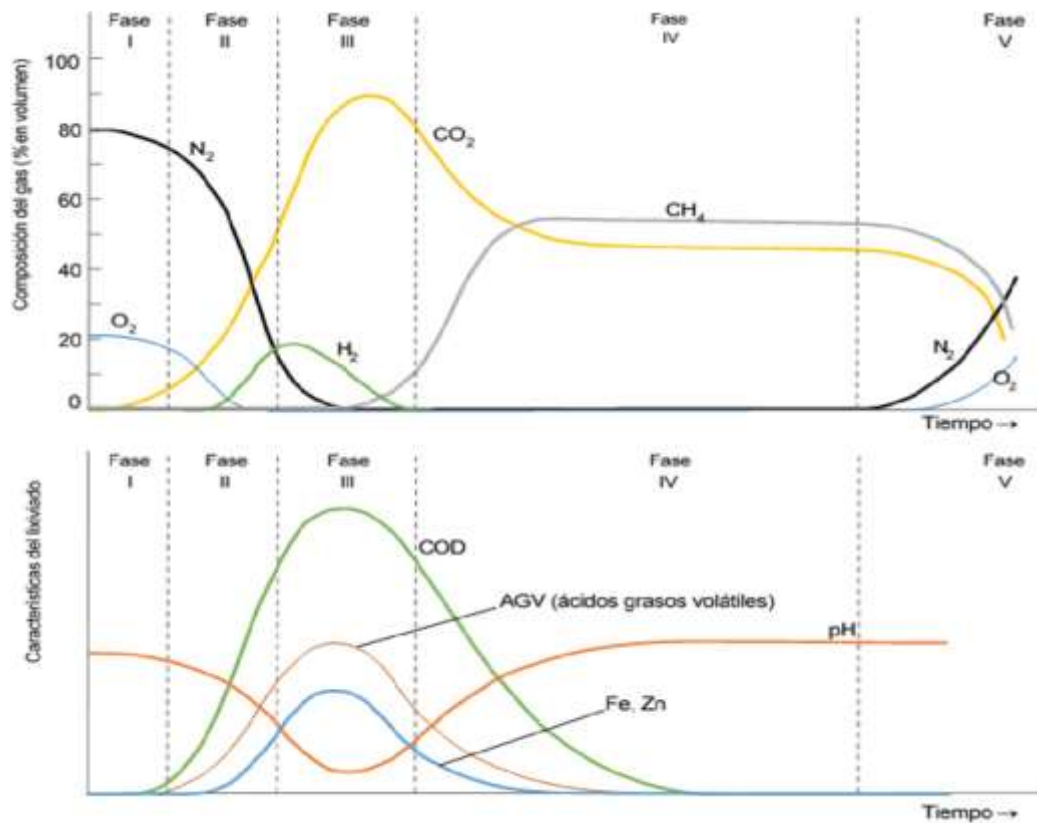


Figura 5.13: Comportamiento del gas y del lixiviado en función del tiempo
Fuente: George Tchobanoglous, 1982

En la siguiente imagen podemos ver cómo los distintos compuestos orgánicos de los residuos sólidos van a degradarse formando como producto final metano y dióxido de carbono

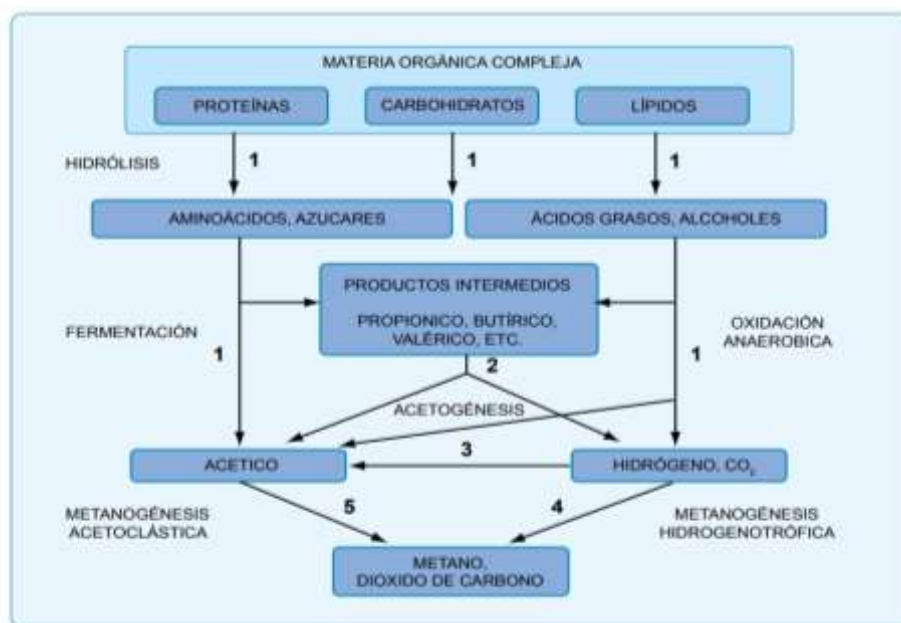


Figura 5.14: Degradación anaeróbica de los RSU
Fuente: Pavlostathis y Giraldo-Gomez, 1991



5.6. COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS

El CH₄ y el CO₂, son los principales gases constituyentes del biogás y se producen durante la descomposición anaeróbica de la celulosa y las proteínas en los residuos de los rellenos sanitarios.

La composición típica del biogás generado por Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es la siguiente:

- **Metano (CH₄):** 55–70%
- **Dióxido de carbono (CO₂):** 30–45%
- **Contaminantes:**
 - Ácido sulfhídrico (H₂S): corrosivo, 50 ppm a 3%
 - Vapor de agua
 - Compuestos orgánicos volátiles (COV)
 - Siloxanos: hasta 50 mg/m³, dañan motores

En la siguiente tabla se pueden observar más propiedades físicas y químicas típicas del biogás generado en el vertedero controlado:

Composición	55 – 70% metano (CH ₄) 30 – 45% dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Tabla 5.1: Propiedades físicas y químicas del biogás
Fuente: Deublein y Steinhauser (2008)

El equivalente energético del biogás tiene relación con la concentración de metano que tenga en él, ya que el poder calorífico del CO₂ es nulo. Así, cuanto mayor sea la concentración de metano en el biogás, el poder calorífico aumenta proporcionalmente. Este poder calorífico puede aprovecharse para generar energía eléctrica en el caso de nuestro proyecto. En la siguiente tabla podemos observar el potencial generador de energía eléctrica del biogás.

1 Nm3	Gas Natural	Produce	10 KWh
1 Nm3	Biogás	Produce	5,28 Kwh
1 Litro	Nafta	Produce	9,06 Kwh
1 Litro	Diesel	Produce	9,8 Kwh

Tabla 5.2: Potencial de generación eléctrica
Fuente: Elaboración propia

5.7. APLICACIONES DEL BIOGÁS

Siendo los combustibles una de las formas en que se puede medir el crecimiento de un país, correspondiendo el principal a los hidrocarburos, el biogás es una fuente energética para nada despreciable generada de manera natural. Su potencial energético puede ser utilizado, dependiendo de su contenido de CH₄ y el caudal captado, en diferentes aplicaciones.

La cadena de valor de este biocombustible, una vez tratado y purificado, se convierte en biometano, un gas de alta calidad energética y comparable al gas natural, que puede utilizarse para la generación eléctrica, inyectado en la red de gas natural, utilizado como combustible vehicular o utilizado como alimentación a un proceso de reformación para la producción de hidrógeno verde (H₂) y con sistema de captura de dióxido de carbono orgánico (CO₂) para su uso en movilidad, en procesos industriales y en la síntesis de bio metanol (CH₃OH), para uso como combustible marítimo o en otros usos industriales.



Figura 5.15: Aplicaciones del biogás

Fuente: Manual de producción de BIOGAS, INTA

Destacan entre los usos del biogás los siguientes tipos:

- Proyectos de generación de electricidad y cogeneración.
- Proyectos de uso directo como gas de medio-Tú en calderas, secadores, hornos u otros equipos térmicos.
- Proyectos de conversión de biogás a un gas de alto-Tú asimilable a gas natural para comercializarlo como combustible en gas de tubería, GNC o GNL.

5.8. GENERACIÓN ELÉCTRICA

La generación eléctrica es el uso más común para la utilización del gas de relleno sanitario, a nivel mundial la mayoría de proyectos de aprovechamiento utilizan motores de combustión interna, turbinas de gas o microturbinas, teniendo estos como principal ventaja que solo son



necesarios tratamientos primarios para la remoción de partículas y concentraciones de sulfuro de hidrógeno y / o siloxanos en caso de que sean elevadas.

Motores de combustión interna: Son la tecnología de conversión más utilizada, siendo este un motor que funciona en conjunto con un generador eléctrico que produce energía, su costo es relativamente bajo, presentan alta eficiencia y existen en diferentes tamaños que se adecuan al flujo de biogás requerido. También presentan la ventaja de permitir añadir o quitar motores según las tendencias de recuperación de gas.

Microturbinas: Las microturbinas son usuales en rellenos en los cuales la producción y captura de gas es considerablemente baja y el porcentaje de CH₄ presente en la mezcla de gases es inferior al 50 %. Generalmente el costo de producción de kW es superior a equipos como los motores de combustión interna.

5.8.1. Uso directo como gas de medio-btu

Calderas, Secadoras y Hornos: El uso de biogás en hornos es uno de los más comunes, en este el gas se usa para calentar agua en un sistema de caldera ya sea para calefacción o calor de proceso ejemplo de ello se da en la producción de cemento y asfalto. Este sistema es relativamente simple ya que el gas sólo requiere la eliminación limitada de condensado y tratamiento de filtración previo a su utilización. La desventaja que tiene con respecto a la generación de energía eléctrica es que el precio de la energía térmica es menor, además que la distribución de energía eléctrica es más sencilla debido a la amplia distribución de líneas eléctricas con relación a lugares a donde hay calderas.

5.8.2. Conversión a gas de alto-btu

El gas de relleno sanitario puede purificarse hasta un contenido de metano de 98 a 100%, después de lo cual es posible usarlo para producir el equivalente de gas de calidad de tubería (gas natural), Gas Natural Comprimido (GNC) o Gas Natural Licuado (GNL). En consecuencia, puede distribuirse a la red de gas natural para su uso industrial, teniendo como ventaja que ya existe dicho sistema para su transporte. Esto descarta la inversión en una planta de utilización, pero a cambio será necesaria una gran inversión en plantas de purificación. Antes de la inyección a la red de gas natural el biogás debe tratarse para eliminar partículas, líquidos, CO₂ y algunos componentes trazas como el H₂S, los procesos de tratamiento más comunes incluyen absorción química, adsorción por oscilación de presión y separación de membrana.

Para el presente proyecto se ha decidido optar por el aprovechamiento energético del biogás a través de la quema del mismo en una máquina térmica generadora para la obtención de energía eléctrica.

5.9. CAPTACIÓN DE GASES

El funcionamiento satisfactorio de cualquier sistema de biogás requiere el correcto funcionamiento de cuatro actividades principales. Éstas incluyen:

1. Monitoreo de biogás, utilizando sondas que normalmente se colocan alrededor del perímetro del vertedero.
2. Extracción y recolección de biogás mediante pozos y/o trincheras.
3. Recolección, bombeo, almacenamiento y tratamiento del condensado de biogás.



4. El tratamiento, la eliminación o el uso de biogás mediante sopladores, antorchas o equipos de recuperación de energía.

La secuencia constructiva será de forma tal que se realiza conforme avanza la disposición de residuos y la cobertura se encuentre en cota final.

Las perforaciones se llevarán a cabo con una perforadora autopropulsada, la cual se desplaza hasta el lugar de la excavación. Se perforará con una broca de 500 mm de diámetro, luego se insertará el caño perforado de PEAD de 160 mm de diámetro externo, y se completará la sección anular con piedra partida granítica no calcárea.

Cada pozo de extracción tiene un tramo liso y otro perforado. El tramo liso se colocará en la parte superior del pozo, con esto se busca evitar captar el oxígeno de la superficie en caso de que la cobertura presente alguna falla, el resto de la tubería será perforada.

Los pozos llevan:

- Tapas de fondo para poder sellar el tubo en su parte inferior y uniformizar la succión a lo largo del tramo de la tubería.
- Piedra Partida granítica no calcárea que se utilizará tanto para la conformación del fondo de pozo de 0,50 m de espesor, como para el llenado de la sección anular hasta donde comienza el sello bentonítico.
- Bentonita, que se utilizará una mezcla bentonítica para el sellado superior de los pozos de captación.
- Tierra: se utilizará para el sellado y terminación superior del pozo de captación.
- Cabezales: los cabezales de los pozos estarán formados por un cuerpo de PEAD. En el extremo superior contará con una tapa bridada para permitir el acceso en caso de necesidad. La salida será mediante un ramal derivación lateral con acople rápido para medición de presión y una válvula mariposa para permitir la regulación y optimización de la captación del biogás.

Esta red será la encargada de conducir y distribuir el biogás desde cada pozo de captación hasta la planta de tratamiento. La configuración de la misma será del tipo “espina de pescado” y estará compuesta por los siguientes componentes:

- Tuberías primarias y secundarias de conexionado de pozos
- Colectores
- Cárcamos de condensado (para separar la fase líquida de la corriente de biogás)
- Tubería principal
- Tubería de ingreso a planta

Los equipos de tratamiento serán los adecuados para garantizar los requisitos de calidad del biogás a la entrada de los motogeneradores para una correcta operación. Dicho tratamiento comprenderá la eliminación de líquidos, humedad, partículas y siloxanos de la corriente de gas.

En la actualidad, existen dos tipos de tecnologías para la captación de biogás. Estas son:

1. Pozos verticales
2. Sistema de trincheras horizontales

5.9.1 Pozos verticales



El sistema de campo de pozos verticales de biogás se compone de una red de pozos o colectores en el relleno sanitario, junto con tuberías de transporte de biogás a una instalación de tratamiento y valorización de este. Los pozos de extracción verticales se instalan comúnmente en la masa de residuos del relleno sanitario interior para el control de emisiones de biogás y la recuperación de energía, una vez que se han completado las operaciones de llenado. También se instalan a lo largo del perímetro del vertedero para el control de la migración de biogás.

Los componentes principales de un sistema de Pozos Verticales son:

- Pozo de extracción
- Tuberías laterales
- Cárcamos/trampas de condensado
- Colector principal



Figura 5.16: Sistema de pozos verticales

Fuente: Aprovechamiento de biogás para generación de energía eléctrica - 2022

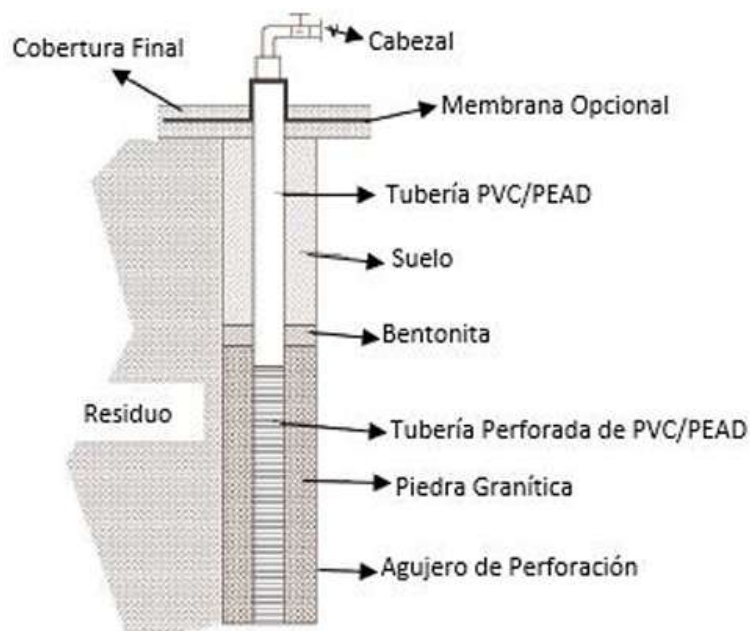




Figura 5.17: Perfil de un pozo vertical

Fuente: Aprovechamiento de biogás para generación de energía eléctrica - 2022

5.9.2. Pozos horizontales

La instalación de pozos horizontales, comúnmente llamados trincheras de captación, sirve como otro método eficiente de recolección de biogás, particularmente en los vertederos que aún se están llenando activamente. Una vez que se ha colocado y compactado un elevador de residuos en el vertedero, se instalan tuberías de recolección perforadas y se coloca otra capa de residuos encima. Esto permite la recolección de biogás directamente debajo de un área de llenado activa.

Este es un método de captación de biogás el cual se materializa realizando excavaciones en el orden de 100 metros de longitud por una profundidad de entre 5 a 6 metros sobre el manto de residuos ya dispuestos. La misma se realiza aprovechando la pendiente del módulo de disposición de residuos, a fin de que en su extremo inferior (cota más baja) se gestionen los líquidos condensados a través de un sistema de válvulas y sifones hacia los drenes de captación de líquidos lixiviados del sistema. Y en la parte superior se remata con un cabezal vertical donde se captará y regulará el biogás a tubería de colección a través de una válvula de regulación y sample port para realizar mediciones.

La trinchera en sí está conformada en el seno de los residuos por una tubería de HDPE ranurada cubierta con un geotextil e inmersa en un dren horizontal de piedra partida. Las sucesivas trincheras de captación se ejecutan unas de otras a una distancia de 12 metros a fin de que la influencia de ella no entre en conflicto con la más cercana. La trinchera en su cota superior se cubre con suelo de cobertura, tosca con adición de bentonita en polvo, la cual es higroscópica y le aporta al suelo propiedades de baja permeabilidad. Esto se realiza a fin de evitar que ingrese oxígeno a la trinchera.

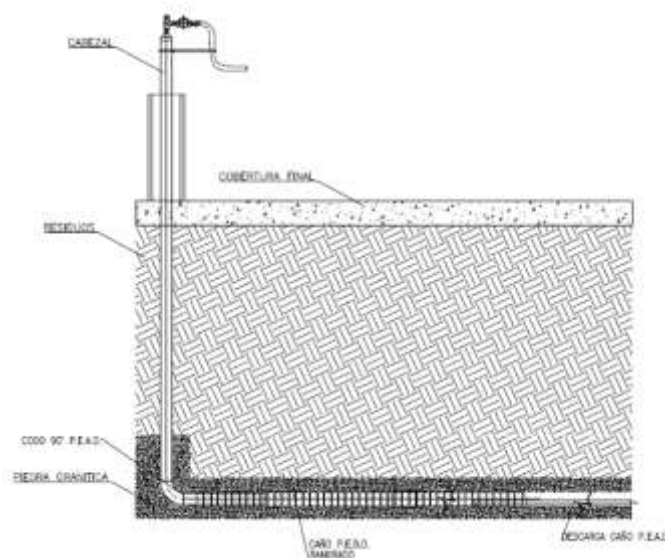


Figura 5.18: vista lateral de una trinchera

Fuente: Aprovechamiento de biogás para generación de energía eléctrica - 2022

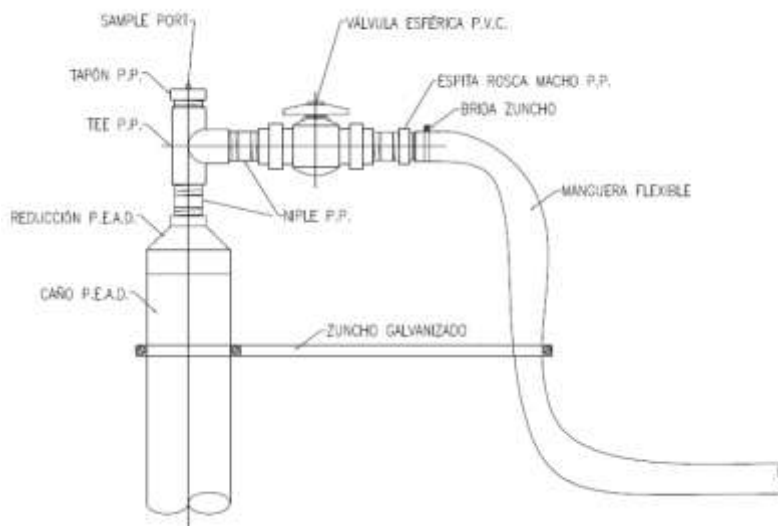


Figura 5.19: Detalle de un cabezal de trinchera

Fuente: Aprovechamiento de biogás para generación de energía eléctrica - 2022

A diferencia de los pozos verticales, las trincheras gestionan sus condensados por gravedad, mientras que, en el primero, se debe contar con bombas para poder impulsar condensados y lixiviados fuera del pozo y poder captar gas sin tener obstrucciones con los líquidos. El sistema de pozos no es conveniente en rellenos ubicados en zonas húmedas con gran incidencia de precipitaciones.

Como se describió en apartados anteriores, el relleno de San Rafael se encuentra en una zona seca con baja incidencia de precipitaciones anuales, por ello no habría inconveniente en colocar el sistema de pozos verticales en este caso. Por otro lado, el sistema de pozos verticales representa una menor inversión en cuanto a costos. Entonces se concluyó que el sistema de pozos verticales es idóneo para el vertedero del presente proyecto.

5.10. PURIFICACIÓN DE BIOGÁS

Se elige producir energía con motores de combustión interna ya que no requieren la separación del dióxido de carbono (CO_2), lo que simplifica el proceso de acondicionamiento del biogás. Sin embargo, es indispensable garantizar la remoción de humedad, partículas sólidas, compuestos corrosivos y contaminantes que podrían dañar los equipos o reducir su eficiencia. Para ello, la purificación del biogás requiere de los siguientes equipos y etapas:

El gas captado desde el vertedero es impulsado mediante un soplador, que asegura el caudal y la presión necesarios para su conducción. Luego atraviesa un separador de condensados, donde se remueve la fracción de agua presente en forma de vapor que condensa al enfriarse, evitando corrosión y fallas prematuras. Posteriormente pasa por un filtro de partículas, encargado de retener sólidos finos y material arrastrado que pudiese dañar válvulas, compresores o motores. A continuación, el biogás es comprimido en un compresor, que eleva su presión para favorecer las etapas de purificación subsiguientes y asegurar una alimentación estable a los motogeneradores.

En esta condición, el gas ingresa a un adsorbedor de H_2S , generalmente cargado con un material adsorbente de alta afinidad (como óxidos de hierro), que retira el sulfuro de hidrógeno, un compuesto altamente corrosivo y tóxico. Una vez reducido este contaminante,



el biogás atraviesa un sistema de remoción de siloxanos, normalmente basado en carbón activado, que elimina estos compuestos presentes en residuos domésticos, los cuales al combustionar forman depósitos abrasivos de sílice en los motores. Finalmente, el biogás purificado, seco y libre de impurezas dañinas, es conducido hacia los motores de combustión interna acoplados a generadores eléctricos, donde se transforma en energía eléctrica de manera continua y segura, asegurando la valorización energética del residuo y la confiabilidad del sistema.

En el Capítulo 6: ingeniería de detalle se describen con mas profundidad los equipos a utilizar en estas etapas.

5.11. PLANTA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

El Biogás es una fuente de energía renovable que puede utilizarse para generar electricidad y calor, así como para producir combustibles verdes como el Biometano. Su captura y aprovechamiento no solo disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también convierten un problema de desechos en una solución sostenible. La extracción y quema controlada del biogás evita la liberación directa de metano a la atmósfera, un gas con un potencial de calentamiento global significativamente mayor que el dióxido de carbono.

Una vez seleccionada la tecnología a desarrollar para el sistema de colección de biogás, se procedió a analizar las tecnologías disponibles para el tratamiento de dicho gas y la posterior generación de energía a través del aprovechamiento de este. La mayoría de los proyectos de valorización de biogás en operación utilizan:

- Motores de combustión interna.
- Turbinas de gas.
- Microturbinas.

Los motores de combustión interna son los más utilizados ya que presentan alta eficiencia en comparación con las turbinas de gas y microturbinas. Son de bajo costo por kW en comparación con las otras dos alternativas, y en el mercado existen varios modelos dependiendo del flujo de biogás disponible y el porcentaje de metano en él. La eficiencia de estos motores varía entre 25 y 35%. Existe una desventaja "ambiental" que es la generación de emisiones a la atmósfera que producen este tipo de motores. Al tratarse de proyectos de valorización de gases con gran potencial de efecto invernadero, dichas emisiones de los motores, se equilibran ya que se le da no solo un tratamiento al biogás, sino que se genera energía sustentable a través de este.

El rango de tamaño para proyectos típicos asumiendo 50% de metano en el biogás es entre 8 y 30 m³/min de LFG, y capacidades entre 800 kW y 3 MW; teniendo la alternativa para proyectos de mayor escala, combinar varios motores.

La generación de electricidad utilizando estos equipos requiere de la purificación del gas con la finalidad de reducir las impurezas presentes en él y evitar el deterioro de partes componentes fundamentales de dichos motores. Aun así, trabajan con 40-60% CH₄ y 30% de CO₂, por lo cual no es necesario separar el dióxido de carbono de la mezcla.

En la actualidad, a nivel mundial, existe una gran cantidad de proyectos que utilizan este tipo de motores para la generación de electricidad en diferentes tipos de vertederos, tales como el proyecto del relleno sanitario de Os X Mountain en Estados Unidos de 11 MW, proyectos



como el de la compañía Dairyland Poner Cooperative en los Estados Unidos de 4,8 y 5,6 MW, el proyecto del relleno sanitario Belo Horizonte en Brasil de 4.3 MW que es una planta de recuperación formada por una red de tubos distribuidos por todo el vertedero, que recoge el biogás y lo lleva a un centro de combustión, transformándolo en electricidad. Si esta energía fuera producida por una planta termoeléctrica, se necesitarían alrededor de 80.000 barriles de petróleo, entre otros.

En cuanto a las turbinas de gas, suelen utilizarse para proyectos que deseen generar más de 5 MW, debiendo contar con flujos de LFG superiores a 40 m³/min. A medida que aumenta el tamaño de la turbina se reduce el costo del kW, mejorando así la generación de energía. Estos equipos cuentan con una eficiencia de 20 a 28%, con la posibilidad de aumentarla a un 40% para casos de cogeneración. Estas, como con los motores, requieren de la eliminación de siloxanos y otras impurezas que dañan a ciertos componentes de estos equipos.

Uno de los proyectos a nivel mundial que utiliza este tipo de tecnología es en el relleno sanitario de Arlington Texas, Estados Unidos, en el cual el biogás generado por los residuos dispuestos en dicho sitio es transportado más de 6 km para generar electricidad en una planta que cuenta con una turbina de 5.2 MW.

Por último, las microturbinas son utilizadas en rellenos sanitarios de pequeña índole donde se tiene un flujo menor a 8 m³/min con contenidos de metano inferiores al 35%. Estos equipos son mucho más costosos por kW generado. Este a su vez también debe contar con un pretratamiento del biogás para eliminar los siloxanos presentes en él. En el mercado sus tamaños varían entre 30 a 250 kW.

Por todo lo mencionado anteriormente, se decide utilizar motogeneradores de combustión interna para la generación de energía eléctrica a través del biogás generado por los RSU depositados en el relleno sanitario de San Rafael.

Tecnología	Rango típico de flujo (m ³ /min)	Capacidad de generación de energía	PCI 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 (mejor rendimiento a 113,25)	> 3 MW	50%	20 a 40
Microturbinas	> 8,5	30 a 250 kW	35%	25 a 30

Tabla 5.3: Alternativas de generación energética

El rendimiento eléctrico de un motor es del 33% a 38%. Por lo que 1 m³ de biogás ≈ generaría 1,8 kWh de energía eléctrica.



CAPÍTULO 6

INGENIERÍA DE DETALLE

6.1. INTRODUCCIÓN

Se entiende por ingeniería de detalle o ingeniería de proceso a aquella etapa del proyecto donde se desarrollan, evalúan y diseñan los procesos productivos. Además, se genera toda la información necesaria para la ingeniería básica como así también se definen todos los requerimientos de materias primas e insumos del proceso.

En este capítulo se desarrollarán los aspectos relacionados con la ingeniería de detalle para la conformación del vertedero controlado y su operación eficiente. También otras variables como:

- Planos generales de todas las instalaciones.
- Producción de biogás.
- Estimación de la generación eléctrica
- Cálculo de los equipos más necesarios para el proyecto.

6.2 PLANOS GENERALES Y DE DETALLE DE TODAS LAS OBRAS, INSTALACIONES Y EQUIPOS.

6.2.1. Superficie del proyecto

En la siguiente figura se puede observar la superficie total abarcada por el proyecto en un lapso de 20 años. Inicialmente el proyecto constará de las instalaciones correspondientes a la planta de separación, planta de biogás, oficinas y demás infraestructura complementaria, el vertedero propiamente dicho comenzará a emplazarse de este a oeste a continuación de la planta de separación, por esto, en un comienzo la superficie del proyecto será mucho menor.

Esta estimación se realizó en la localización elegida en el capítulo 3, considerando que la instalación de nuestro proyecto se adaptará a la infraestructura actual del vertedero “La Tombina”, además se destaca que para la logística de recolección y traslado de los RSU se establecerá un acuerdo con la Municipalidad de San Rafael para que este ente siga siendo el encargado de dichas tareas delegado la disposición final a nuestro proyecto. Este convenio trae consigo grandes beneficios para ambas partes.



Figura 6.1: Área del proyecto

6.2.3 Diagrama de bloques

El diagrama de bloques describe el circuito de operación de la planta y se visualizan las etapas básicas necesarias para la producción de energía eléctrica a partir de la descomposición de los RSU.

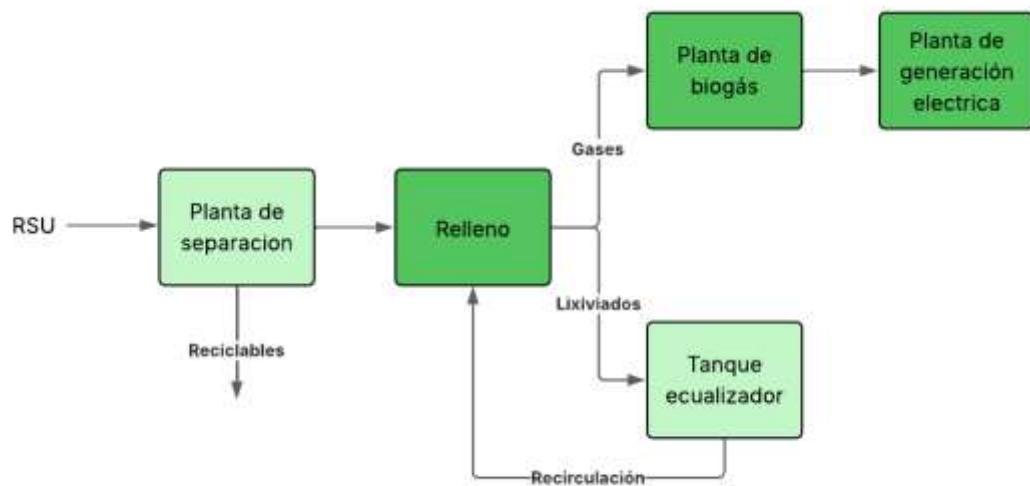


Figura 6.2: Diagrama de bloques del proyecto

Fuente: Elaboración propia

6.2.4. Diagrama de flujo de procesos

A continuación, se puede visualizar el diagrama de flujo que representa gráficamente los distintos equipos a utilizar en el proyecto.

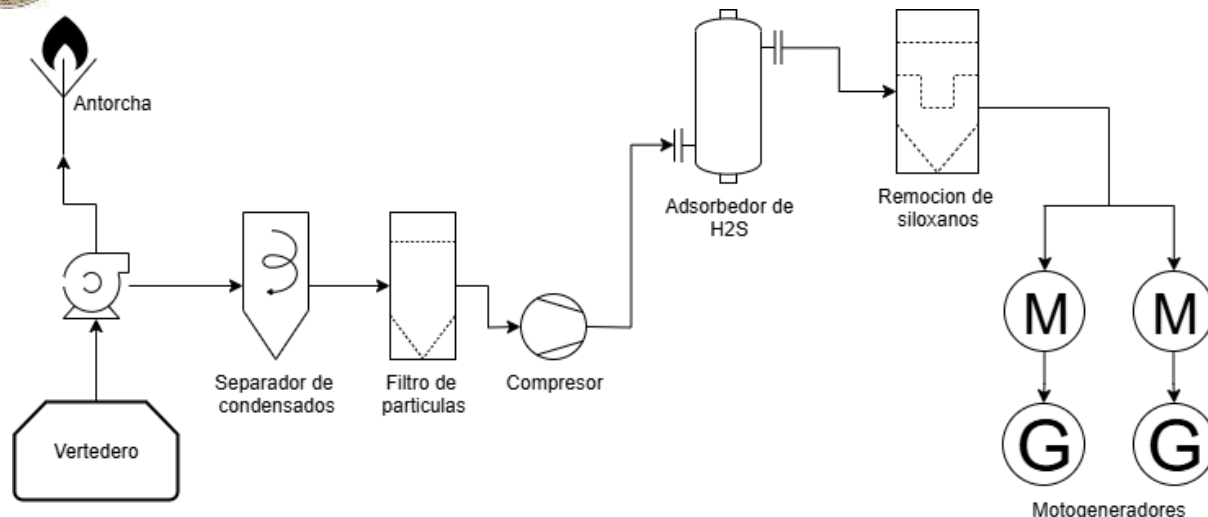


Figura 6.3: Diagrama de flujo del proceso global
Fuente: Elaboración propia

6.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES Y DE DETALLE.

6.3.1. Planta de separación

La planta de separación funcionara solamente durante un turno de 8h por la mañana, en el cual se recibirán y clasificaran la totalidad de los residuos acumulados en un día lo que equivale aproximadamente a 168 toneladas diarias.

- **Tolva de descarga y elevador**

- Función: Recepcionar el camión y alimentar de forma regulada la cinta de alimentación.
- Especificaciones mínimas: volumen 8–15 m³, boca de descarga $\geq 3,5 \times 3,5$ m, fondo vibrador o sinfín dosificador, estructura en acero S275.
- Nota: debe incluir reja de seguridad y acceso para limpieza; diseñada para manejo de bolsas y fracción mixta.





Figura 6.4: Tolva de recepción
<https://dme1923.com/es/productos/cintas-elevadoras/>

- Marca: DIEMME
- Modelo: NE-6500
- Potencia: 0,75 kW
- Caudal: 8 ton/h
- Valor aproximado: US\$ 1500

- **Cinta de clasificación**

- Función: desplazar la fracción para la selección manual por clasificadores.
- Especificaciones mínimas: ancho 0,8–1,0 m; velocidad 0,2–0,35 m/s; longitud 8–12 m; pasarela lateral y barandas; iluminación y extracción localizada.
- Nota: prever 8–10 puestos de trabajo, sensores de paro emergencia y variador de frecuencia para regular caudal.



Figura 6.5: Cinta de clasificación

- **Prensa enfardadora**

- Función: compactar y enfardar papel, cartón y plásticos para almacenamiento/venta.
- Especificaciones mínimas: fuerza 60–120 t; producción 3–6 t/h; dimensiones fardo aprox. 1.100×750×750 mm; atado automático (fleje/alambrado).
- Nota: instalar en línea tras la cinta de salida de cada fracción valorizable.
- Valor aproximado: US\$ 1200



Figura 6.6: Prensa enfardadora

- Boca de carga: 1200mm x 600mm
- Tamaño del fardo: 1200mm x 800mm x 1000/1100mm
- Presión: 30 Toneladas
- Peso fardos (Según material) hasta 550 Kg.
- Potencia: 15 Hp. (10KW) 1500RPM
- Valor aproximado: US\$ 13.000



Figura 6.7: Conformación del fardo

<https://recympack.com/AR/productos-ampliados/58/prensa-enfardadora-recympack-800>



6.3.2. Diseño de módulo

La densidad de los residuos dispuestos y compactados es un dato crítico para el cálculo del volumen de residuos a disponer. La densidad de los RSU pasa por distintos valores de acuerdo a la etapa de gestión en la que se encuentra. En estado suelto es decir en origen, la densidad oscila entre 80 a 120 kg/m³, y después de la compactación en Camión Recolector, su valor aumenta a 350-500 kg/m³, en función del estado de la prensa de dicho equipo. En el relleno, los residuos pueden alcanzar valores desde 600 kg/m³ hasta 1.100 kg/m³, dependiendo su valor final promedio del espesor de residuos compactados, el peso del equipo compactador y el número de pasadas realizadas para cada capa compactada.

Existen pocos datos regionales de la densidad alcanzada en rellenos sanitarios, a excepción de las estadísticas del CTDF del Valle de Uco, donde se han alcanzado densidades superiores a 1,1 Tn/m³. Dicha densidad ha sido alcanzada con equipos pesados (Topadora sobre Orugas de 20 Tn de peso) en capas compactadas de espesores menores de 30 cm.

Por lo tanto, y teniendo en cuenta datos regionales, se adopta para el diseño del primer Módulo, la densidad de 1,0 Tn/m³, para los residuos compactados en su posición final, teniendo en cuenta que los equipos serán similares a los utilizados en el vertedero mencionado.

Por lo que según la tabla 3.4, al final de la vida útil de nuestro relleno tendremos un volumen de 1263030 m³ de residuos.

Las dimensiones del primer módulo, para contener 1663030 m³ de RSU, tienen un valor:

- Ancho: 420 m
- Largo: 514 m
- Profundidad: 6 m

$$V = 420 \text{ m} * 514 \text{ m} * 6 \text{ m} = 1310400 \text{ m}^3$$

El volumen faltante de residuos 352630 m³ puede ser acopiado en forma de talud sobre el nivel cero del proyecto dándole una forma trapezoidal.

Si tomamos en cuenta el agregado de 15 cm material de cobertura en dos partes una en la mitad del relleno y otra a nivel del suelo donde se comenzaría a construir el talud tendríamos:

$$V = 420 \text{ m} * 514 \text{ m} * 0.3 \text{ m} = 64764 \text{ m}^3$$

También se necesitarán unos 20cm de cobertura vegetal para la cobertura del talud:

$$V = 420 \text{ m} * 514 \text{ m} * 0.2 \text{ m} = 43176 \text{ m}^3$$

En total necesitaríamos aproximadamente 107940 m³ de material de cobertura para el relleno del módulo.

6.3.3. Operación de relleno

Para la construcción de las celdas de disposición final se procederá metodológicamente, con un avance secuenciado. Las celdas serán conformadas con una geo membrana impermeabilizante de PEAD de 2000 µm, las que permitirán la separación de las aguas de lluvia del frente de descarga. Luego el vertido de los residuos y su posterior cobertura.

Para la ejecución del fondo de la celda donde se colocará la geo membrana se emplearán equipos de movimiento de suelos y compactación que permitan lograr la conformación prevista en los planos de diseño y obtener un adecuado apoyo de la membrana. Durante la preparación de cada sector a rellenar se asignan pendientes de fondo del 5% que permitan



el escurrimiento de las aguas superficiales hacia el sistema de drenaje y pileta de acopio de aguas.

El objetivo en el diseño de aislamientos para vertederos es minimizar la filtración del lixiviado en los suelos por debajo del vertedero y eliminar, así, la contaminación potencial de las aguas subterráneas.

La cobertura o recubrimiento es la operación por la cual los residuos depositados y, ya compactados, son recubiertos diariamente con material inerte. Ese material inerte es el previamente excavado para la generación del pozo del relleno. El recubrimiento diario de los residuos es una de las operaciones más importante del proyecto ya que:

- Minimiza el vuelo de papeles, plásticos, etc.
- Posibilita el movimiento de vehículos
- Reduce los olores en el vertedero
- Evita el contacto de los residuos con el oxígeno del aire, reduciendo la fase aerobia inicial
- Inhibe la aparición de roedores y aves
- Reduce la entrada de agua de lluvia
- Minimiza el riesgo de incendios

El recubrimiento se hace con 15 cm de tierra extraída anteriormente.

El vertedero controlado y las celdas de disposición final tendrán la siguiente forma

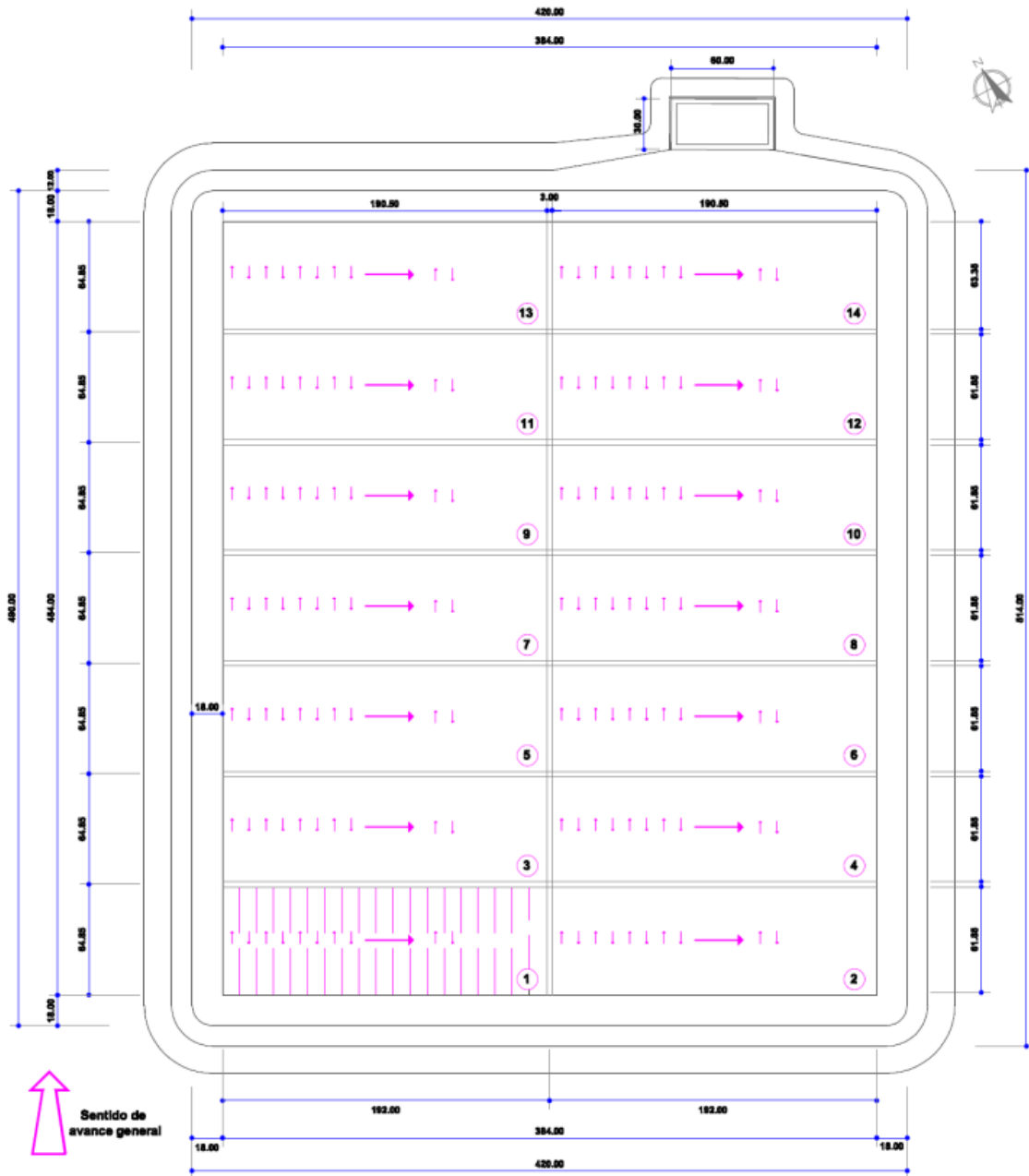


Figura 6.8: Forma de módulos que componen el vertedero controlado.
Fuente: MEMORIA TÉCNICA Y OPERATIVA CENTRO AMBIENTAL EL BORBOLLÓN / 2014

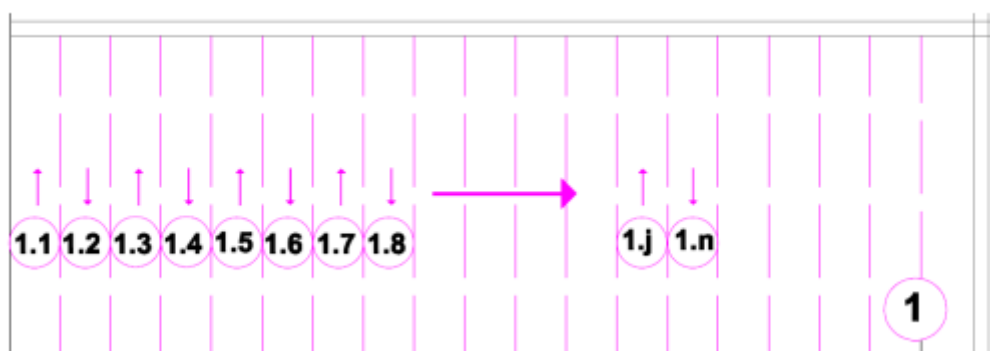




Figura 6.9: Secuencia constructiva del módulo

Fuente: MEMORIA TÉCNICA Y OPERATIVA CENTRO AMBIENTAL EL BORBOLLÓN / 2014

6.3.4. Cálculo de biogás generado

Para estimar la capacidad de producción es necesario saber con la mayor aproximación posible qué cantidad de gas se generará en el relleno sanitario. A tal efecto, existen diferentes modelos de aproximación para estimar cuánto biogás es esperable que se genere en un relleno sanitario en etapa de operación y post cierre.

- **MODELO A: APROXIMACIÓN SIMPLE**

Como su nombre lo indica, es una aproximación gruesa fundamentada en la cantidad de residuos depositada en un relleno. Se basa en una razón empírica entre la cantidad de residuos y el flujo de biogás observada en los muchos y variados proyectos de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC).

Es un reflejo de las características del relleno promedio y puede no representar con precisión las distintas características de los residuos, así como el clima y otras variables que pueden estar presentes en un relleno específico.

En general, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) recomienda utilizar esta regla sólo como un proceso preliminar para determinar si es necesario utilizar métodos más complejos. Esta regla simple de aproximación sólo requiere conocimientos acerca de la cantidad de residuos depositada en el relleno de interés y se nutre del juicio y experiencia de expertos de la industria.

Se ha establecido que la generación de biogás puede variar entre $0,00312 \text{ m}^3/\text{Kg}$ y $0,0125 \text{ m}^3/\text{Kg}$ de basura depositada al año.

Debido a que este método no considera el paso del tiempo que los residuos llevan depositados, la EPA recomienda comenzar a aplicar un factor de disminución anual de entre 2% y 3% a la generación de biogás.

- **MODELO B: MODELO DE DEGRADACIÓN DE PRIMER ORDEN**

El objetivo principal del Modelo es proveer a los propietarios de rellenos sanitarios y operadores una herramienta para la evaluación de la factibilidad y los beneficios potenciales al capturar y utilizar el biogás generado. Para satisfacer este objetivo el Modelo usa una hoja de cálculo de Excel para calcular la generación de biogás aplicando una ecuación de degradación de primer grado. El modelo provee estimaciones de la recuperación de biogás multiplicando la generación de biogás por los estimados de la eficiencia con la que el sistema de captura recupera el biogás, esto es conocido como eficiencia de captura.

El Modelo usa la siguiente información para estimar la generación y recuperación del biogás en un vertedero controlado.

- La cantidad de residuos depositados en el relleno sanitario anualmente.
- El año de apertura y clausura del sitio.
- El índice de generación de metano (k)
- La generación potencial de metano (L0).
- La eficiencia de recuperación del sistema de captura.

El modelo estima el índice de generación de biogás para cada año usando la ecuación de degradación de primer grado, la cual fue modificada por US EPA en el Modelo LandGEM. Según la ecuación:



$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^j k * L_0 * \left(\frac{M_i}{10}\right) * e^{-k * T_{ij}}$$

Donde:

- Q_{CH_4} : es la generación anual de CH_4 en el año del cálculo ($m^3/año$)
- i : es el incremento de tiempo de 1 año
- j : es el incremento de tiempo de 0,1 años
- n : es el año del cálculo, donde se inicia la aceptación de residuos
- k : es la constante de generación de CH_4 para el año 1
- L_0 : es la capacidad potencial de generación de CH_4 (m^3/t)
- M_i : es la cantidad de residuos recibidos en el año i
- T_{ij} : es la edad de la sección j de cantidad de residuos M_i aceptados en el año i

La ecuación anterior estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a través de un año. Proyecciones para años múltiples son desarrolladas variando la proyección del anual y luego iterando la ecuación.

La generación de biogás total es igual a dos veces la generación de metano calculada. La función de degradación exponencial asume que la generación de biogás está a su máximo un período antes que la generación de metano.

Las variables más importantes para la estimación de producción son k , L_0 y M_i .

M_i es la cantidad de Materia Orgánica que va a ingresar a nuestro relleno, estos valores fueron estimados en el Capítulo 2, de tamaño y localización del proyecto.

El valor de k está en función de los siguientes factores: contenido de humedad en los residuos, la disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano, pH, y temperatura. Las condiciones de humedad dentro del relleno sanitario generalmente son difíciles de determinar por lo que son estimadas en base a la precipitación promedio anual. La disponibilidad de nutrientes está en función de las cantidades de residuos y la caracterización de los mismos. El pH dentro del relleno sanitario es desconocido y no es evaluado en el Modelo. La temperatura en el relleno sanitario es relativamente constante debido al calor generado por las bacterias anaeróbicas y tiende a ser independiente de la temperatura ambiente, excepto en rellenos sanitarios poco profundos en climas muy fríos. Por lo que los valores de k están basados en el tipo de residuo y clima.

El valor adoptado de k para nuestro proyecto es de 0,7. Este valor es experimental y solo se usa para una estimación aproximada del valor del biogás.

El valor de la generación potencial de metano (L_0) de los residuos describe la cantidad total de gas metano potencialmente producida por una tonelada de residuos cuando esta se degrada y depende casi exclusivamente de la caracterización de los residuos en el relleno sanitario. A un contenido mayor de celulosa le corresponde un valor mayor de L_0 . Las unidades de L_0 están en metros cúbicos por tonelada de residuos (m^3/t). Los valores teóricos de L_0 varían entre 6.2 y 270 de residuos. Por lo que se estima un valor de L_0 de $138 m^3/t$. Este valor es adoptado como el promedio de los dos valores teóricos.

Si bien el biogás comienza a generarse a partir de los 6 meses que los residuos fueron dispuestos en el vertedero, la recolección de biogás comenzaría en el año dos, ya que el caudal de gas comienza a ser lo suficientemente elevado como para que la captación sea eficiente.

CÁLCULO DE METANO POR AÑO ($m^3 CH_4/año$)



t	Años	Nt	X (Gen PCC) Tn/año	0	1	2	3	4	5	6	7
1	2025	216093.00	60733	586680.18	291336.75	144673.55	71842.76	35676.06	17716.21	8797.61	4368.76
2	2026	217964.67	61259		591761.65	293860.14	145926.63	72465.02	35985.06	17869.65	8873.81
3	2027	219836.33	61785			596843.11	296383.52	147179.70	73087.28	36294.07	18023.10
4	2028	221708.00	62311				601924.58	298906.90	148432.77	73709.53	36603.07
5	2029	223579.67	62837					607006.05	301430.28	149685.85	74331.79
6	2030	225451.33	63363						612087.52	303953.67	150938.92
7	2031	227323.00	63889							617168.99	306477.05
8	2032	229194.67	64415								622250.46
9	2033	231066.33	64941								
10	2034	232938.00	65467								
11	2035	234809.67	65993								
12	2036	236681.33	66519								
13	2037	238553.00	67045								
14	2038	240424.67	67571								
15	2039	242296.33	68097								
16	2040	244168.00	68623								
17	2041	246039.67	69149								
18	2042	247911.33	69675								
19	2043	249783.00	70202								
20	2044	251654.67	70728								
21	2045	253526.33	71254								
TOTAL CH4			1385858	586680.18	883098.40	1035376.80	1116077.49	1161233.73	1188739.12	1207479.37	1221866.96
TOTAL BIOGAS				1173360.36	1766196.80	2070753.60	2232154.97	2322467.46	2377478.25	2414958.73	2443733.93



8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2169.5	1077.3	535.0	265.7									
4406.6	2188.3	1086.7	539.6	268.0								
8950.0	4444.4	2207.0	1096.0	544.3	270.3							
18176.5	9026.2	4482.3	2225.8	1105.3	548.9	272.6						
36912.1	18330.0	9102.4	4520.1	2244.6	1114.6	553.5	274.9					
74954.1	37221.1	18483.4	9178.6	4558.0	2263.4	1124.0	558.2	277.2				
152192.0	75576.3	37530.1	18636.9	9254.8	4595.8	2282.2	1133.3	562.8	279.5			
309000.4	153445.1	76198.6	37839.1	18790.3	9331.0	4633.6	2301.0	1142.6	567.4	281.8		
627331.9	311523.8	154698.1	76820.8	38148.1	18943.8	9407.2	4671.5	2319.8	1152.0	572.1	284.1	
	632413.4	314047.2	155951.2	77443.1	38457.1	19097.2	9483.4	4709.3	2338.6	1161.3	576.7	286.4
		637494.9	316570.6	157204.3	78065.3	38766.1	19250.7	9559.6	4747.2	2357.4	1170.6	581.3
			642576.3	319094.0	158457.4	78687.6	39075.1	19404.1	9635.8	4785.0	2376.2	1180.0
				647657.8	321617.3	159710.4	79309.9	39384.1	19557.6	9712.0	4822.8	2395.0
					652739.3	324140.7	160963.5	79932.1	39693.1	19711.0	9788.2	4860.7
						657820.7	326664.1	162216.6	80554.4	40002.1	19864.5	9864.4
							662902.2	329187.5	163469.7	81176.6	40311.1	20017.9
								667983.7	331710.9	164722.7	81798.9	40620.1
									673065.1	334234.3	165975.8	82421.2
										678146.6	336757.6	167228.9
											683228.1	316570.6
												688309.5
1234093.1	1245245.9	1255865.7	1266220.8	1276312.5	1286404.2	1296496.0	1306587.7	1316679.4	1326771.1	1336862.9	1346954.6	1334335.9
2468186.2	2490491.8	2511731.3	2532441.5	2552625.0	2572808.5	2592991.9	2613175.4	2633358.8	2653542.3	2673725.8	2693909.2	2668671.8

Tabla 6.1: Estimación de la generación de Biogás en el Relleno Sanitario de San Rafael
Fuente: Elaboración propia



6.3.5. Equipos de la planta de purificación de biogás

- **Sistema de compresión**

Este sistema debe impulsar el biogás crudo desde la red de captación y vencer las pérdidas del tren de purificación. Para determinar el caudal a movilizar se tiene en cuenta el año de mayor producción de biogás, y así evitar un subdimensionamiento del equipo. Este caudal corresponde al doble del metano producido calculado anteriormente, por ende, el compresor debe movilizar un caudal de aproximadamente 300 m³

En cuanto a los materiales del equipo se debe tener en cuenta que tendrá contacto con gases tales como H₂S por ende se sugiere un equipo fabricado de acero al carbono con recubrimiento interno de epoxi.

- Equipo: Soplador de biogás 414 m³/h marca Zorg específico para biogás
- Valor: 4300,00 €
- Caudal máximo: 414 m³/h
- Presión máxima: 400 mbar
- Potencia máxima del motor: 5,5 kW
- Junta de eje fabricada en PTFE superconductor eléctrico, autoextinguible y auto lubricante con homologación ATEX
- Purgador de condensados en AISI 316 con válvula de bola certificada para gas
- Junta de acoplamiento elástica con certificación ATEX y tapa AISI 430

<https://zorg-biogas.com/equipment/biogas-blowers/biogas-blower-414-mh>



Figura 6.10: Compresor seleccionado

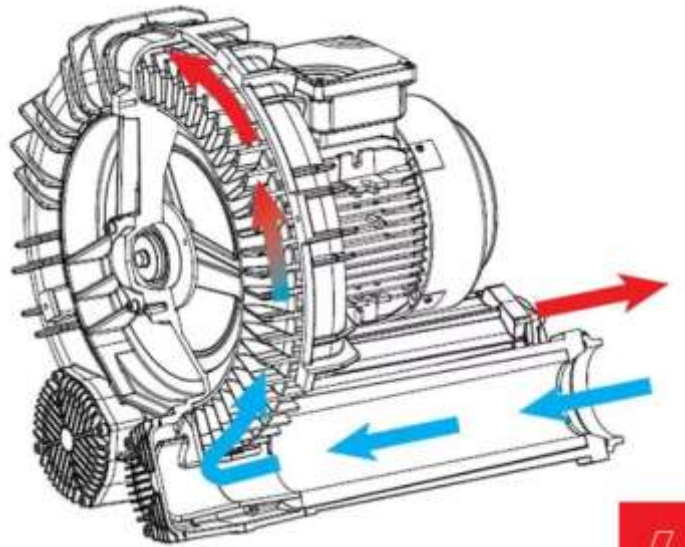


Figura 6.11: Principio de funcionamiento del compresor

- **Separador de condensados**

La humedad reduce la eficiencia de combustión de los motores al entrar en la cámara de combustión. Además, junto con el gas de sulfuro de hidrógeno, tiene un efecto corrosivo sobre los materiales, acorta la vida útil del equipo y reduce la eficiencia de combustión. Por lo tanto, la humedad afecta negativamente el uso final del biogás.

Al enfriarse, el gas se satura excesivamente con vapor de agua. Al reducir la temperatura del gas a 5 °C, se reduce su capacidad de retención de humedad y gran parte del agua que contiene se condensa.



Figura 6.12: Unidad de secado de biogás

El Biogas Dryer (Chiller) Unit de Anka opera bajo el principio de condensación mediante enfriamiento. El biogás proveniente del sistema de captación ingresa al equipo con una temperatura relativamente elevada y con un alto contenido de vapor de agua. Al atravesar el intercambiador enfriador, el gas se somete a un proceso de refrigeración que reduce



significativamente su temperatura, disminuyendo así la capacidad del vapor de agua de permanecer en fase gaseosa. Como resultado, la humedad contenida se condensa y es separada del flujo principal mediante un sistema de drenaje de condensados. De este modo, el biogás que abandona la unidad lo hace en condiciones más secas y estables, lo que permite proteger los equipos posteriores del proceso, reducir riesgos de corrosión y mejorar la eficiencia de combustión en los motogeneradores.

- Marca: ANKA ENERJI
- Modelo: GK-700
- Caudal máximo de gas: 700 Nm³/h
- Presostatos de mínima y máxima presión de refrigerante
- Evaporador de placas de acero inoxidable
- Serpentín condensador de tubo de cobre y aletas de aluminio
- Valor aproximado: US\$ 3000

<https://ankaenerji.com/products/biogas-dryer-chiller-units>

- Filtro de partículas

Su función principal es la de retener las partículas más grandes de polvo y residuos pequeños arrastrados en la captación.



Figura 6.13: Filtro para la entrada del compresor

Fuente: <https://www.solbergmfg.com/es/collections/st-ct-series>

- Marca: SOLBERG
- Modelo: CT-850-251C
- Caudal máximo: 357 m³/h
- Parte superior de aluminio fundido resistente a la corrosión
- Vaso de acero al carbono con recubrimiento de polvo negro
- Valor aproximado: US\$ 600

<https://www.solbergmfg.com/es/products/ct-850-251c>

- Adsorbedor de h₂s

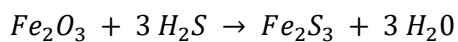
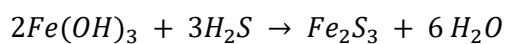


El sulfuro de hidrógeno es un gas presente en diferentes concentraciones en todo tipo de biogás y que daña los motores. La cantidad de sulfuro de hidrógeno en el gas varía según la materia prima y el contenido de sulfato inorgánico. En particular, en residuos con alto contenido proteico que contienen aminoácidos azufrados, el contenido de sulfuro de hidrógeno es elevado.

Durante la combustión, el H_2S se convierte en H_2SO_4 (ácido sulfúrico). Este ácido es extremadamente corrosivo y destruye el motor en muy poco tiempo. Por lo tanto, es absolutamente necesario eliminar el H_2S antes de la combustión.

Para llevar adelante la eliminación del H_2S se propone la utilización de lechos secos de pellets de óxidos férricos $Fe_2O_3/Fe(OH)_3$ para la adsorción del gas.

En este procedimiento, el sulfuro de hidrógeno es adsorbido en hidróxido de hierro (III) $Fe(OH)_3$ y/o óxido de hierro (III) Fe_2O_3 . Estos procesos corresponden a una desulfuración seca. Según las siguientes ecuaciones.



Las masas de óxido o hidróxido de hierro quedan aglomerada capa por capa en una torre desulfuradora, impregnados en lana de acero, chips de madera o pellets de madera.



Figura 6.14: Sistema de eliminación de sulfuro de hidrógeno
Fuente: <https://ankaenerji.com/products/hydrogen-sulphide-removal-systems>

- Marca: ANKA ENERJI
- Modelo: HSF-700
- Caudal máximo de gas: 700 Nm³/h
- Valor aproximado: US\$ 10.000

- **Remoción de siloxanos**



Este sistema debe remover por completo todas las impurezas contaminantes del gas. La corriente de gas pasará por el equipo BGAKC (BioGás AutoKleen Siloxane Removal System), el cual es un sistema de filtración a base de zeolitas que se instala en la línea de suministro del biogás; En condiciones normales, las unidades de filtro de siloxanos absorberán estos compuestos hasta 5 años antes de que requiera reemplazo. Éste a su vez cuenta con dos unidades filtrantes en paralelo que permiten la operación de una de ellas mientras se regenera la otra con aire caliente.



Figura 6.15: Sistema de remoción de siloxanos

Fuente: <https://norit.com/applications/biogas-rng/siloxane-removal>

- Fabricante: Parker Hiross
- Consumo: 20 kW/día
- Presión máxima: 0,4 bar
- Temperatura máxima: 40°C

- **Antorcha de llama cerrada:**

Se utiliza en aquellos casos que la planta de generación de energía saliera de servicio. El objetivo del equipo es quemar el gas para que este mismo no impacte de manera negativa en la atmósfera cuando no pueda ser aprovechado. En la antorcha de tipo “cerrada”, 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).



*Figura 6.16: Antorcha estática de tipo cerrada
Fuente: CONVECO SRL*

6.4. CÁLCULO DE LIXIVIADOS

El manejo adecuado y la preservación del medio ambiente exigen una gestión adecuada de los líquidos lixiviados que son generados en el Vertedero controlado de San Rafael.

La naturaleza de los líquidos lixiviados tiene dos orígenes principales:

1. Lixiviados producidos por la humedad propia de los residuos y la descomposición de la materia orgánica presente en los mismos.
2. Lixiviados provenientes de fuentes externas, principalmente del ingreso de aguas pluviales al relleno.

OBJETIVOS

En el presente informe se plantean como objetivos:

1. Estimar las cantidades anuales y mensuales de líquidos lixiviados que se generarán en el Vertedero Controlado de San Rafael
2. En función de los valores obtenidos diseñar un sistema adecuado de captación, extracción y gestión de estos líquidos.

Para el cálculo de lixiviados se va a utilizar el método suizo en donde la infiltración es igual a la precipitación, asumiendo que no hay aguas subterráneas y que la autoproducción de agua de los residuos es prácticamente nula. Entonces la precipitación media anual será la infiltración que se convierte en lixiviado, cuya ecuación es:

$$QL = (P - E) \cdot A \cdot Cf$$

Donde:

- **QL** = volumen de lixiviado generado (m³/año)
- **P** = precipitación anual (m/año). En el caso de nuestro proyecto se utilizó el valor de las precipitaciones del año 2024 en San Rafael.
- **E** = evaporación anual (m/año)
- **A** = superficie del relleno expuesta (m²). Para un cálculo preliminar de los primeros años de funcionamiento se propuso una superficie de 10 ha o 100000 m²



- **Cf** = coeficiente de infiltración que tiene como valores 0,1 como impermeable y 0,9 que sería expuesta dependiendo de la cobertura y compactación, en nuestro proyecto se usó 0,6 que es un valor propuesto.

A partir de los datos recopilados se realizó el cálculo de las cantidades totales de lixiviados generados por los residuos, con el análisis de los resultados obtenidos de la corrida del modelo, participando como variables en éste, el aporte de lixiviado por ingreso de aguas de lluvia y por la compactación y degradación de los residuos, fueron obtenidos los volúmenes de líquidos lixiviados a evacuar anualmente, que se presentan en la Siguiete Tabla.

Como la tasa de evaporación en la ciudad de San Rafael es alta, los lixiviados generados van a ser recirculados al Relleno como se desarrolló en el capítulo anterior. La columna de Ajuste externo hace referencia a que todos los lixiviados generados van a sufrir este proceso de recirculación.

Mes	Precipitación P (mm)	Evaporación E (mm)	Ajuste externo (m ³)	P - E (mm)	Lixiviado mensual (m ³)
Enero	48,80	35	17	13,80	1408
Febrero	44,80	35	16	9,80	1003
Marzo	33,80	30	12	3,80	395
Abril	27,60	25	10	2,60	272
Mayo	16,20	15	6	1,20	127
Junio	10,60	10	4	0,60	64
Julio	13,20	10	5	3,20	327
Agosto	13,80	10	5	3,80	388
Septiembre	21,70	15	8	6,70	683
Octubre	27,20	15	10	12,20	1239
Noviembre	30,20	25	11	5,20	835
Diciembre	33,60	30	12	3,60	875
TOTAL ANUAL	322				7616

Tabla 6.2: Generación de lixiviados
Fuente: Elaboración propia

Podemos observar que el mes de mayor producción de lixiviados es el mes de Enero, con un valor de 1408 m³. Esto nos indica que en un año con precipitaciones promedio en la ciudad de San Rafael vamos a tener una generación de lixiviados similar a la de la anterior tabla. Es importante destacar que los modelos de estimación de la generación de lixiviados empleados mundialmente han demostrado márgenes de error importantes en cuanto a los volúmenes generados y la generación real. De acuerdo a estudios hechos por Schroeder, se establece que para métodos de balance de agua los errores pueden variar del orden del 83% al 154%. Por su parte, Pellón plantea que tanto las precipitaciones y la humedad propia de los residuos sólidos son los indicadores más importantes a los efectos de estimar el volumen de lixiviados que se generan en los Vertederos Controlados. Por tanto, para el cálculo de la formación de lixiviados realizan un balance hidrológico en el vertedero, el cual tiene en cuenta la suma de todas las corrientes de aguas que entran en el mismo y la sustracción de las consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua.



En esta oportunidad no se utilizó ese método ya que no existen actualmente datos confiables acerca de las características de los residuos del municipio de San Rafael que permitan realizar una estimación más precisa.

La construcción del sistema de recolección de lixiviados fue especificada en el capítulo anterior. El espesor hidráulico del caño principal no debe ser menor a 30 cm, para tener una buena eficiencia de captación, mientras que los ramales secundarios deben ser de la mitad del caño principal.

Esto conducirá a un pozo de almacenamiento de lixiviados, de donde serán bombeados hacia la laguna de contención para su posterior infiltración en el vertedero, según se observa en el siguiente esquema.

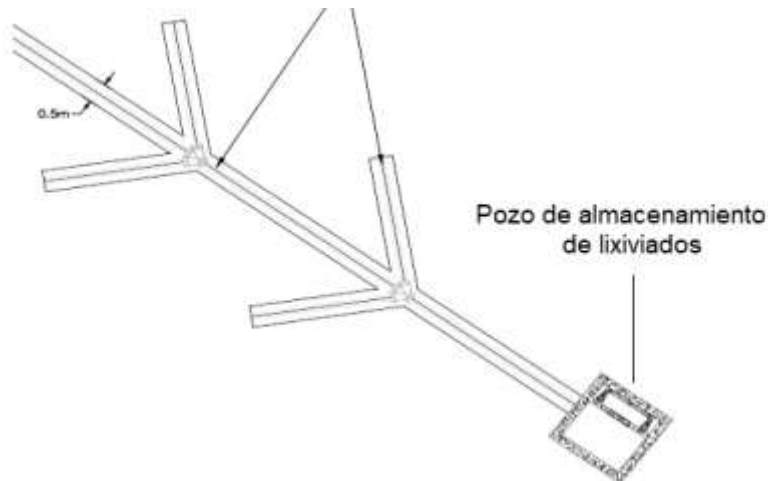


Figura 6.17: Conducción hacia el pozo de lixiviados

Fuente: Empresa de Servicios Públicos de Puerto Triunfo S.A. E.S.P /2018

6.4.1. Sistema de captación:

Para el cálculo de la dimensión de la tubería de lixiviados se van a usar los m³/h

$$\frac{7616 \text{ m}^3/\text{año}}{8760 \text{ h/año}} = 0.87 \text{ m}^3/\text{h} \text{ o } 0.23 \text{ l/s}$$

Este valor es muy bajo por lo que podemos suponer que la generación de lixiviados en el vertedero controlado será muy baja, sin embargo, las redes de recolección se deben colocar sobredimensionadas por una cuestión de incidencias en el vertedero. Como se vio en el capítulo anterior se colocarán cañerías ranuradas de material plástico, de aproximadamente 5" para los ramales secundarios y de 10" para el ramal principal.

Para el bombeo de estos lixiviados las bombas se deben colocar por duplicado, ya que si una falla la otra queda de respaldo para continuar con la operación.

Se sugieren los siguientes modelos:

Bomba Estercolera Sumergible con flotante incorporado - PE 150 Carignano

Características:

- Potencia - Polos: 1,5HP-2P
- Diámetro de salida [in]: 1,5"
- Presión máxima [m.c.a.]: 10 - 15
- Caudal máximo [m³/h]: 0 - 20
- Tensión: 380 V



Figura 6.18: Bomba sumergible

Fuente: Carignano

Para la recirculación de los lixiviados hacia el vertedero controlado:

Bomba superficial - BC 150 - Carignano

Características:

- Potencia - Polos: 1,5 HP- 2 HP
- Diámetro de salida [in]: 1"
- Diámetro de entrada [in]: 1,25"
- Presión máxima [m.c.a.]: 20 - 30
- Caudal máximo [m³/h]: 0 - 20



Figura 6.19: Bomba de recirculación de lixiviados

Fuente: Carignano

6.4.2 Cálculo de laguna de contención de lixiviados



El caudal máximo esperado por mes es de 1408 m^3 , como ya se dijo son valores que pueden modificarse todo el tiempo por diversos factores como clima, humedad en los residuos, aportes externos, etc.

Por lo que se decide construir una laguna para almacenar 3000 m^3 para evitar problemas en el futuro y tener un almacenamiento de agua en caso de que reduzca la humedad en el vertedero.

El tiempo de retención hidráulico no es un factor determinante, ya que, al ser recirculado al vertedero, no va a ser necesario calcularlo.

Si le damos una profundidad de 4 metros a la laguna el área sería:

$$A = V / h = 3000 \text{ m}^3 / 4 \text{ m} = 750 \text{ m}^2$$

Eso equivaldría a un rectángulo de $27.5\text{m} \times 27.5\text{m}$ o una laguna circular de 15.5 m de radio.

6.5. CÁLCULO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

En la Planta de Generación de Energía Eléctrica a partir de Biogás se realizan constantemente modificaciones en el sistema en base al ingreso de la materia prima, el cual se compone de varios gases donde el de mayor porcentaje de incidencia es el metano, para asegurar una cantidad constante de energía como producto final. El metano se obtiene en diversas proporciones, según el módulo de disposición del relleno y las condiciones que éste tenga, al momento de ser extraído. Principalmente, se controlan los porcentajes de ingreso del metano:

- Si se tiene 55-60% CH_4 , se necesitan 500 m^3 para generar 1MW
- Si se tiene 50-54% CH_4 , se necesitan 550 m^3 para generar 1MW
- Si se tiene 40-48% CH_4 , se necesitan 750 m^3 para generar 1MW

En este caso se cuenta con un caudal promedio de $300 \text{ m}^3/\text{h}$ lo que dará como energía generada $0,54 \text{ MW/h}$

Cuando el porcentaje de metano es bajo, el motor generador requiere un mayor caudal de biogás para alcanzar una potencia de salida de 1 MW, lo que implica operar a mayores revoluciones. Esta demanda incrementada de flujo genera un aumento en la presión de trabajo de la planta, forzando a los sistemas de impulsión (Blowers) a extraer el biogás con mayor intensidad desde los módulos de captación.

Este escenario resulta desfavorable, ya que el sistema de captación se ve exigido más allá de su capacidad óptima, impidiendo la adecuada formación de gases en las trincheras. Como consecuencia, se acelera el agotamiento de los frentes de captación, reduciendo la calidad del biogás producido y afectando directamente la eficiencia del proceso de valorización energética de los RSU.

Además, una baja concentración de metano no solo disminuye el rendimiento de los motores, sino que también incrementa los costos operativos y de mantenimiento, debido al desgaste acelerado de los equipos y la necesidad de ajustes más frecuentes.

Consideraciones sobre otros componentes del biogás

- **Dióxido de carbono (CO_2):** Su presencia debe mantenerse en un rango del 30 al 40%. Esta proporción es necesaria para garantizar una combustión estable y un flujo



constante en los motores. Un nivel adecuado de CO_2 contribuye al equilibrio térmico del sistema.

- **Oxígeno (O_2):** El contenido de oxígeno debe ser mínimo, idealmente cercano a 0%, y nunca superar el 2%. Un exceso de oxígeno puede generar sobrepresiones internas que comprometen la estabilidad del sistema, además de representar un riesgo para la seguridad operativa.

Sin embargo, la planta de purificación desarrollada en apartados anteriores está diseñada para garantizar una composición de biogás con un contenido de metano cercano al 50%. Este nivel se obtiene mediante etapas de absorción selectiva de CO_2 y eliminación de humedad, seguido de un pulido final que estabiliza la mezcla antes de su ingreso a los motores de generación. Al mantener una proporción de CH_4 óptima, se asegura un flujo de gas más uniforme, se reduce el esfuerzo mecánico de los Blowers y se maximiza la eficiencia térmica de los equipos. De este modo, la operación de la planta se vuelve más estable, con menores costos de mantenimiento y una mayor rentabilidad en la valorización energética de los RSU.

6.5.1. Equipos de la planta de generación eléctrica

Una vez determinado el caudal de biogás generado y la composición del mismo se procede a dimensionar la planta de generación eléctrica. La misma consta de motores de combustión interna diesel y generadores

Datos:

- Caudal de biogás disponible = $300 \text{ m}^3/\text{h}$ (ya purificado según tren diseñado).
- Contenido de metano = 50% → usando valor energético típico: 540 kW/h generados.
- Rendimiento eléctrico del motogenerador (η_e) supuesto para diseño: 38% (rango práctico 34–40%).
- Pérdidas parasitismo auxiliares (sopladores, bombas, controles): estimadas 10% de la potencia bruta (se considerará al final). → 54 kW/h
- Potencia eléctrica neta disponible: 486 kW/h

Para lograr satisfacer la producción de 540 kW/h se optó por colocar 2 motogeneradores en paralelo de 280 kW/h cada uno ofreciendo una potencia bruta instalada de 560 kW . Este sistema permite operar con 2 unidades en los años de máximos requerimientos y con una sola en los primeros años o en caso de que el otro motor se encuentre en mantenimiento lo cual proporciona una buena disponibilidad a la planta. Los motores van acoplados directamente a un generador síncrono mediante un acople elástico. El generador convierte la energía mecánica del motor en energía eléctrica en corriente alterna. En estos proyectos se suelen usar generadores síncronos trifásicos, refrigerados por aire o agua, con factor de potencia nominal 0,8–0,9. La tensión de salida del generador será de 400/440 V trifásico y luego se elevará la tensión con un transformador.



Figura 6.20: Motor de combustión interna

Fuente: https://es.made-in-china.com/co_snail-truck/product_Discounted-Low-High-Quality-Fuel-Consumption-371HP-375HP-380HP-420HP-Internal-Combustion-Engine-Used-Engine_yuseoruuog.html

- Marca: SinoTruck
- Valor aproximado: US\$ 20.000



CAPITULO 7

GESTIÓN DE LA ORGANIZACIÓN

7.1 INTRODUCCIÓN

La gestión de una planta de producción de biogás constituye un aspecto fundamental para garantizar la operación eficiente, segura y sostenible del proceso. Dado que se trata de una instalación industrial vinculada al tratamiento de residuos sólidos urbanos, la organización de los recursos humanos adquiere una relevancia estratégica, ya que de ella depende tanto el cumplimiento de los objetivos productivos como la observancia de las normativas ambientales y de seguridad vigentes.

En este sentido, la gestión abarca la definición de una estructura organizativa clara, la asignación adecuada del personal en cada área de trabajo, la implementación de protocolos de seguridad y el aseguramiento de la continuidad operativa mediante una distribución eficiente de turnos y responsabilidades.

Asimismo, una correcta gestión del personal y de los recursos administrativos contribuye no solo a optimizar el rendimiento de la planta, sino también a fortalecer la trazabilidad del proceso y la confianza de la comunidad en el servicio prestado, alineándose con principios de sostenibilidad y responsabilidad social.

7.2 PRINCIPIOS DE ORGANIZACIÓN

Para que una organización tenga una estructura sólida hay que tener en cuenta los siguientes principios generales:

- Separación de funciones de la empresa.
- Establecer las subdivisiones lógicas en la línea de trabajo de esas funciones para que no se solapen o choquen y de tal modo que ningún individuo reciba órdenes directas de más de una persona.
- Especificación neta de cada tarea directiva, en todo el orden sucesivo de los diferentes niveles de la dirección, con el fin de evitar la responsabilidad compartida.
- Delegación apropiada y adecuada de la autoridad a cada miembro en el orden
- Directivo de su sección, de acuerdo al nivel que ocupa en la dirección.
- Selección para cada cargo en el orden selectivo y por cada nivel de éste del individuo más apropiado y conveniente.

7.3 ORGANIGRAMA

El organigrama de la planta de producción de biogás se diseña con el objetivo de establecer una estructura jerárquica y funcional que permita coordinar de manera eficiente los procesos productivos, de seguridad y de control ambiental. La organización se fundamenta en una distribución simple, con áreas bien definidas, que aseguran el cumplimiento de los objetivos estratégicos de la planta.

Estructura jerárquica:

1. Gerencia de Planta



- Responsable general de la operación y de la coordinación entre todas las áreas.

2. Áreas Operativas

- Planta de Separación: encargado de planta, operarios de clasificación, personal de recepción de RSU.
- Vertedero: operarios de maquinaria, encargado de control ambiental.
- Planta de Biogás: técnicos de operación (con rotación por turnos), encargado de monitoreo ambiental.
- Planta de Generación: operadores de generadores y técnicos electromecánicos.

3. Áreas de Apoyo y Control

- Seguridad e Higiene: responsable de protocolos de seguridad industrial.
- Logística: apoyo en transporte, insumos y coordinación de materiales.

4. Administración

- Gerente administrativo, contador, apoyo logístico y personal de seguridad/higiene.

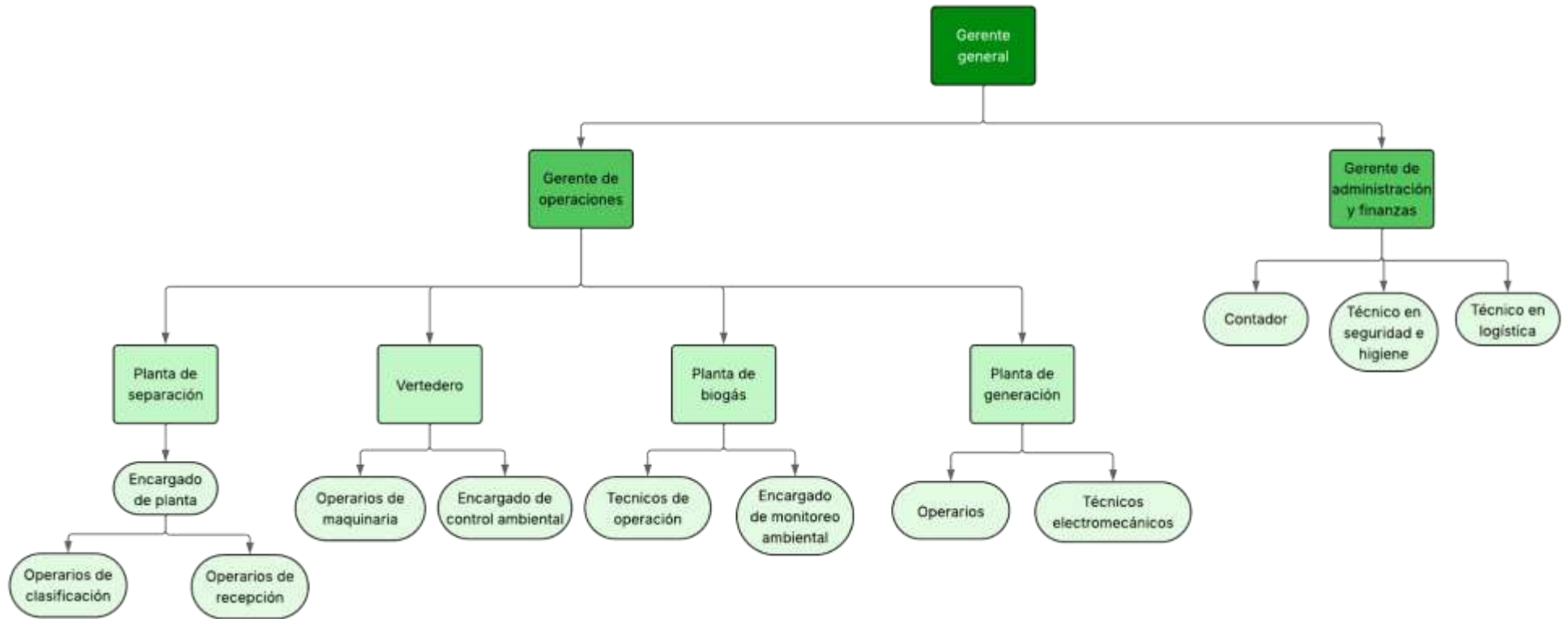


Figura 7.1: Organigrama del proyecto
Fuente: *Elaboración Propia*



7.4 DISTRIBUCIÓN DEL PERSONAL

A continuación, se detalla el cálculo del personal necesario para cada una de las áreas del proyecto. A su vez, también se han descrito las tareas y actividades que realiza cada uno de los empleados.

Categorías	Personal por turno			TOTAL
	1° Turno	2° Turno	3° Turno	
Planta de separación				
Encargado de planta	1	0	0	1
Operarios de clasificación	8	0	0	8
Recepción de RSU	2	0	0	2
Vertedero				
Operarios de maquinaria	3	0	0	3
Control ambiental	1	0	0	1
Planta de biogás				
Técnicos de operación	2	2	2	6
Encargado de monitoreo ambiental	1	0	0	1
Planta de generación eléctrica				
Operadores	2	2	2	6
Técnico electromecánico	1	1	1	3
Administración				
Gerente	1	0	0	1
Subgerentes	2	0	0	2
Contador	1	0	0	1
Personal de higiene y seguridad	1	0	0	1
Personal de logística	1	0	0	1
TOTAL	27	5	5	37

Tabla 7.1: Distribución del personal
Fuente: elaboración propia

La tabla de distribución de personal presenta la organización del recurso humano requerido para la operación integral del sistema, distribuido entre las diferentes áreas que componen el proyecto: planta de separación, vertedero, planta de biogás, planta de generación eléctrica y administración. En total, se prevé una plantilla de 35 trabajadores, distribuidos en tres turnos para garantizar la continuidad operativa del proceso.

En la **planta de separación** se concentran **11 operarios y supervisores**. Sus principales responsabilidades abarcan la recepción de los camiones recolectores, el descargue de los residuos sólidos urbanos (RSU) y la clasificación manual y mecánica de los materiales valorizables (plásticos, metales, cartón, vidrio). Los operarios se encargan de alimentar las cintas transportadoras, separar materiales según categorías y asegurar que los residuos peligrosos o no valorizables sean retirados para su disposición segura. El encargado de planta supervisa el correcto funcionamiento de las líneas de clasificación, coordina turnos y vela por el cumplimiento de los estándares de calidad y seguridad en el proceso.



En el **vertedero** trabajan **4 operarios por turno**, con un perfil orientado a la operación de maquinaria pesada (palas cargadoras, topadoras, compactadoras). Sus tareas incluyen la formación de celdas diarias, la compactación de los residuos dispuestos y la colocación de capas de cobertura con material inerte para minimizar olores y dispersión de vectores. Un operario adicional cumple funciones de control ambiental, realizando inspecciones en sitio, verificando niveles de lixiviados, emisión de gases y asegurando que se cumpla con las normativas ambientales y de seguridad en la disposición final.

La **planta de biogás** requiere de **7 trabajadores especializados**. Los técnicos de operación son responsables de monitorear y mantener en funcionamiento el sistema de captación del biogás desde los pozos del relleno, su conducción mediante tuberías y la purificación del gas (deshumidificación, desulfurización y eliminación de impurezas). Su labor implica el registro de caudales, presión y composición del gas, así como la verificación de alarmas y la ejecución de tareas de mantenimiento preventivo en compresores, sopladores y equipos auxiliares. El encargado de monitoreo ambiental complementa estas funciones con la supervisión de emisiones fugitivas, el cumplimiento de límites normativos y la elaboración de reportes de control ambiental.

En la **planta de generación eléctrica** se asignan 9 técnicos y operadores por turno. Los operadores de motogeneradores se encargan de arrancar, supervisar y detener los equipos según la demanda energética, controlando parámetros como temperatura, presión de aceite, potencia entregada y factor de carga. Los técnicos electromecánicos realizan el mantenimiento de los motores a biogás, tableros eléctricos, transformadores y sistemas de media tensión, garantizando la continuidad de la producción y evitando fallas no programadas. Además, este equipo es responsable de coordinar las maniobras de conexión y desconexión con la red eléctrica, así como del seguimiento de indicadores de eficiencia energética.

Finalmente, el área de **administración** está compuesta por **4 personas** que cumplen funciones transversales a toda la operación. La gerencia administrativa coordina la planificación de recursos humanos y materiales, asegurando la viabilidad económica de la planta. El contador lleva adelante la gestión contable, impositiva y financiera, garantizando transparencia en los registros. El responsable de higiene y seguridad diseña e implementa protocolos de seguridad industrial, capacita al personal y controla el uso de equipos de protección personal (EPP). Por último, el encargado de logística organiza el abastecimiento de insumos, la contratación de servicios externos y el soporte de transporte necesario para el normal desarrollo de las actividades operativas.

7.5 FICHAS DEL PERSONAL

Gerente General

FICHA DE FUNCION	
AREA	Gerencia General
SECTOR	Gerencia General
FUNCION	Gerente General
SUPERVISA A	Gerente de operaciones y administración y finanzas
CATEGORIA	Fuera del CCT
DEBERES	



Liderar gestión estratégica
Liderar la formulación y aplicación del plan de negocios
Alinear a las distintas Gerencias
Definir políticas generales de administración
Desarrollar y mantener relaciones con los distintos organismos que rodean al proyecto
PERFIL DEL PUESTO
Profesión en áreas administrativas o afines
Expresión oral y escrita en idioma Inglés
Búsqueda y cierre de negocios
Capacidad de liderazgo

Gerente de Operaciones

FICHA DE FUNCION	
AREA	Gerencia de Operaciones
SECTOR	Gerencia de Operaciones
FUNCION	Gerente de Operaciones
SUPERVISADO POR	Gerente General
SUPERVISA A	Planta de Generación de biogás y eléctrica, Vertedero y Planta de Separación
REPORTA A	Gerente General
CATEGORIA	Fuera del CCT
DEBERES	
Planificar y supervisar el trabajo de los distintos operarios	
Supervisar las distintas operaciones en las distintas plantas	
Gestionar recursos humanos	
Mejorar eficiencia en el proceso	
Supervisar la entrada y salida de camiones hacia el vertedero	
PERFIL DEL PUESTO	
Ingeniero Químico o Industrial	
Capacidad de análisis	
Capacidad de trabajo en equipo	
Capacidad de liderazgo	

Gerente de administración y finanzas

FICHA DE FUNCION	
AREA	Administración y finanzas
SECTOR	Administración y finanzas
FUNCION	Gerente de Administración y finanzas
SUPERVISADO POR	Gerente General
SUPERVISA A	Contador, Técnico en seguridad e higiene, Técnico logístico
REPORTA A	Gerente General
CATEGORIA	Fuera del CCT
DEBERES	
Programar, organizar, dirigir, controlar y supervisar las operaciones del personal de finanzas	
Recibir y guiar por toda la planta al técnico en seguridad e higiene	



Gestionar recursos económicos
Proporcionar los balances económicos al Gerente General
Supervisar la logística del proyecto
PERFIL DEL PUESTO
Ingeniero Químico o Industrial
Capacidad de análisis
Capacidad de trabajo en equipo
Capacidad de liderazgo

Encargado de planta de separación

FICHA DE FUNCION	
AREA	Gerencia de Operaciones
SECTOR	Planta de separación
FUNCION	Encargado de planta de separación
SUPERVISADO POR	Gerente de Operaciones
SUPERVISA A	Operarios de planta
REPORTA A	Gerente de Operaciones
CATEGORIA	Fuera del CCT
DEBERES	
Planificar y supervisar el trabajo de los distintos operarios	
Supervisar el ingreso de los camiones a la planta	
Gestionar recursos humanos	
Mejorar eficiencia en el proceso	
Controlar que al vertedero entre solo materia orgánica	
PERFIL DEL PUESTO	
Técnico en procesos industriales	
Habilidades en optimización	
Capacidad de trabajo en equipo	
Capacidad de liderazgo	

Encargado de planta de biogás

FICHA DE FUNCION	
AREA	Gerencia de Operaciones
SECTOR	Planta de biogás
FUNCION	Encargado de planta de biogás
SUPERVISADO POR	Gerente de Operaciones
SUPERVISA A	Operarios de planta
REPORTA A	Gerente de Operaciones
CATEGORIA	Fuera del CCT
DEBERES	
Monitorear y mantener en funcionamiento el sistema de captación de biogás	
Purificación correcta del biogás	
Mantenimiento preventivo en equipos críticos	
Control de la llama	



Control de caudal de biogás
PERFIL DEL PUESTO
Técnico Químico
Habilidades en optimización y mejora continua
Capacidad de trabajo en equipo
Capacidad de liderazgo

Encargado de operaciones en vertedero

FICHA DE FUNCION	
AREA	Gerencia de Operaciones
SECTOR	Vertedero
FUNCION	Encargado de operaciones en vertedero y control ambiental
SUPERVISADO POR	Gerente de Operaciones
SUPERVISA A	Operarios de maquina
REPORTA A	Gerente de Operaciones
CATEGORIA	Fuera del CCT
DEBERES	
Planificar y supervisar el trabajo en el vertedero	
Supervisar las condiciones de los residuos a la entrada del vertedero	
Gestionar la construcción de las celdas diarias	
Supervisar la colocación de la cobertura diaria	
Realizar inspecciones en el sitio: niveles de lixiviados y emisión de gases	
PERFIL DEL PUESTO	
Técnico ambiental	
Habilidades en optimización de procesos	
Capacidad de trabajo en equipo	
Capacidad de comunicación	

Encargado de planta de generación eléctrica

FICHA DE FUNCION	
AREA	Gerencia de Operaciones
SECTOR	Planta de Generación
FUNCION	Encargado de planta de generación eléctrica
SUPERVISADO POR	Gerente de Operaciones
SUPERVISA A	Operarios de planta
REPORTA A	Gerente de Operaciones
CATEGORIA	Fuera del CCT
DEBERES	
Verificar el funcionamiento correcto de moto generadores	
Controlar la demanda eléctrica	
Realizar el mantenimiento a moto generadores	
Proponer mejoras en el proceso de purificación y de distribución de energía eléctrica	
Supervisar y gestionar la seguridad de las instalaciones	
PERFIL DEL PUESTO	



Ingeniero electromecánico o técnico electromecánico
Capacitaciones en mejora continua
Capacidad de trabajo en equipo
Capacidad de liderazgo

Técnico en seguridad e higiene

FICHA DE FUNCION	
AREA	Administración y finanzas
SECTOR	Técnico en seguridad e higiene
FUNCION	Verificar que se cumplan las normas ISO y de seguridad en el vertedero
SUPERVISADO POR	Gerente de administración y Finanzas
SUPERVISA A	Todos los operarios de las plantas
REPORTA A	Gerente de administración y Finanzas
CATEGORIA	Fuera del CCT
DEBERES	
Cumplimiento de normas de seguridad	
Proveer y verificar el uso de los elementos de protección personal (EPP)	
Cumplimiento de normas ISO	
Dar capacitación al personal	
Diseñar protocolos de seguridad industrial	
PERFIL DEL PUESTO	
Técnico en seguridad e higiene	
Capacidad comunicativa	
Conocimientos de Normas ISO 9001- 14001 entre otras	

Técnico en logística

FICHA DE FUNCION	
AREA	Administración y finanzas
SECTOR	Técnico en logística
FUNCION	Desarrollo normal de todas las operaciones en la empresa
SUPERVISADO POR	Gerente de administración y finanzas
SUPERVISA A	Todo el personal de la planta
REPORTA A	Gerente de administración y finanzas
CATEGORIA	Fuera del CCT
DEBERES	
Abastecimiento de insumos	
Contratación de servicios externos	
Diagramar programa de relleno diaria	
Optimizar el tiempo de trabajo	
Supervisar y gestionar la seguridad de las instalaciones	
PERFIL DEL PUESTO	
Técnico en logística	
Capacitaciones en mejora continua	
Capacidad de trabajo en equipo	
Capacidad de liderazgo	



Contador

FICHA DE FUNCION	
AREA	Administración y finanzas
SECTOR	Compras y Ventas
FUNCION	Contador
SUPERVISADO POR	Gerente de administración y finanzas
SUPERVISA A	Personal administrativo
REPORTA A	Gerente de administración y finanzas
CATEGORIA	Fuera del CCT
DEBERES	
Gestión contable, impositiva y financiera de la empresa	
Presentar balances mensuales y anuales del estado de la empresa	
Pago de sueldos y compras de material de oficina	
Confirmación de ventas de reciclables	
Verificar precio de la energía	
PERFIL DEL PUESTO	
Contador	
Manejo de paquete office	
Analizador e interpretador de información financiera	
Trabajo en equipo	

7.6 NORMAS DE SEGURIDAD Y PREVENCIÓN DE ACCIDENTES

La seguridad en la operación de la planta constituye un aspecto prioritario en la gestión del proyecto, dado que las actividades desarrolladas involucran riesgos asociados a la manipulación de residuos sólidos urbanos, la generación y purificación de biogás, el uso de maquinaria pesada y la operación de sistemas eléctricos de media tensión.

Para mitigar dichos riesgos se implementa un programa integral de seguridad y prevención de accidentes, basado en la legislación nacional vigente en materia de higiene y seguridad laboral, así como en normativas ambientales provinciales. Este programa se estructura en los siguientes ejes principales:

7.6.1 Elementos de protección personal (epp)

El uso de EPP será obligatorio y diferenciado por área de trabajo:

- Planta de separación: guantes resistentes a cortes, mascarillas anti polvo, calzado de seguridad y ropa de trabajo.
- Vertedero y maquinaria pesada: casco, chaleco refractivo, protección auditiva, botas con puntera de acero y cinturón de seguridad en cabinas.
- Planta de biogás y generación: protección respiratoria (carbón activado para vapores), detector personal de gases, guantes dieléctricos, lentes de seguridad.

7.6.2 Seguridad en el manejo de biogás



- Instalación de detectores fijos de CH_4 y H_2S con alarmas sonoras y visuales.
- Ventilación forzada en áreas cerradas o de riesgo de acumulación.
- Sistemas de alivio y antorcha de seguridad para el quemado de excedentes.
- Protocolo de acceso restringido a la planta de purificación y moto generadores.

7.6.3 Seguridad en instalaciones eléctricas y moto generadores

- Procedimientos de bloqueo y etiquetado (LOTO) durante trabajos de mantenimiento.
- Tableros eléctricos con protecciones diferenciales y disyuntores calibrados.
- Sistemas de puesta a tierra y pararrayos en áreas críticas.
- Capacitación específica de operadores en maniobras con media tensión.

7.6.4 Operación de maquinaria pesada

- Capacitación y licencia específica para operadores.
- Rutas internas señalizadas y delimitación de zonas de carga/descarga.
- Mantenimiento preventivo documentado de topadoras, cargadoras y excavadoras.
- Prohibición de circulación de personal a pie en zonas de maniobra.

7.6.5 Manejo de residuos y lixiviados

- Protocolos de manipulación segura de lixiviados con EPP impermeable.
- Señalización de pozos, lagunas y estaciones de bombeo.
- Control periódico de calidad de agua y suelo en áreas circundantes.

7.6.6 Plan de emergencias y respuesta a incidentes

- Plan de evacuación con puntos de encuentro seguros.
- Brigadas internas capacitadas en control de incendios, rescate y primeros auxilios.
- Simulacros anuales de incendio, fuga de gas y accidente en maquinaria.
- Coordinación con bomberos, policía y hospital local.

7.6.7 Capacitación y cultura preventiva

La seguridad se refuerza mediante un programa continuo de capacitación, que incluye:

- Inducción inicial para todo el personal antes de ingresar a planta.
- Cursos periódicos en seguridad laboral, manipulación de biogás y sustancias peligrosas, uso de EPP y primeros auxilios.
- Talleres prácticos sobre manejo de extintores, rescate en espacios confinados y control de derrames.
- Registro y evaluación de incidentes para implementar acciones correctivas.



CAPITULO 8

ASPECTOS LEGALES Y NORMATIVOS

8.1. INTRODUCCIÓN

Para llevar a cabo cualquier tipo de actividad que genere o demande interacciones entre diferentes grupos de interés debe estar sujeto a ciertas normas que regulen el comportamiento de las partes que intervienen en ella. Estas normas sirven para sistematizar los derechos y obligaciones que va a tener cada uno de los miembros componentes de la sociedad.

La factibilidad de un proyecto no puede analizarse únicamente desde el aspecto económico. Ya que, si no se apega a las normas legales que van a regir la actividad en el lugar en el cual se lleve a cabo el proyecto, no podrá realizarse por mayor rentabilidad que pueda presentar.

Todas las etapas de análisis, planificación, desarrollo y finalización del proyecto, deben atender a todos los aspectos legales pertinentes. Es por ello, que, como se dijo en el capítulo 3 “Localización” es uno de los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de determinar la ubicación del proyecto.

Por lo expuesto anteriormente, en el siguiente capítulo se abordarán los distintos aspectos normativos aplicables a este proyecto en base al tipo de actividad y la localización seleccionada.

8.2. MARCO LEGAL NACIONAL

El manejo de residuos sólidos urbanos (RSU), y por ende el diseño y operación de rellenos sanitarios, está regulado a nivel nacional y provincial. Estas normativas establecen los estándares mínimos que deben cumplirse para proteger el ambiente y la salud pública. Las principales leyes que atraviesan nuestro proyecto son:

De la Constitución Nacional

En su Art. 41 establece el derecho de todo habitante del país a gozar de un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano y que permita el desarrollo de actividades productivas en el presente sin comprometer las necesidades de generaciones futuras.

El art. 124 de la Constitución Nacional establece que corresponde a las provincias el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio. Debe interpretarse que el dominio de los recursos naturales corresponde a la Nación o a las provincias según el territorio en que los mismos se encuentren.

Ley General del Ambiente N° 25.675/2002:

Esta ley establece los presupuestos mínimos para el logro de una gestión sustentable y adecuada del ambiente, la preservación y protección de la diversidad biológica y la implementación del desarrollo sustentable. Principios de la política ambiental. Presupuesto mínimo. Competencia judicial. Instrumentos de política y gestión. Ordenamiento ambiental. Evaluación de impacto ambiental. Educación e información. Participación ciudadana. Seguro ambiental y fondo de restauración. Sistema Federal Ambiental. Ratificación de acuerdos federales. Autogestión. Daño ambiental. Fondo de Compensación Ambiental.



Ley Nacional N° 25.916/2004 de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental para la Gestión Integral de Residuos Domiciliarios:

Esta ley establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para la gestión integral de residuos domiciliarios. Disposiciones generales. Autoridades competentes. Generación y Disposición inicial. Recolección y Transporte. Tratamiento, Transferencia y Disposición final. Coordinación interjurisdiccional. Autoridad de aplicación. Infracciones y sanciones. Disposiciones complementarias.

Ley Nacional N° 24.051/1991 Ley de Residuos Peligrosos:

Esta Ley establece el régimen legal aplicable en materia de generación, transporte, tratamiento y disposición de residuos peligrosos. Responsabilidades. Infracciones y sanciones. Régimen penal. Autoridad de Aplicación. Disposiciones Complementarias.

Ley Nacional N° 25.612/2002 de Gestión Integral de Residuos Industriales y de actividades de servicios.

Esta ley establece los presupuestos mínimos de protección ambiental sobre la gestión integral de residuos de origen industrial y de actividades de servicio, que sean generados en todo el territorio nacional y derivados de procesos industriales o de actividades de servicios. Niveles de riesgo. Generadores. Tecnologías. Registros. Manifiesto. Transportistas. Plantas de tratamiento y disposición final. Responsabilidad civil. Responsabilidad administrativa. Jurisdicción. Autoridad de aplicación. Disposiciones complementarias.

8.3. MARCO LEGAL PROVINCIAL

La provincia de Mendoza cuenta con su propia legislación ambiental que complementa y, en algunos casos, puede ser más exigente que la nacional.

Ley Provincial N° 5.961/1992 de Preservación del Medio Ambiente:

- Es la ley marco ambiental de la provincia. Establece la obligatoriedad de la EIA para obras y actividades susceptibles de degradar el ambiente, entre las que se encuentran los sitios de disposición final de residuos.

Ley Provincial de adhesión N° 5917/1992 - Decreto reglamentario N° 2625:

- Esta ley establece normas para la gestión de residuos peligrosos en la provincia, alineándose con la legislación nacional. Es importante destacar que la Ley 24.051 es la primera normativa de carácter federal sobre residuos peligrosos en Argentina. La adhesión de Mendoza a esta ley a través de la Ley 5970 demuestra el compromiso de la provincia con la protección del medio ambiente y la salud de sus habitantes.

Decreto Reglamentario N° 2.109/94 (Reglamentario de la Ley 5.961):

- Este decreto detalla los procedimientos para la EIA y establece categorías de proyectos según su potencial impacto. Es probable que un relleno sanitario caiga en una categoría que requiera un estudio de impacto ambiental detallado. También puede contener especificaciones sobre el contenido mínimo de los estudios de impacto, incluyendo aspectos de manejo de efluentes.



Ley Provincial N° 8.051/2009 de Ordenamiento Territorial y Usos del Suelo:

- Si bien no trata directamente sobre efluentes, esta ley es crucial porque define dónde se pueden localizar este tipo de infraestructuras (rellenos sanitarios). La ubicación del relleno puede influir en las tecnologías de manejo de efluentes (por ejemplo, la cercanía a cuerpos de agua, áreas urbanas, etc.).

Ley Provincial N° 1.079/1934 Ley orgánica de Municipalidades:

- La Ley Orgánica de Municipalidades de Mendoza es la Ley, la cual regula la organización y funcionamiento de los municipios en la provincia. Esta ley establece las normas sobre la creación, autonomía, competencias y régimen económico de los municipios, así como sus relaciones con otras entidades estatales y privadas. Recientemente, se han impulsado modificaciones a esta ley, como la limitación de la reelección de concejales y la actualización de artículos obsoletos.

Resoluciones Específicas de la Secretaría de Ambiente y Ordenamiento Territorial de Mendoza y del Departamento General de Irrigación (DGI):

- Secretaría de Ambiente: Puede haber emitido resoluciones o disposiciones técnicas específicas para el diseño y operación de rellenos sanitarios en la provincia, incluyendo requisitos para el monitoreo y control de biogás y la gestión de lixiviados (calidad de efluentes antes del vuelco, por ejemplo).
- Departamento General de Irrigación (DGI): Este organismo tiene una incumbencia fundamental en Mendoza debido a la importancia del recurso hídrico. Si los lixiviados tratados se van a volcar a un cuerpo de agua superficial o subterráneo, o si se van a reutilizar para riego (lo cual es menos común para lixiviados crudos o parcialmente tratados, pero podría ser una línea de investigación para tu proyecto con tratamientos avanzados), el DGI establecerá los límites de calidad y las condiciones para dicho vuelco o reutilización. La Ley de Aguas de Mendoza será un marco de referencia aquí.

8.4. MARCO LEGAL MUNICIPAL

- Ordenanza 3839/89 - Municipalidad de San Rafael - Prevención y control de la contaminación ambiental
- Ordenanza 6852 - Evaluación de Impacto Ambiental Municipal
- El ordenamiento territorial en San Rafael, Mendoza, se rige por la Ley Provincial 8999 y el Plan Provincial de Ordenamiento Territorial, que establece lineamientos para cada municipio de la provincia. San Rafael, a su vez, cuenta con su propio Plan Municipal de Ordenamiento Territorial, aprobado mediante la Ordenanza Municipal. Este plan se elabora en base a la ley provincial y busca regular el uso y ocupación del suelo en el municipio.

Manera en que Afectan al Proyecto:

- Definición de Objetivos y Alcance: Las normativas te obligan a diseñar sistemas de recuperación de gases que minimicen las emisiones de gases de efecto invernadero y de malos olores agregando también sistemas de tratamiento de lixiviados que protejan la calidad del suelo y el agua.
- Selección de Tecnologías: Se deben elegir tecnologías que no solo sean eficientes, sino que también permitan cumplir con los límites y estándares establecidos en la legislación.



- Diseño de Infraestructura: La necesidad de impermeabilización, sistemas de captación de gases, plantas de tratamiento de lixiviados, y sistemas de monitoreo, todo ello deriva de los requisitos normativos.
- Plan de Monitoreo: El proyecto deberá incluir un plan de monitoreo detallado para gases (composición, caudal, emisiones) y lixiviados (caudal, pH, DQO, DBO5, metales pesados, etc.), según lo exijan las regulaciones.
- Análisis de Riesgo y Medidas de Mitigación: Hay que identificar los riesgos asociados a la generación y manejo de gases (explosividad, toxicidad, olores) y lixiviados (contaminación) y proponer medidas para mitigarlos, en línea con los requisitos de las EIA.
- Consideraciones Económicas: El cumplimiento normativo tiene costos asociados (inversión inicial, operación, mantenimiento, monitoreo).
- Cierre y Post-Cierre: Las obligaciones legales se extienden más allá de la vida útil operativa del relleno. El proyecto considera las estrategias de manejo de gases y lixiviados se sigan haciendo aun cuando no esté operativo.



CAPITULO 9

EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIAL

9.1. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de este tipo de proyectos, el análisis de los impactos ambientales constituye una etapa fundamental para garantizar que los procesos propuestos sean técnica, económica y ambientalmente viables. La creciente conciencia social y normativa sobre la preservación del medio ambiente ha impulsado la necesidad de incorporar, desde la fase de diseño, herramientas que permitan identificar, cuantificar y mitigar los posibles efectos negativos sobre el entorno.

El estudio y evaluación de impactos ambientales (EIA) busca prever las alteraciones que podría generar el proyecto sobre los componentes físicos, bióticos y socioeconómicos, tanto durante su construcción como en su operación y cierre. Este análisis no solo cumple con los requisitos legales vigentes, sino que también aporta criterios para optimizar el uso de recursos, prevenir la contaminación y promover el desarrollo sostenible.

En el siguiente capítulo, se hará la evaluación de impactos ambientales. Se centrará en identificar las interacciones entre las actividades inherentes al proyecto y el medio receptor. Asimismo, se propondrán medidas de prevención, mitigación y compensación orientadas a minimizar los impactos adversos y potenciar los efectos positivos, asegurando que el proyecto se ejecute bajo parámetros de responsabilidad ambiental y social.

Se entiende por impacto ambiental cualquier alteración, positiva o negativa, que una acción, obra o proyecto produce sobre el medio ambiente, afectando directa o indirectamente a sus componentes físicos (aire, agua, suelo), bióticos (flora, fauna, ecosistemas) o socioeconómicos (salud, empleo, calidad de vida). Estos impactos pueden manifestarse en diferentes magnitudes, duraciones y escalas espaciales, y pueden ser reversibles o irreversibles.

- **Impactos positivos:** Son aquellos que generan mejoras o beneficios en el medio ambiente o en las condiciones socioeconómicas de una comunidad, pueden fortalecerse mediante medidas que potencien su alcance y duración.
- **Impactos negativos:** Son los que provocan deterioro o perjuicio a alguno de los componentes del medio ambiente o a las condiciones de vida de la población, sí pueden mejorarse o reducirse mediante la implementación de acciones preventivas, correctivas o de mitigación.

En el marco de este proyecto, el análisis de los impactos ambientales busca no solo identificar y evaluar estos efectos, sino también proponer estrategias para maximizar los impactos positivos y minimizar los negativos, contribuyendo a la sostenibilidad del diseño y operación del proceso.

9.2. IMPACTOS SOCIOECONOMICOS



La construcción y operación de un relleno sanitario con planta de producción de biogás en el departamento de San Rafael representa una estrategia integral con beneficios significativos tanto en el plano económico como en el social. Este tipo de proyectos permiten transformar la problemática de la disposición de residuos sólidos urbanos (RSU) en una oportunidad para el desarrollo sustentable a largo plazo, al valorizar la fracción orgánica de los residuos como fuente de energía renovable.

Desde el punto de vista económico, uno de los impactos más relevantes es la generación de energía renovable a partir del biogás. Al capturar el metano proveniente de la descomposición anaerobia de la materia orgánica en el relleno sanitario, es posible aprovechar este recurso para la generación de electricidad o calor, reduciendo así la dependencia local de combustibles fósiles. Esta energía será inyectada a la red eléctrica, generando ingresos adicionales y posicionando a San Rafael como productor de energía limpia.

Además, este tipo de infraestructura también genera empleo, tanto en la etapa de construcción como durante su operación. Se estima que la planta podrá generar entre 15 y 25 empleos directos permanentes, además de empleos indirectos en sectores relacionados, como transporte, reciclaje, mantenimiento de equipos y logística.

Otro beneficio económico significativo es el impulso a la **economía circular**. La planta de separación manual previa al ingreso al relleno permitirá recuperar una parte importante de materiales reciclables, como cartón, plásticos y metales, los cuales podrán ser comercializados por cooperativas o pymes locales. Esto dinamiza sectores productivos alternativos y fomenta la valorización de los residuos, transformándolos en insumos para nuevas cadenas de valor.

En el plano social, el proyecto contribuye notablemente a mejorar la salud pública. La erradicación de basurales a cielo abierto reduce los riesgos asociados a la proliferación de vectores de enfermedades, como roedores, moscas y mosquitos, además de disminuir los focos de contaminación del suelo y el agua subterránea por lixiviados sin tratamiento. La captación y tratamiento del biogás también mitiga la emisión de gases contaminantes y olores molestos, lo que mejora la calidad de vida de las comunidades aledañas al predio.

A su vez, el proyecto puede convertirse en una herramienta clave para la educación ambiental. La incorporación de campañas de concientización y programas de separación en origen permitirá fortalecer el vínculo entre los ciudadanos y la gestión de los residuos que generan. Esto favorece una mayor participación de la comunidad en iniciativas ambientales y promueve una cultura de responsabilidad compartida.

Otro impacto social relevante es la posibilidad de formalizar el trabajo de recicladores informales que actualmente desarrollan su actividad en condiciones precarias. A través de su inclusión en el sistema como operarios de planta o integrantes de cooperativas de clasificación, podrán acceder a condiciones laborales dignas, con salario estable, cobertura social y seguridad en el trabajo. Esto contribuye a la inclusión social y a la reducción de desigualdades.

Por último, la implementación de tecnologías asociadas al biogás y la valorización de residuos brinda una oportunidad para el desarrollo técnico y profesional a nivel local. El proyecto permitirá la capacitación de mano de obra especializada en energías renovables, gestión



ambiental y operación de plantas industriales, creando nuevas oportunidades para jóvenes técnicos e ingenieros del departamento.

9.2.1 Educación ambiental

La educación ambiental es un campo de intervención político pedagógica que impulsa procesos educativos integrales orientados a la construcción de una racionalidad ambiental. En ese marco, distintos conocimientos, saberes, valores y prácticas ambientales confluyen y aportan a la formación ciudadana y al ejercicio del derecho a un ambiente sano, digno y diverso.

La educación ambiental es un proceso permanente de enseñanza-aprendizaje por medio del cual el individuo adquiere conocimientos y desarrolla hábitos que le permiten modificar las pautas de conducta individual y colectiva en relación con el medio ambiente. Su propósito es lograr que los distintos sectores y grupos que integran el conjunto de la sociedad, participen conscientemente en la prevención y solución de los problemas ambientales a través de los siguientes aspectos:

- **CONCIENCIA:** Para adquirir un conocimiento y sensibilización ante el ambiente y sus problemas sociales.
- **ACTITUDES:** Para adquirir valores sociales y sentimientos de interés por el ambiente y motivación para participar activamente en su protección y mejoramiento.
- **CONOCIMIENTO:** A fin de obtener una variedad de experiencias para el cuidado del ambiente, así como comprensión básica de sus problemas y el papel de la humanidad en ellos.
- **APTITUDES:** Con el objeto de desarrollar aptitudes para trabajar en la solución de los problemas ambientales, así como en la promoción del diálogo entre los diferentes grupos sociales.
- **PARTICIPACIÓN:** Que tiene como meta desarrollar el sentido de responsabilidad social con respecto a los problemas ambientales a fin de asegurar la participación informada y comprometida en su solución.

9.2.2 Educación ambiental formal

Se refiere a los conocimientos que se adquieren dentro de un sistema escolarizado. Comprende aquellas actividades tendentes a promover la incorporación de los principios ambientales en la estructura de los planes y programas de los distintos niveles y modalidades del sistema educativo nacional, de manera interdisciplinaria con las otras áreas del conocimiento.

Las actividades de educación ambiental formal no deben limitarse a incorporar temas ambientales en los aspectos formales del ámbito escolar, sino trabajar en escuelas de distinto nivel impartiendo ciclos de conferencias, cursos acompañados con material audiovisual, promoviendo campañas sobre basura, reforestación y aprovechamiento racional del agua, así como proporcionando diversos materiales impresos que los maestros puedan emplear para reforzar sus actividades de enseñanza.

9.2.3 Educación ambiental no formal



Se refiere al conjunto de actividades que, en un momento dado, generan actitudes responsables y comprometidas ante el ambiente en los diferentes sectores y grupos de la población. Es cuando se realizan actividades que no implican una programación y organización, como pueden ser la difusión y la promoción a través de los medios masivos de comunicación como son: radio, prensa, televisión, trípticos, carteles, entre otros.

Prácticamente cualquier individuo o grupo social concientizado que participa en alguna actividad ambiental es un educador ambiental en potencia.

Como se mencionó, la educación ambiental no formal es aquella que se realiza paralela o independientemente a la educación formal y que no queda inscrita en los planes y programas de los distintos niveles educativos. No obstante, las actividades deben sistematizarse y programarse para lograr los objetivos propuestos en los Programas de educación ambiental.

9.2.4 Programa de educación ambiental

Un programa de educación ambiental debe realizarse sobre la base de varias premisas:

- ❖ Debe surgir del análisis de las características de los problemas ambientales de la localidad en la que se pretende desarrollar.
- ❖ En la realización de este análisis, debe considerarse la participación de la población con la que se van a desarrollar las acciones.
- ❖ Para determinar el grado de complejidad con que serán tratados los temas, se debe tomar en cuenta el tipo de grupo con el que se va a trabajar y las características de los destinatarios en función de un análisis previo del nivel y tipo de información que ya posean.

Existen por lo menos cinco pasos para que los programas de educación ambiental sean eficaces:

1. Identificación de los problemas ambientales específicos a ser tratados y la determinación de las soluciones técnicas.
2. Identificación y conocimiento de la población que va a participar en el programa.
3. Elaboración del mensaje a proyectarse.
4. Selección de los medios para hacer llegar este mensaje.
5. Evaluación y ajuste de los cambios a efectuarse cuando sea necesario.

9.3. IMPACTOS AMBIENTALES

Como bien se ha mencionado en apartados anteriores, los impactos pueden ser tanto positivos como negativos, por este motivo es importante identificar y valorar a cada uno de los posibles impactos, para visualizar de qué manera afectan al proyecto.

Para comprender la dimensión ambiental del proyecto, es esencial distinguir los efectos que se producen durante las tres etapas principales de desarrollo: la fase de construcción, la fase de operación y de cierre. Cada una presenta impactos específicos que, al ser gestionados de forma adecuada, pueden minimizarse y, en algunos casos, transformarse en beneficios ambientales tangibles.

9.3.1 Fase de construcción



Durante la etapa de construcción del relleno sanitario y su planta de biogás, el movimiento de tierras, la instalación de infraestructuras y la construcción de naves y accesos generan alteraciones temporales en el entorno. La preparación del terreno implica la remoción de vegetación y la modificación de la topografía local, lo que puede afectar la biodiversidad de la zona. Asimismo, la actividad de maquinarias pesadas y el transporte continuo de materiales provocan emisiones de partículas en suspensión y gases contaminantes (óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono), que pueden aumentar la carga de polución local durante el período de obras. El ruido mecánico y las vibraciones asociadas a la operación de excavadoras, compactadoras y camiones también representan un estrés adicional para la fauna y pueden generar molestias en comunidades vecinas. Para mitigar estos impactos es fundamental implementar un plan de manejo ambiental que incluya la revegetación progresiva de áreas aledañas, el riego periódico de caminos para controlar el polvo, el mantenimiento preventivo de equipos para reducir emisiones y la programación de trabajos ruidosos en horarios que minimicen las molestias a la población.

Cabe destacar la aparición de una serie de impactos positivos, principalmente vinculados al desarrollo económico y social de la región. La ejecución de las obras civiles y el montaje de la infraestructura implican la contratación de mano de obra local, lo que favorece la creación de empleo directo e indirecto y dinamiza la economía de San Rafael a través de la demanda de insumos, materiales y servicios. Asimismo, la capacitación del personal involucrado aporta a la transferencia de conocimientos técnicos en tecnologías limpias y gestión de residuos, fortaleciendo las capacidades productivas y profesionales de la comunidad.

9.3.4. Fase de operación

Una vez iniciada la operación, el relleno sanitario con planta de biogás despliega un conjunto de impactos ambientales tanto positivos como negativos que requieren un manejo continuo. Por un lado, la captura y aprovechamiento del metano reduce significativamente las emisiones fugitivas de este potente gas de efecto invernadero, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y mejorando la calidad del aire local al evitar la combustión descontrolada o la liberación directa a la atmósfera. Al mismo tiempo, el tratamiento y disposición controlada de los lixiviados evita la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, cuidando los acuíferos que abastecen a comunidades rurales y al riego agrícola. Sin embargo, la operación también implica la generación de olores, especialmente si los sistemas de recolección de biogás o las cámaras de digestión no se mantienen herméticas, lo que puede afectar la calidad de vida de los habitantes cercanos. Adicionalmente, el vertido final de materiales inorgánicos residuales, aunque reducido gracias a la separación previa, exige un monitoreo constante de la estabilidad del talud y la gestión de drenajes para prevenir filtraciones y erosión. Para reforzar los impactos positivos de esta fase, es imperativo contar con un programa de mantenimiento periódico de los sistemas de captación y purificación de biogás, un sistema de tratamiento de olores y un control estricto de los lixiviados mediante plantas de tratamiento biológico o químico que garanticen el cumplimiento de los límites de vertido establecidos por la normativa ambiental provincial y nacional.

9.3.3 Fase de cierre

Durante la etapa de cierre del vertedero controlado, comúnmente llamada “clausura del vertedero” y de las instalaciones asociadas al sistema de producción de biogás, se deberán implementar medidas orientadas a minimizar los impactos ambientales residuales y garantizar la estabilidad a largo plazo del sitio. En particular, se deberá controlar la emisión



de gases remanentes mediante la continuidad del sistema de captación pasiva de biogás, monitorear la calidad de los lixiviados y su tratamiento adecuado, y estabilizar la cobertura final del relleno para prevenir erosión, infiltraciones y escurrimientos superficiales. Asimismo, se deberán realizar tareas de revegetación y recuperación paisajística para favorecer la integración ambiental del predio y reducir la afectación sobre la biodiversidad local. Esta etapa incluye también un monitoreo ambiental post-cierre a mediano y largo plazo, que asegure que las condiciones del sitio no representen riesgos para la salud pública ni para los ecosistemas circundantes.

9.4. MATRIZ DE IMPACTOS AMBIENTALES

Algunas de las principales metodologías utilizadas para la identificación de impactos ambientales incluyen listas de chequeo o verificación, matrices, diagramas de redes, superposiciones y sistemas de información geográfica (SIG), sistemas expertos y el juicio profesional.

En el presente proyecto se optó por elaborar matrices ya que son el método objetivo más completo y determinante a la hora de evaluar si un proyecto es ambientalmente viable. Las matrices causa-efecto son una forma de organizar y analizar las interacciones entre los componentes del proyecto y los factores ambientales.

El método utilizado es el de Conesa-Fernandez que fue creado en el año 1997. Es una técnica de evaluación de impactos ambientales basada en el enfoque de matrices causa-efecto, que permite relacionar de forma estructurada las acciones de un proyecto con los factores ambientales susceptibles de ser afectados. Este método combina elementos de la matriz de Leopold —que establece la relación acción-factor mediante una valoración cualitativa y cuantitativa— con criterios del método del Instituto Battelle-Columbus, incorporando ponderaciones y escalas específicas para parámetros como intensidad, extensión, persistencia, reversibilidad y sinergia. El resultado es un índice numérico de importancia del impacto, que facilita la priorización y comparación de los efectos ambientales, tanto positivos como negativos.

9.4.1 Identificación de factores susceptibles a recibir impactos

El medio ambiente tendrá una mayor o menor capacidad de acogida del proyecto y la evaluaremos estudiando los efectos que sobre los principales factores ambientales causan las acciones del proyecto. Para elaborar la matriz correspondiente se identificaron una serie de factores, que luego serán ponderados según su magnitud de importancia, los mismos se enumeran a continuación:

Código	Componente	Factor Ambiental
F1	Suelo	Capa orgánica o calidad edafológica
F2	Suelo	Calidad fisicoquímica
F3	Suelo	Geomorfología
F4	Aire	Calidad



F5	Aire	Nivel sonoro
F6	Aire	Material particulado
F7	Agua	Agua superficial
F8	Agua	Agua subterránea
F9	Medio biótico	Flora
F10	Medio biótico	Fauna
F11	Medio perceptual	Paisaje
F12	Socioeconómico	Nivel de empleo
F13	Socioeconómico	Educación
F14	Socioeconómico	Economía
F15	Socioeconómico	Salud
F16	Socioeconómico	Calidad de vida

Tabla 9.1: Factores ambientales que pueden ser afectados por el proyecto

Fuente: elaboración propia

9.4.2. Identificación de acciones que pueden causar impactos

El método utilizado propone identificar aquellas acciones que pueden causar impactos sobre una serie de factores del medio:

- Acciones que modifican el suelo.
- Acciones que implican emisión de contaminantes.
- Acciones derivadas del almacenamiento de residuos.
- Acciones que implican sobreexplotación de recursos.
- Acciones que implican subexplotación de recursos.
- Acciones que actúan sobre el medio biótico
- Acciones que dan lugar al deterioro del paisaje

A continuación, se definieron 12 acciones consideradas las más representativas y relevantes del proyecto, abarcando tanto la fase de construcción, la de operación como la de cierre, para su posterior utilización en la matriz de identificación de impactos ambientales.

Código	Acción	Fase
A1	Desmonte, limpieza y movimiento de suelos	Construcción
A2	Construcción de celdas del relleno sanitario	Construcción
A3	Construcción de la planta de separación y obras complementarias	Construcción
A4	Construcción de la planta de biogás y sistema de captación	Construcción
A5	Transporte de materiales, equipos y generación de residuos de obra	Construcción
A6	Recepción y clasificación de residuos	Operación
A7	Disposición final de residuos no reciclables en el relleno	Operación



A8	Captación y conducción de biogás desde el relleno	Operación
A9	Tratamiento y purificación del biogás	Operación
A10	Generación y transformación de energía	Operación
A11	Manejo de lixiviados y tratamiento de efluentes	Operación
A12	Mantenimiento de instalaciones y monitoreo ambiental	Operación
A13	Fase de cierre	Cierre

Tabla 9.2: Principales acciones del proyecto

Fuente: elaboración propia

9.4.3. Matriz de identificación de impactos ambientales

La matriz de identificación de impactos ambientales es la primera etapa del proceso de evaluación, en la cual se enumeran y cruzan las acciones del proyecto con los factores ambientales relevantes para determinar la existencia o no de un impacto. Su objetivo es identificar de manera preliminar los efectos potenciales, tanto positivos como negativos, sin asignarles todavía un valor numérico de importancia. Esta matriz funciona como un diagnóstico inicial que servirá de base para las etapas posteriores de cuantificación y valoración. En la tabla 9.3, se pueden visualizar los impactos existentes en el presente proyecto.



Acciones Factores		Subfactores		Desmonte, limpieza y movimiento de suelos	Construcción de celdas del relleno sanitario	Construcción de la planta de separación y obras complementarias	Construcción de la planta de biogás y sistema de captación	Transporte de materiales, equipos y generación de residuos de obra	Recepción y clasificación de residuos	Disposición final de residuos no reciclables en el relleno	Captación y conducción de biogás desde el relleno	Tratamiento y purificación del biogás	Generación y transformación de energía	Manejo de lixiviados y tratamiento de efluentes	Mantenimiento de instalaciones y monitoreo ambiental	Fase de cierre
				A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
Medio físico	Suelo	Capa orgánica	F1	Remoción de suelo vegetal	Retiro superficial para celdas	Afectación localizada	Eliminación de cobertura vegetal	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	Generación de vegetación
		Calidad fisicoquímica	F2	Compactación por maquinaria	Compactación por base impermeable	Compactación por obra civil	Compactación de fundaciones	Compactación puntual por tránsito	no aplica	Compactación planificada del relleno	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	Disminución de la erosión
		Geomorfología	F3	Alteración del perfil superficial del suelo	Excavación y modelado del terreno base	Nivelación y compactación	Movimiento de suelos y estructuras	Compactación puntual	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	Modelado final y cobertura del terreno
	Aire	Material Particulado	F4	Levantamiento por maquinaria	Movimiento y compactación	Polvo en obra civil	Polvo puntual en obra	Polvo por tránsito continuo	Polvo seco en residuos	Emisión por compactación	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		Calidad	F5	Posible contaminación por emisión de gases	Posible contaminación por emisión de gases	Posible contaminación por emisión de gases	Posible contaminación por emisión de gases	Emisiones de camiones	Olores	Emisiones de gases de descomposición	Reducción de emisiones fugitivas	Emisión controlada de gases	Combustión en motores	Emisión de olores puntuales	no aplica	Disminución de emisiones y olores
		Nivel sonoro	F6	Maquinaria pesada	Excavadoras y compactadores	Herramientas y soldaduras	Equipos técnicos	Tránsito de camiones	Ruido operativo moderado	Compactación diaria	Sopladores o bombas	Compresores, válvulas	Generadores eléctricos	Bombas y válvulas	Herramientas eléctricas	no aplica
	Agua	Agua subterránea	F7	Reduce la capacidad de infiltración	Impermeabilización de áreas	Reduce la capacidad de infiltración	Reduce la capacidad de infiltración	Posibilidad de contaminación química	Posibilidad de contaminación química	Posibilidad de contaminación química	no aplica	No aplica	No aplica	Generación principal	No aplica	Generación de lixiviados por infiltración de lluvia
		Agua superficial	F8	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	Posibilidad de fuga de lixiviado	no aplica	no aplica
Medio biótico		Flora	F9	Eliminación de vegetación	Eliminación de vegetación	Eliminación de vegetación	Eliminación de vegetación	Eliminación puntual de vegetación	no aplica	Imposibilidad de crecimiento vegetal	no aplica	no aplica	no aplica	Posible afectación por vertidos accidentales.	no aplica	Revegetación
		Fauna	F10	Desplazamiento de fauna local	Perdida de hábitat	Alteración de fauna	Perturbación por ruido y movimiento	Molestia por tránsito y ruido	No aplica	Incremento de vectores	No aplica	No aplica	Molestia por ruido	no aplica	no aplica	Recuperación gradual del hábitat
Medio perceptual		Paisaje	F11	Alteración del paisaje	Alteración del paisaje	Alteración del paisaje	Alteración del paisaje	Alteración visual temporal	Alteración del paisaje	Alteración del paisaje	Alteración del paisaje	Alteración del paisaje	Alteración del paisaje	Alteración del paisaje	no aplica	Recuperación paisajística
Socioeconómico		Nivel de empleo	F12	Requerimiento de personal temporal	Requerimiento de personal temporal	Requerimiento de personal temporal	Requerimiento de personal temporal	Requerimiento de personal temporal	Personal permanente	Personal permanente	Personal permanente	Personal permanente	Personal permanente	Personal permanente	Personal permanente	Requerimiento de personal temporal
		Educación	F13	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	Visitas educativas	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica
		Economía	F14	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	Ingresos por venta de reciclables	no aplica	no aplica	no aplica	Aumento en la disponibilidad energética	no aplica	no aplica	no aplica
		Salud	F15	Riesgo en tareas de limpieza	Riesgo en excavaciones	Riesgo en armado de estructura	Riesgo técnico puntual	Accidentes por tránsito	Riesgos de manipulación	Riesgos con maquinaria	Riesgo en ductos y válvulas	Manejo de gases y químicos	Riesgo eléctrico y térmico	Exposición a lixiviados	no aplica	Reducción de riesgos
		Calidad de vida	F16	Ruido y polvo	Ruido y polvo	Ruido y polvo	Ruido y polvo	Ruido y polvo	Olores y vectores	Olores y vectores	Reducción de olores	no aplica	no aplica	no aplica	no aplica	Recuperación del entorno

Tabla 9.3: Matriz de identificación de impactos ambientales

Fuente: Elaboración propia



9.4.4. Matriz de cálculo de importancia

Como bien se ha mencionado la matriz de impacto ambiental es un método analítico objetivo, por el cual, se le puede asignar la importancia (I) a cada impacto ambiental posible de la ejecución de un proyecto en todas y cada una de sus etapas. Mediante la aplicación de la fórmula correspondiente, se obtiene un índice numérico que expresa la relevancia relativa de cada impacto, lo que permitirá priorizar aquellos que requieran medidas de prevención, mitigación o potenciación. Para esto se utiliza la ecuación para el Cálculo de la Importancia (I) de un impacto ambiental:

$$I = \pm [3i + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC]$$

Dónde:

- $\pm$ = Naturaleza del impacto.
- I = Importancia del impacto
- i = Intensidad o grado probable de destrucción
- EX = Extensión o área de influencia del impacto
- MO = Momento o tiempo entre la acción y la aparición del impacto
- PE = Persistencia o permanencia del efecto provocado por el impacto
- RV = Reversibilidad
- SI = Sinergia o reforzamiento de dos o más efectos simples
- AC = Acumulación o efecto de incremento progresivo
- EF = Efecto (tipo directo o indirecto)
- PR = Periodicidad
- MC = Recuperabilidad o grado posible de reconstrucción por medios humanos

A continuación, se expone la explicación de estos conceptos:

- Signo (+/-): El signo del impacto hace alusión al carácter beneficioso (+) o perjudicial (-) de las distintas acciones que van a actuar sobre los distintos factores considerados.
- Intensidad (i) Este término se refiere al grado de incidencia de la acción sobre el factor, en el ámbito específico en el que actúa. El baremo de valoración estará comprendido entre 1 y 12, en el que 12 expresará una destrucción total del factor en el área en la que se produce el efecto y el 1 una afección mínima.
- Extensión (EX) Se refiere al área de influencia teórica del impacto en relación con el entorno del Proyecto dividido el porcentaje del área, respecto al entorno, en que se manifiesta el efecto.
- Momento (MO) El plazo de manifestación del impacto alude al tiempo que transcurre entre la aparición de la acción (t₀) y el comienzo del efecto (t_j) sobre el factor del medio considerado.
- Persistencia (PE) Se refiere al tiempo que permanece el efecto desde su aparición y a partir del cual el factor afectado retornaría a las condiciones iniciales previas a la acción por medios naturales o mediante la introducción de medidas correctoras.
- Reversibilidad (RV) Se refiere a la posibilidad de reconstrucción del factor afectado por el Proyecto, es decir, la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la acción, por medios naturales, una vez que aquella deja de actuar sobre el medio.



- Recuperabilidad (MC) Se refiere a la posibilidad de reconstrucción, total o parcial, del factor afectado como consecuencia del Proyecto, es decir la posibilidad de retornar a las condiciones iniciales previas a la actuación, por medio de la intervención humana (introducción de medidas correctoras).
- Sinergia (SI) Este atributo contempla el reforzamiento de dos o más efectos simples. El componente total de la manifestación de los efectos simples, provocados por acciones que actúan simultáneamente, es superior a la que cabría de esperar de la manifestación de efectos cuando las acciones que las provocan actúan de manera independiente, no simultánea.
- Acumulación (AC) Este atributo da idea del incremento progresivo de la manifestación del efecto, cuando persiste de forma continuada o reiterada la acción que lo genera.
- Efecto (EF) Este atributo se refiere a la relación causa-efecto, o sea a la forma de manifestación del efecto sobre un factor, como consecuencia de una acción.
- Periodicidad (PR) La periodicidad se refiere a la regularidad de manifestación del efecto, bien sea de manera cíclica o recurrente (efecto periódico), de forma impredecible en el tiempo (efecto irregular), o constante en el tiempo (efecto continuo).



MATRIZ DE IMPORTANCIA DEL IMPACTO																
A1: Desmante, limpieza y nivelación	Suelo			Aire			Agua		Medio biótico		Medio perceptual	Socioeconomico				
	A1F1	A1F2	A1F3	A1F4	A1F5	A1F6	A1F7	A1F8	A1F9	A1F10	A1F11	A1F12	A1F13	A1F14	A1F15	A1F16
NATURALEZA								No aplica					No aplica	No aplica		
Impacto Beneficioso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x 1	0	0	0	0
Impacto Perjudicial	x -1	x -1	x -1	x -1	x -1	x -1	x -1	0	x -1	x -1	x -1	0	0	0	x -1	x -1
	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	1	0	0	-1	-1
INTENSIDAD (I)																
Baja	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Media	0	x 2	0	x 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alta	x 4	0	0	0	0	0	x 4	x 4	x 4	0	x 4	x 4	x 4	0	x 4	x 4
Muy Alta	0	0	x 8	0	x 8	0	0	x 8	0	x 8	0	0	x 8	x 8	0	0
Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	2	8	2	8	4	4	8	4	8	4	4	8	8	4	4
EXTENSIÓN (EX; Área de Influencia)																
Puntual	0	0	0	x 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Parcial	x 2	0	x 2	0	0	0	x 2	0	x 2	0	0	0	0	x 2	x 2	0
Extenso	0	x 4	0	0	x 4	x 4	0	x 4	0	x 4	x 4	x 4	x 4	0	0	x 4
Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(Crítica)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	4	2	1	4	4	2	4	2	4	4	4	4	2	2	4
MOMENTO (MO; Plazo de Manifestación)																
Largo Plazo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Medio Plazo	0	x 2	0	0	0	0	x 2	x 2	0	0	x 2	0	x 2	0	0	0
Inmediato	x 4	0	x 4	x 4	x 4	x 4	0	0	x 4	x 4	0	0	0	x 4	x 4	0
(Crítico)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x 4	0	0	0	x 4
	4	2	4	4	4	4	2	2	4	4	2	4	2	4	4	4
PERSISTENCIA (PE; Permanencia del Efecto)																
Fugaz	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x 1	0
Temporal	0	x 2	x 2	0	x 2	x 2	x 2	x 2	x 2	0	0	0	0	0	0	x 2
Permanente	x 4	0	0	x 4	0	0	0	0	0	x 4	x 4	x 4	x 4	x 4	0	0
	4	2	2	4	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	1	2
REVERSIBILIDAD (RV)																
Corto Plazo	0	0	x 1	0	x 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Medio Plazo	0	x 2	0	0	0	x 2	0	0	x 2	x 2	0	x 2	0	0	x 2	x 2
Irreversible	x 4	0	0	x 4	0	0	x 4	x 4	0	0	x 4	0	x 4	x 4	0	0
	4	2	1	4	1	2	4	4	2	2	4	2	4	4	2	2
SINERGIA (SI; Regularidad de la Manifestación)																
Sin Sinergismo o Simple	x 1	0	0	0	x 1	x 1	x 1	x 1	x 1	0	0	0	0	0	0	x 1
Sinérgico	0	x 2	x 2	x 2	0	0	0	0	0	x 2	x 2	x 2	0	x 2	x 2	0
Muy Sinérgico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x 4	0	0	0
	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	4	2	2	1
ACUMULACIÓN (AC; Incremento Progresivo)																
Simple	x 1	0	x 1	x 1	0	x 1	0	x 1	x 1	x 1	0	x 1	0	x 1	x 1	0
Acumulativo	0	x 4	0	0	x 4	0	x 4	0	0	0	x 4	0	x 4	0	0	x 4
	1	4	1	1	4	1	4	1	1	1	4	1	4	1	1	4
EFFECTO (EF; Relación Causa-Efecto)																
Indirecto o Secundario	0	x 1	x 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x 1	0	0
Directo	x 4	0	0	x 4	x 4	x 4	x 4	x 4	x 4	x 4	x 4	x 4	x 4	0	x 4	x 4
	4	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4
PERIODICIDAD (PR; Regularidad de la Manifestación)																
Irregular o Aperiódico y Discontinuo	x 1	0	x 1	0	0	0	0	x 1	x 1	x 1	0	0	0	0	x 1	0
Periódico	0	0	0	x 2	x 2	x 2	x 2	0	0	0	x 2	x 2	0	0	0	x 2
Continuo	0	x 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	x 4	x 4	0	0
	1	4	1	2	2	2	2	1	1	1	2	2	4	4	1	2
RECUPERABILIDAD (MC; Reconstrucción por Medios Humanos)																
Recuperable de Manera Inmediata	0	0	0	0	x 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Recuperable a Medio Plazo	0	x 2	x 2	0	0	x 2	x 2	0	x 2	0	x 2	0	0	0	x 2	x 2
Mitigable	x 4	0	0	x 4	0	0	0	0	0	x 4	0	x 4	0	0	0	0
Irrecuperable	0	0	0	0	0	0	0	x 8	0	0	0	0	x 8	x 8	0	0
	4	2	2	4	1	2	2	8	2	4	2	4	8	8	2	2
IMPORTANCIA	-39	-33	-42	-33	-51	-38	-37	0	-33	-54	-44	43	0	0	-33	-41

Tabla 9.4: matriz de importancia del impacto para la acción 1 (A1 = Desmante, limpieza y movimiento de suelos)

Fuente: Elaboración propia

En la tabla anterior se muestra una de las matrices realizadas para el estudio de la importancia que tiene cada acción sobre cada uno de los factores definidos, en el caso de esta tabla se muestra la matriz de importancia referida a la acción 1 que es “desmante, limpieza y



movimiento de suelos”. Por razones de claridad visual, se ha decidido dejar expresada solo una tabla a modo de ejemplo en este informe.

9.4.5. Matriz de valoración de impacto ambiental

La matriz de valoración es la tercera y última etapa del proceso, en la que los impactos previamente calculados se clasifican e interpretan en función de su índice de importancia. Este análisis permite agruparlos en categorías —como impacto positivo, bajo, moderado, severo, o crítico— y establecer un criterio objetivo para la toma de decisiones en la gestión ambiental del proyecto. De esta manera, la matriz de valoración facilita la definición de medidas concretas de manejo, priorizando aquellas acciones que resulten más efectivas para reducir los impactos negativos y potenciar los beneficios ambientales. En la siguiente tabla se establecen los valores numéricos que clasifican a los impactos:

Valor de intensidad	Calificación	Significado
> 0	POSITIVOS	Impactos positivos sobre el entorno
< 25	BAJO	La afectación del mismo es irrelevante en comparación con los fines y objetivos del proyecto
25> <50	MODERADO	No precisa prácticas correctoras o protectoras intensivas
50> <75	SEVERO	Exige la recuperación de las condiciones del medio a través de medidas correctoras o protectoras.
> 75	CRÍTICO	La afectación es superior al umbral aceptable. Se produce una pérdida permanente de la calidad en las condiciones ambientales. No hay posibilidad de recuperación

Tabla 9.5: calificación de impactos

Fuente: Elaboración propia



Acciones Factores		Subfactores		Desmonte, limpieza y movimiento de suelos	Construcción de celdas del relleno sanitario	Construcción de la planta de separación y obras complementarias	Construcción de la planta de biogás y sistema de captación	Transporte de materiales, equipos y generación de residuos de obra	Recepción y clasificación de residuos	Disposición final de residuos no reciclables en el relleno	Captación y conducción de biogás desde el relleno	Tratamiento y purificación del biogás	Generación y transformación de energía	Manejo de lixiviados y tratamiento de efluentes	Mantenimiento de instalaciones y monitoreo ambiental	Fase de cierre	
				A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	
Medio físico	Suelo	Capa orgánica	F1	-39	-27	-22	-22	0	0	0	0	0	0	0	0	63	
		Calidad fisicoquímica	F2	-33	-49	-37	-37	-33	0	-39	0	0	0	0	0	47	
		Geomorfología	F3	-42	-42	-30	-30	-28	0	0	0	0	0	0	0	38	
	Aire	Material Particulado	F4	-33	-29	-22	-22	-37	-30	-35	0	0	0	0	0	0	
		Calidad	F5	-51	-51	-35	-35	-43	-35	-63	71	-54	-64	-43	0	41	
		Nivel sonoro	F6	-38	-38	-27	-27	-30	-24	-38	-38	-38	-62	-28	-32	0	
	Agua	Agua subterránea	F7	-37	-28	-28	-28	-46	-39	-69	0	0	0	0	-63	0	-48
		Agua superficial	F8	0	0	0	0	0	-53	0	0	0	0	0	-55	0	0
Medio biótico		Flora	F9	-33	-33	-33	-33	-38	0	-47	0	0	0	-44	0	50	
		Fauna	F10	-54	-54	-54	-54	-37	-24	-52	0	0	-47	0	0	43	
Medio perceptual		Paisaje	F11	-44	-38	-38	-38	-26	-31	-50	-42	-36	-42	-36	0	50	
Socioeconómico		Nivel de empleo	F12	43	43	43	43	45	62	-62	42	54	55	42	44	32	
		Educación	F13	0	0	0	0	0	59	0	0	0	0	0	0	0	0
		Economía	F14	0	0	0	0	0	64	0	0	0	78	0	0	0	0
		Salud	F15	-33	-33	-33	-33	-52	-47	-47	-36	-60	-50	-40	0	46	
		Calidad de vida	F16	-41	-41	-41	-41	-48	-48	-48	48	0	0	0	0	0	71

Tabla 9.6: Matriz de valoración de impactos ambientales



De la tabla se puede concluir que los impactos críticos están todos relacionados con la alteración del recurso hídrico, siendo estos, el riesgo de contaminación de aguas superficiales y subterráneas (F12) para las acciones de: desmonte limpieza y movimiento de suelos (A1), disposición final de residuos no reciclables en el relleno (A7) y manejo de lixiviados y tratamiento de efluentes (A11). Aun así, si bien este riesgo existe y da un valor elevado, cabe destacar que las napas freáticas se encuentran a gran profundidad en la localización elegida lo cual dificulta la llegada de los contaminantes hasta las mismas, sino que se fijarán y retendrán en el suelo.

También se observa un riesgo crítico en el consumo de agua para procesos (F10) viéndose afectado en la construcción de celdas del relleno sanitario (A2). Si bien es elevado, es un riesgo que tiene posibilidad de mitigación y no sería un impedimento con el avance del proyecto.

Por otro lado, se destacan como impactos positivos de mayor relevancia aquellos relacionados con el componente socioeconómico, debido al abastecimiento energético de la zona, la generación de trabajo y al fomento del uso e implementación de energías renovables.

9.5. PLAN DE CONTINGENCIAS

La operación de un proyecto de gestión integral de residuos sólidos urbanos implica la posibilidad de ocurrencia de situaciones imprevistas que, de no ser gestionadas adecuadamente, pueden derivar en impactos ambientales y sociales significativos. El Plan de Contingencias desarrollado en la **tabla 9.7** constituye una herramienta preventiva y correctiva destinada a identificar los principales riesgos asociados a las distintas etapas de operación, así como a establecer protocolos de acción claros y eficientes para su control y mitigación. Su objetivo es minimizar las consecuencias negativas de incidentes tales como derrames, fugas de gas, incendios, fallas en los sistemas de lixiviados, generación de olores, ruidos y otros eventos no deseados, asegurando la continuidad operativa y la protección de la salud pública y del ambiente.



Riesgo	Acciones Preventivas	Acciones Correctivas (paso a paso)	Responsables	Recursos Necesarios
Derrames pequeños de combustibles o reactivos	- Almacenamiento en cubetos de contención. - Capacitación en manipulación segura. - Kits de emergencia disponibles.	- Detener la fuente del derrame. - Delimitar la zona y señalizar. - Aplicar absorbentes o neutralizantes. - Retirar material contaminado en recipientes adecuados. - Disponer residuos en gestor autorizado.	Encargado de seguridad y operarios de turno.	Kits absorbentes, neutralizantes, EPP, recipientes de residuos peligrosos.
Fuga de biogás en tuberías o válvulas	- Mantenimiento preventivo. - Monitoreo de presión y caudal. - Válvulas de seguridad instaladas.	- Evacuar personal de la zona. - Cerrar válvulas aguas arriba y abajo. - Ventilar el área de manera natural o forzada. - Inspeccionar línea y reparar con personal especializado. - Registrar el incidente.	Jefe de planta de biogás y brigada de emergencia.	Detectores de gas, válvulas de cierre rápido, EPP antiexplosivos, ventiladores.
Incendio en zona de disposición o en equipos	- Cobertura diaria de residuos. - Extintores e hidrantes disponibles. - Capacitación en brigadas contra incendios.	- Activar alarma y evacuar zona. - Usar extintores/hidrantes según tipo de fuego. - En caso de no controlarse, notificar a bomberos. - Aislar materiales inflamables cercanos. - Evaluar daños y reanudar operaciones seguras.	Brigada contra incendios y supervisor de turno.	Extintores, hidrantes, espuma, vehículos cisterna, comunicación directa con bomberos.
Fuga masiva de lixiviados	- Doble impermeabilización y sistema de drenaje. - Monitoreo de niveles. - Tanques de emergencia disponibles.	- Identificar la fuga y contener con diques temporales. - Desviar flujo hacia tanques de emergencia. - Bombear lixiviado a planta de tratamiento. - Reparar geomembrana o tubería dañada. - Reportar a autoridad ambiental.	Encargado de vertedero y equipo de mantenimiento.	Bombas portátiles, geomembranas de repuesto, tanques de emergencia, EPP impermeables.
Exceso de olores molestos	- Cobertura diaria del frente de descarga. - Biofiltros en captación de aire. - Rotación de zonas de disposición.	- Detectar foco del olor. - Aplicar cobertura adicional (compost, tierra, materiales absorbentes). - Ajustar sistema de ventilación/biofiltros. - Registrar queja y acciones.	Encargado de operaciones del relleno.	Materiales de cobertura, equipos de aplicación, biofiltros, registro de reclamos.
Ruido excesivo de maquinaria	- Mantenimiento regular de motores. - Uso de silenciadores. - Programación de horarios de operación.	- Identificar fuente puntual. - Reducir la operación temporalmente. - Reparar o reemplazar equipos defectuosos. - Comunicar acciones a la comunidad afectada.	Supervisor de mantenimiento.	Silenciadores, repuestos, EPP auditivo, plan de comunicación.

Tabla 9.7: Plan de contingencias ambientales

Fuente: Elaboración propia



CAPITULO 10

ESTUDIO ECONÓMICO

10.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo tiene por objetivo analizar la viabilidad económica del proyecto de producción de biogás a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) en un relleno sanitario ubicado en el departamento de San Rafael, Mendoza. Para ello, se desarrollará una estimación detallada de la inversión inicial requerida, incluyendo el capital fijo y el capital de trabajo, así como los costos operativos y unitarios asociados al funcionamiento de la planta.

A partir de estos datos, se proyectarán los ingresos esperados y se construirá el flujo de fondos del proyecto para un horizonte temporal definido. Finalmente, se calcularán los principales indicadores de rentabilidad económica —Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de Recuperación— con el fin de evaluar la conveniencia financiera de su implementación, tanto desde el punto de vista técnico como estratégico.

Desde el punto de vista de ingresos económicos del proyecto se verán contemplados la venta de materiales reciclables como vidrio, aluminio, cartón y papel, etc. y la venta de energía eléctrica generada por los motogeneradores del proyecto.

Para el siguiente estudio se emplea la cotización del dólar correspondiente al mes de agosto de 2025 proporcionado por el Banco Central de la República Argentina.

10.2. EVALUACIÓN ECONÓMICA

La tasa de descuento o coste de capital es una medida financiera que se aplica para determinar el valor actual de un pago futuro.

La tasa de descuento empleada en la actualización de los flujos de caja de un proyecto es una de las variables que más influyen en el resultado de la evaluación del mismo, teniendo así que la utilización de una tasa de descuento inapropiada puede llevar a un resultado equivocado de la evaluación.

El método más empleado en la actualidad para determinar esta tasa es el basado en el modelo de precios de los activos de capital, conocido con las siglas CAPM (Capital Asset Pricing Model).

Por este método la tasa de descuento se calcula de la siguiente forma:

$$r = R_f + (R_m - R_f) * \beta + R_p$$

Para el cálculo de la tasa de descuento a través de este método se tiene en cuenta:

La tasa libre de riesgo (R_f): Es práctica habitual, y aceptada en forma generalizada, evaluar la tasa de libre riesgo como el rendimiento de los Bonos del Tesoro de Estados Unidos (Treasury Bonds o T-Bonds) con una madurez equivalente a la vida útil del activo que se desea evaluar. Para un horizonte de evaluación a diez años el T-bonds es del 4.38%.

La tasa de rentabilidad observada en el mercado (R_m) en EE. UU.: Se considera de un 10% y abarca a todos los sectores de la economía.

La sensibilidad (β): relaciona el riesgo del proyecto con el riesgo del mercado. Los bienes producidos por este proyecto se consideran commodities, por lo cual la beta elegida será la beta de mercado, tomando un valor igual a 0.92.

El valor de beta fue extraído de la siguiente página:



https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/totalbeta.html

Riesgo país (Rp): Se ha optado por determinar el riesgo país mediante el EMBI+ (Emerging Market Bond Index Plus). Según la fuente ámbito.com el valor de riesgo país al día de realizar esta evaluación para la Argentina es de 901 puntos básicos, por lo tanto, se asumirá tal valor para realizar el cálculo.

Con los datos obtenidos ya puede procederse al cálculo de la tasa de descuento aplicable a este proyecto:

$$r = Rf + (Rm - Rf) * \beta + Rp = 4.38\% + (10\% - 4.38\%) * 0.92 + 9.01\% \\ r = 18.56 \%$$

10.3. DETERMINACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL

En la inversión inicial total se consideraron tanto los costos de materiales y actividades de ejecución del campo de captación de biogás, como los costos de las maquinarias y equipos necesarios en la planta de tratamiento para la correspondiente generación de energía. Los mismos se detallan a continuación:

10.3.1. Inversión en capital fijo

El capital fijo comprende todas las inversiones de carácter no recurrente necesarias para poner la planta en operación: obras civiles y de infraestructura, equipos principales y auxiliares, instalaciones eléctricas y de control, ingeniería, puesta en marcha y provisión inicial de repuestos y herramientas. En este capítulo se detallan las partidas principales a considerar para el relleno sanitario, la planta de biogás, la planta de separación manual y el equipamiento asociado (sistemas de captación, maquinaria, motogeneradores, tableros, etc.), así como reglas prácticas para su estimación.

- **TERRENO**

En relación con la adquisición del terreno, es importante destacar que este no representa un costo para el proyecto, dado que será aportado por la Municipalidad de San Rafael. La localización seleccionada corresponde al actual vertedero a cielo abierto conocido como “La Tombina”, el cual será reconvertido y utilizado como emplazamiento para la planta de separación, la planta de biogás y el relleno sanitario controlado. Como contraprestación, se establece un convenio con la Municipalidad, mediante el cual nuestro proyecto se compromete a recibir y gestionar los residuos sólidos urbanos (RSU) de la ciudad de San Rafael, asegurando su disposición adecuada y valorización energética. Esta modalidad permite optimizar recursos económicos, fortalecer la articulación público–privada y contribuir a la solución estructural del problema de gestión de residuos en la región.

- **EDIFICIOS E INSTALACIONES**

La inversión en edificaciones se calcula en base al costo unitario de cada tipo de instalación. Y las dimensiones ya han sido determinadas en el capítulo de “Ingeniería de detalle”.



EDIFICIO E INSTALACIONES				
ÁREAS	SUBÁREAS	SUPERFICIE (m2)	PRECIO UNITARIO (U\$/m2)	COSTO TOTAL (U\$D)
PLANTA DE SEPARACIÓN	Recepción de Residuos	200	\$190.00	\$38,000
	Área de Separación	250	\$235.00	\$58,750
	Depósito de Producto Separado	100	\$190.00	\$19,000
	Área de Mantenimiento	50	\$200.00	\$10,000
	Baño/Vestidor	20	\$280.00	\$5,600
ÁREA DE ADMINISTRACIÓN	Oficina Administrativa	25	\$235.00	\$5,875
	Baño	15	\$280.00	\$4,200
	Comedor	50	\$280.00	\$14,000
	Oficina de Recepción	15	\$235.00	\$3,525
CONSTRUCCIÓN VASO DE VERTIDO	Membrana PEAD 1500	216000	\$4.00	\$864,000
	Red de captación de lixiviados	-	-	\$40,000
	Red de captación de biogás	-	-	\$137,000
	Costo de trincheras	-	-	\$6,500
SUPERFICIE TOTAL		216725		
COSTO TOTAL				-\$1,206,450

Tabla 10.1: Inversión inicial en edificios e instalaciones
Fuente: Elaboración propia

- EQUIPOS

La inversión inicial en equipos comprende los activos productivos fundamentales para la puesta en marcha y operación del proyecto, abarcando la planta de separación de residuos, el sistema de captación y purificación de biogás, los motogeneradores para la generación eléctrica y los servicios auxiliares asociados. Estos equipos representan una parte significativa del capital fijo, ya que garantizan la capacidad operativa, la eficiencia en el tratamiento de residuos y la valorización energética a lo largo de la vida útil del proyecto.



EQUIPOS E INSTALACIONES					
ÁREA	EQUIPO	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (USD)	COSTO TOTAL (USD)
Planta de Separación	Tolva de descarga y elevador	unidad	1	1500	1500
	Cinta de clasificación	unidad	1	8000	8000
	Prensa enfardadora	unidad	1	1200	1200
Relleno Sanitario	Movimiento de suelos	m ³	10000	5	50000
	Agregado petreo en trincheras	m ³	2000	4	8000
	Bentonita	Tn	5	7.3	36.5
	Estación de bombeo de lixiviados	unidad	2	6000	12000
	Cobertura diaria y maquinaria pesada	lote	1	12000	12000
Planta de Biogás	Separador de condensados	unidad	1	3000	3000
	Filtro de partículas	unidad	1	600	600
	Compresor	unidad	2	4300	8600
	Adsorbedor de H ₂ S	unidad	1	15000	15000
	Remoción de siloxanos	unidad	1	30000	30000
	Antorcha de seguridad	unidad	1	15000	15000
Planta de Generación	Motor (280 kW)	unidad	2	20000	40000
	Generadores síncronos	unidad	2	10000	20000
	Transformador	unidad	1	20000	20000
	Tableros de control y refrigeración	lote	1	12000	12000
Servicios auxiliares	Báscula de camiones	unidad	1	30000	30000
	Red eléctrica interna	lote	1	30000	30000
	Sistema contra incendios	lote	1	15000	15000
				TOTAL	-331936.5

Tabla 10.2: Inversión inicial en equipos e instalaciones principales



Fuente: Elaboración propia

Para la operación del vertedero serán necesarias distintas maquinarias como retroexcavadoras y camiones volquetes, al igual que camionetas para inspeccionar el lugar y ventas de productos reciclables.

RODADOS			
ÍTEM	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (U\$D/unidad)	COSTO TOTAL (U\$D)
Retroexcavadora	1	\$80,000	\$80,000
Oruga retroexcavadora	1	\$130,000	\$130,000
Camión volquete	1	\$40,000	\$40,000
Camionetas	1	\$19,000	\$19,000
COSTO TOTAL			-\$269,000

Tabla 10.3: Rodados

Para un correcto funcionamiento de la empresa también son necesarios Muebles y Útiles, los cuales son descritos en la tabla a continuación.

MUEBLES Y ÚTILES			
ÍTEM	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (U\$D/unidad)	COSTO TOTAL (U\$D)
Computadoras	10	\$900	\$9,000
Impresoras	2	\$300	\$600
Escritorios	10	\$100	\$1,000
Sillas	20	\$50	\$1,000
Mesas	5	\$60	\$300
Aire Acondicionado	3	\$1,000	\$3,000
Armarios	6	\$300	\$1,800
Otros	1	0.05%	\$835
COSTO TOTAL			-\$17,535

Tabla 10.4: Muebles y Útiles

Fuente: Elaboración propia

10.3.2. Costos diferidos

Los costos diferidos comprenden las inversiones en activos intangibles necesarias para poner en marcha el proyecto. Estos gastos no se traducen en bienes físicos, pero son fundamentales para su desarrollo y operación inicial.

El monto total de estos cargos se calcula como un porcentaje de las inversiones previamente estimadas. A continuación, se detallan los conceptos considerados:

- Planeamiento e integración del proyecto: Se estima en un 0,3% del total invertido en activos fijos.
- Ingeniería del proyecto: Representa el 0,35% del costo total de los equipos de planta.



- Supervisión del proyecto: Se considera un 0,15% de la inversión total en activos fijos.
- Constitución de la empresa: Este trámite legal tiene un costo estimado de USD 4.500.
- Administración del proyecto: Se calcula como el 0,5% del valor de los activos fijos.
- Puesta en marcha de los equipos: Tiene un costo equivalente al 2% del valor total de los equipos de planta.

Estas estimaciones permiten anticipar correctamente los gastos asociados al desarrollo y la ejecución inicial del proyecto.

INVERSION TOTAL EN ACTIVOS FIJOS		- \$1,831,472
COSTOS DIFERIDOS		
Ítem	%	Costo US\$
Planeamiento e integración del proyecto	0.3	-5494.41
Ingeniería del proyecto	0.35	-6410.15
Supervisión del proyecto	0.15	-2747.21
Constitución de la empresa	0.2	-3662.94
Administración del proyecto	0.5	-9157.36
Puesta en marcha de los equipos	2	-36629.43
COSTOS TOTALES		- \$64,102

Tabla 10.5: Costos diferidos
Fuente: Elaboración propia

10.3.3. Inversión total necesaria

Para la instalación y puesta en marcha de una planta de producción de biogás a partir de un relleno sanitario de las características planteadas en este proyecto, se necesita una inversión inicial igual a la suma de los valores planteados anteriormente.

En este caso ese valor asciende a los U\$D 1.830.237

INVERSION TOTAL CON COSTOS DIFERIDOS	- \$1,895,573
--------------------------------------	---------------

10.3.4. Cronograma de inversiones

El cronograma de inversiones detalla la distribución temporal de los desembolsos necesarios para llevar adelante el proyecto, ordenados por conceptos clave y expresados por unidad de tiempo (años). Se establece que toda la inversión requerida para la puesta en marcha se realizará durante el primer año. Dentro de este período, se considera el siguiente esquema de ejecución:

- Construcción e instalaciones: Se ejecutará durante los primeros seis meses, en desembolsos mensuales iguales, para asegurar la disponibilidad de las áreas críticas de producción, almacenamiento y servicios auxiliares en los tiempos previstos.
- Costos diferidos: Serán asumidos mayoritariamente en el primer mes, con excepción del costo correspondiente a la puesta en marcha de equipos, que se ejecutará en el último mes, al momento de iniciar las pruebas y calibraciones necesarias.



- Adquisición de equipos de planta: Está prevista para los últimos seis meses del año (meses 7 al 12). La compra se realizará en partes iguales mensualmente, lo que permite escalar los pagos y organizar la logística de recepción, instalación y pruebas.
- Muebles, útiles y rodados: Estos bienes, que no requieren plazos prolongados de instalación ni montaje, se incorporarán en el último mes del año, justo antes del inicio de operaciones, para reducir costos de almacenamiento y optimizar su vida útil.

Debido a que las inversiones se efectúan en distintos momentos del año, para su análisis económico-financiero se procederá a la actualización al momento cero del proyecto, aplicando las tasas de descuento correspondientes a cada mes.

El primer paso para realizar este cálculo es determinar la tasa equivalente mensual a la tasa de descuento anual calculada para este proyecto.

CRONOGRAMA DE INVERSIONES		MES					
COSTOS (U\$D)	ITEM	1	2	3	4	5	6
\$0	TERRENO	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
-\$1,213,000	EDIFICIO E INSTALACIONES	-\$202,167	-\$202,167	-\$202,167	-\$202,167	-\$202,167	-\$202,167
-\$331,937	MAQUINARIA Y EQUIPOS	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
-\$269,000	RODADOS	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
-\$17,535	MUEBLES Y UTILES	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
-\$27,472	COSTOS DIFERIDOS	-\$27,472	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
-\$36,629	PUESTA EN MARCHA	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
	TOTAL	-\$229,639	-\$202,167	-\$202,167	-\$202,167	-\$202,167	-\$202,167
	VALOR ACTUALIZADO	-\$272,260	-\$239,689	-\$239,689	-\$239,689	-\$239,689	-\$239,689
	INVERSION INICIAL (U\$D)	-\$2,247,391					

7	8	9	10	11	12
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
-\$55,322.75	-\$55,322.75	-\$55,322.75	-\$55,322.75	-\$55,322.75	-\$55,322.75
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	-\$269,000.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	-\$17,535.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	-\$36,629.43
-\$55,322.75	-\$55,322.75	-\$55,322.75	-\$55,322.75	-\$55,322.75	-\$378,487.18
-\$65,590.65	-\$65,590.65	-\$65,590.65	-\$65,590.65	-\$65,590.65	-\$448,734.40

Tabla 10.6: Cronograma de Inversiones
Fuente: Elaboración propia



10.4. COSTOS DE OPERACIÓN

El análisis de los costos de operación permite estimar los recursos económicos necesarios para garantizar el funcionamiento continuo y sostenible de la planta durante un horizonte anual. Estos costos se dividen en **costos fijos**, que permanecen relativamente constantes independientemente del nivel de producción (sueldos del personal, servicios generales, seguros, administración, monitoreo ambiental y amortización de activos), y **costos variables**, que dependen directamente del volumen de residuos procesados y de biogás generado (insumos, consumos energéticos, disposición de fracciones no valorizables y transporte interno).

La identificación y cuantificación de estos componentes permite proyectar los **costos totales anuales**, los cuales constituyen una base esencial para evaluar la rentabilidad económica del proyecto, determinar tarifas de servicio y establecer estrategias de optimización operativa.

10.4.1. Costos fijos anuales

Los costos fijos corresponden a aquellos que permanecen constantes independientemente del nivel de operación de la planta. Representan los compromisos económicos necesarios para asegurar la continuidad del servicio y la disponibilidad de los activos. En este proyecto se consideran:

Sueldos del personal técnico y operativo: remuneraciones, cargas sociales y beneficios de operarios, supervisores, técnicos de biogás y generación, personal administrativo y de mantenimiento.

En el Capítulo “Gestión”, se presentó un análisis del organigrama de la empresa. Partiendo de esta información se determina cuáles son las funciones que componen la mano de obra permanente. En este caso se analiza cuáles son las personas que deben seguir prestando función para que la planta pueda seguir funcionando. Los resultados de este análisis se presentan en la siguiente tabla:

Categorías	Personal por turno			TOTAL	Sueldo bruto mensual (USD)	Total
	1° Turno	2° Turno	3° Turno			
Planta de separación						
Encargado de planta	1	0	0	1	\$400	\$4,800
Operarios de clasificación	8	0	0	8	\$350	\$33,600
Recepción de RSU	2	0	0	2	\$350	\$8,400
Vertedero						
Operarios de maquinaria	3	0	0	3	\$560	\$20,160
Control ambiental	1	0	0	1	\$400	\$4,800
Planta de biogás						
Técnicos de operación	2	2	2	6	\$400	\$28,800
Encargado de monitoreo ambiental	1	0	0	1	\$400	\$4,800
Planta de generación eléctrica						



Operadores	2	2	2	6	\$350	\$25,200
Técnico electromecánico	1	1	1	3	\$450	\$16,200
Administración						
Gerente	1	0	0	1	\$1,500	\$18,000
Subgerentes	2	0	0	2	\$1,000	\$24,000
Contador	1	0	0	1	\$850	\$10,200
Personal de higiene y seguridad	1	0	0	1	\$600	\$7,200
Personal de logística	1	0	0	1	\$600	\$7,200
TOTAL	27	5	5	37	\$8210	\$213360

Tabla 10.7: Personal empleado en la planta
Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla los sueldos anuales tienen un valor de U\$D 213360. Estos constituyen los costos fijos derogables de la empresa.

Los Servicios necesarios para el funcionamiento de la empresa se describen a continuación:

COSTO FIJO POR SERVICIOS	
SERVICIO	COSTO ANUAL (U\$D)
Teléfonos e Internet	-\$1,500.00
Limpieza	-\$6,000.00
Atención Médica	-\$20,000.00
Seguridad	-\$8,000.00
Comedor	-\$5,000.00
Gas	-\$5,000.00
Agua / Red Incendios / Matafuegos	-\$5,000.00
Transporte	-\$5,000.00
TOTAL	-\$55,500

Tabla 10.8: Costos por servicio
Fuente: Elaboración propia

Amortización de equipos y obras: distribución anual del costo de inversión en equipos principales, infraestructura civil y maquinaria, de acuerdo con la vida útil estimada de cada activo.



TABLA DE DEPRECIACIONES Y AMORTIZACIONES						
ACTIVOS TANGIBLES		Periodo de Depreciación	Porcentaje de Depreciación ANUAL	Depreciación ANUAL	Depreciación TOTAL	VALOR RESIDUAL
ITEM	Valor (U\$D)					
Edificio e Instalaciones	\$ 1,206,450.00	25	4.00%	\$48,258.00	\$482,580.00	- \$723,870.00
Maquinaria y Equipos	\$ 280,937.00	10	10.00%	\$28,093.70	\$280,937.00	\$0.00
Rodados	\$ 269,000.00	5	10.00%	\$26,900.00	\$269,000.00	\$0.00
Muebles y Útiles	\$ 15,383.00	3	10.00%	\$1,538.30	\$15,383.00	\$0.00
TOTAL				\$104,790.00	\$1,047,900.00	- \$723,870.00

ACTIVOS INTANGIBLES		Periodo de Amortización	Porcentaje de Amortización ANUAL	Amortización ANUAL
ITEM	Valor (U\$D)			
Costos Diferidos	-\$ 62,087.00	2	50.00%	-\$31,043.50

Tabla 10.9: Depreciaciones y amortizaciones
Fuente: Elaboración propia

10.4.2. Resumen de costos fijos

RESUMEN COSTOS FIJOS (U\$D/AÑO)	
Mano de obra fija	-\$213,360.00
Servicios	-\$55,500.00
Derogables	-\$268,860.00
Depreciaciones y Amortizaciones	-\$135,833.50
No derogables	-\$135,833.50
TOTAL	-\$404,693.50

Tabla 10.10: Resumen de costos fijos
Fuente: Elaboración propia



Resumen de costos fijos

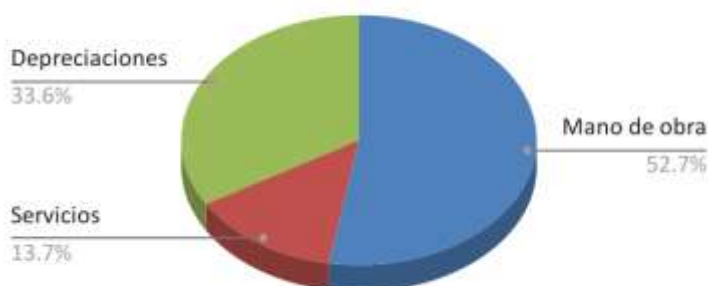


Figura 10.1: Resumen de costos fijos
Fuente: Elaboración propia

10.5. COSTOS VARIABLES ANUALES

Los costos variables del proyecto están directamente vinculados al nivel de operación y dependen tanto de la cantidad de residuos sólidos urbanos procesados como del volumen de biogás generado y purificado. A diferencia de otras industrias, la materia prima principal los residuos sólidos urbanos (RSU) no representa un costo de adquisición para la planta, dado que son entregados sin cargo a nuestras instalaciones por la Municipalidad de San Rafael, en el marco del convenio de cesión del predio y disposición controlada de residuos. Este aspecto constituye una ventaja competitiva relevante, ya que reduce de manera significativa el costo unitario de operación respecto de proyectos industriales convencionales que deben adquirir su materia prima.

Dentro de los costos variables a considerar se incluyen:

- Insumos operativos: filtros de aire y gas, lubricantes para motogeneradores, carbón activado para la remoción de siloxanos y medios adsorbentes para H_2S , cuya reposición periódica es esencial para mantener la eficiencia de purificación y la seguridad de los equipos.
- Energía eléctrica consumida en planta: asociada al funcionamiento de sistemas auxiliares como compresores, bombas de lixiviados, ventiladores y equipos de purificación de biogás.
- Disposición de residuos no valorizables: corresponde a la fracción que no puede ser recuperada en la planta de separación y debe ser confinada en el relleno sanitario, incluyendo costos de transporte interno y cobertura diaria.
- Transporte interno y logístico: consumo de combustible y mantenimiento de maquinaria pesada y camiones que operan en la conformación de celdas, cobertura de residuos y traslado de fracciones dentro del predio.

Estos costos presentan una relación proporcional al nivel de actividad de la planta, por lo que su adecuada estimación resulta fundamental para calcular indicadores económicos como el costo por tonelada tratada o el costo por metro cúbico de biogás purificado.



10.5.1. Supuestos de operación:

- Residuos sólidos urbanos tratados promedio: 65.832 ton/año
- Fracción no valorizable: 80% → 52.665 ton/año
- Biogás purificado: 300 m³/h × 7.920 h/año = 2.376.000 m³/año
- Electricidad auxiliar consumida: 54 kW × 8760 h = 473.040 kWh/año
- Combustible interno: 250 L/día × 330 días = 82.500 L/año

Concepto	Unidad	Cantidad anual	Precio unitario (USD)	Costo anual (USD)
Materia prima (RSU)	ton	65,832.00	0,00	\$0.00
Insumos operativos	lote	1.00	–	\$22,000.00
Energía eléctrica (auxiliares)	kWh	473,040.00	\$0.18	\$85,147.20
Disposición de residuos no valorizables	ton	52,665.00	\$3.00	\$157,995.00
Transporte interno y logístico	L diésel	82,500.00	\$1.10	\$90,750.00
Agua	m3	20,000.00	\$0.27	\$5,400.00
TOTAL COSTOS VARIABLES ANUALES				-\$361,292.20

Tabla 10.11: Costos variables anuales

Fuente: Elaboración propia

10.5.2. Costos totales anuales

La suma de los costos fijos y variables constituye el costo operativo anual del proyecto. Este valor es un insumo clave para el análisis de rentabilidad, ya que permite calcular indicadores económicos como el costo unitario por tonelada de residuo tratado, el costo por kWh generado y el período de recuperación de la inversión.

COSTOS EROGABLES ANUALES	
CF de Mano de Obra	-\$ 213.360,00
CF de Servicios	-\$ 55.500,00
CV	-\$ 361.292,20
TOTAL	-\$ 630.152,20

10.6. COSTOS UNITARIOS

El análisis de los costos unitarios permite evaluar la eficiencia económica del sistema y comparar los resultados del proyecto con parámetros de referencia en la industria. A partir de los costos totales de operación estimados en el apartado anterior, se determinan los siguientes indicadores:

- **COSTO POR UNIDAD DE ENERGÍA GENERADA (USD/MWH):**

Se calcula dividiendo el costo anual total de operación entre la cantidad de energía eléctrica neta generada y entregada a la red. Este indicador permite valorar la competitividad del proyecto frente a otras fuentes de generación eléctrica.

$$CEE = \frac{605213 \text{ USD/año}}{4730.4 \text{ Mw/año}} = 127.94 \text{ USD/Mw}$$



- **COSTO POR TONELADA DE RESIDUO TRATADO (USD/TON):**

Se obtiene dividiendo el costo anual de operación entre el total de toneladas de residuos sólidos urbanos procesados en el relleno y la planta de separación. Refleja el costo del servicio de disposición y valorización de residuos.

$$C_{RSU} = \frac{605213 \text{ USD/año}}{72280 \text{ TN/año}} = 8.37 \text{ USD/TN}$$

Este valor corresponde al valor de una tonelada de Residuo Sólido depositado en el vertedero. Puede usarse de referencia para darle un valor de deposición final a alguna empresa privada que quiera disponer sus residuos en el vertedero.

- **COSTO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS PURIFICADO (USD/M³):**

Se calcula dividiendo el costo anual asociado a la captura, conducción y purificación de biogás entre el volumen total de biogás purificado disponible para combustión en motogeneradores. Permite estimar el valor económico del biogás como insumo energético.

$$C_{\text{Biogás}} = \frac{605213 \text{ USD/año}}{1766196.80 \text{ M}^3/\text{año}} = 0.34 \text{ USD/M}^3$$

10.7. INGRESOS PROYECTADOS

Los ingresos proyectados del sistema provienen de diferentes fuentes asociadas tanto a la valorización energética como a la gestión integral de residuos. La diversificación de estas fuentes constituye una estrategia clave para garantizar la sostenibilidad económica del proyecto a lo largo del tiempo.

Las principales categorías de ingresos son:

- **VENTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA AL SISTEMA:**

Constituye la fuente principal de ingresos. Se calcula a partir de la energía eléctrica neta generada por los motogeneradores y entregada a la red, multiplicada por la tarifa vigente de compra de energía renovable o proveniente de biogás.

- **VENTA DE MATERIALES RECICLADOS RECUPERADOS:**

Incluye los ingresos derivados de la comercialización de materiales valorizables (cartón, plásticos, metales, vidrio) separados en la planta de clasificación, en función de su volumen recuperado y el precio de mercado.

La venta de materiales reciclables constituye una fuente de ingresos relevante para la operación de la planta, contribuyendo a la diversificación de las entradas económicas y a la mejora del flujo de caja operativo. Además del ingreso directo por la venta de energía, los retornos por comercialización de fracciones valorizables (plásticos, metales y papel/cartón) reducen el costo neto por tonelada tratada y mejoran la rentabilidad global del proyecto,



siempre que se asegure una logística de separación y almacenamiento eficiente y controles básicos de calidad.

No obstante, para estimar los ingresos de forma conservadora y realista se aplican coeficientes de recuperación efectivos por tipo de material. En el caso de plásticos rígidos de alto valor como PET y polietileno de alta densidad (PEAD), se ha considerado que solo el 50% de la fracción teórica será efectivamente vendible. Esta decisión responde a la experiencia operativa: una proporción significativa del material llega contaminada (suciedad, aceites, residuos orgánicos) o en condiciones que impiden su aceptación por compradores industriales, lo que reduce la cantidad comercializable y exige desestimar la fracción no apta. De igual modo, para los metales ferrosos se aplica también un factor de 0,5, dada la mayor dificultad práctica para consolidar volúmenes homogéneos y encontrar compradores de chatarra en condiciones comerciales favorables; ello está asociado a fluctuaciones del mercado local, requisitos de calidad y costos de almacenamiento y separación adicionales.

Venta de reciclables								
Año	Tn de Reciclables	PEAD	PET	Papel	Cartón	Vidrio	Metal ferroso	TOTAL
2025	63099	67718.75	74366.68	71549.76	359550.28	74682.74	170569.51	\$818,437.71
2026	63646	68305.80	75011.36	72170.02	362667.19	75330.16	172048.17	\$825,532.68
2027	64192	68891.77	75654.86	72789.14	365778.40	75976.39	173524.12	\$832,614.68
2028	64739	69478.82	76299.54	73409.40	368895.31	76623.81	175002.77	\$839,709.65
2029	65285	70064.79	76943.04	74028.53	372006.52	77270.04	176478.72	\$846,791.65
2030	65832	70651.84	77587.71	74648.79	375123.44	77917.46	177957.37	\$853,886.61
2031	66378	71237.82	78231.21	75267.91	378234.65	78563.70	179433.32	\$860,968.61
2032	66925	71824.87	78875.89	75888.17	381351.56	79211.12	180911.98	\$868,063.58
2033	67471	72410.84	79519.39	76507.29	384462.77	79857.35	182387.93	\$875,145.58
2034	68018	72997.89	80164.07	77127.55	387579.69	80504.77	183866.58	\$882,240.55
2035	68564	73583.86	80807.57	77746.68	390690.90	81151.00	185342.53	\$889,322.55

Tabla 10.12: Ingresos por venta de reciclables

Fuente: Elaboración propia

La tabla de precios de los materiales reciclables, que se presenta en el Capítulo 3 (Tamaño y localización del proyecto), se utilizó como base para estimar los ingresos por la venta de fracciones valorizables; los valores unitarios empleados provienen de la base de datos sectorial de Conexión Reciclado (<https://www.conexionreciclado.com.ar/recursos>), consultada el 12 de septiembre de 2025. Estos precios se aplican junto con los factores de sensibilidad ya descritos para obtener una proyección prudente y coherente de los ingresos anuales por reciclables que se incorporan al flujo de caja del proyecto.

Material	Mínimo (\$/Kg)	Máximo (\$/Kg)	Promedio (\$/Kg)
PEAD	\$590.00	\$612.00	\$601.00
PET	\$60.00	\$600.00	\$330.00
Papel	\$50.00	\$200.00	\$125.00
Cartón	\$85.00	\$180.00	\$123.50



Vidrio	\$41.00	\$50.00	\$45.50
Aluminio	\$1,300.00	\$2,210.00	\$1,755.00
Material ferroso	\$700.00	\$800.00	\$750.00

Tabla 10.13: precios de los reciclables

Fuente: Elaboración propia

- CARGOS POR RECEPCIÓN DE BASURA DE PRIVADOS:

Corresponde al cobro de una tarifa por tonelada a generadores privados de residuos (empresas, industrias, grandes comercios), que utilizan el servicio de disposición final en el relleno sanitario controlado. Una vez mencionadas y analizadas las distintas fuentes de ingresos del proyecto venta de energía eléctrica al sistema interconectado, comercialización de materiales reciclables, beneficios potenciales por certificados de energía limpia y cargos por recepción de residuos se procede a presentar la **tabla de ingresos anuales proyectados**. En ella se integran y cuantifican los aportes de cada flujo de ingresos, permitiendo visualizar de forma consolidada el total anual estimado que será incorporado al flujo de fondos del proyecto.

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
MWh/año Venta	4730.4	4730.4	4730.4	4730.4	4730.4
Precio de venta (USD)	\$160	\$160	\$160	\$160	\$160
Total de energía			\$756,864	\$756,864	\$756,864
Precio de reciclables	\$ 818,437.71	\$ 825,532.68	\$ 832,614.68	\$ 839,709.65	\$ 846,791.65
Total	\$ 818,437.71	\$ 825,532.68	\$ 1,589,478.68	\$ 1,596,573.65	\$ 1,603,655.65

Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
4730.4	4730.4	4730.4	4730.4	4730.4
\$160	\$160	\$160	\$160	\$160
\$756,864	\$756,864	\$756,864	\$756,864	\$756,864
\$ 860,968.61	\$ 868,063.58	\$ 875,145.58	\$ 882,240.55	\$ 889,322.55
\$ 1,617,832.61	\$ 1,624,927.58	\$ 1,632,009.58	\$ 1,639,104.55	\$ 1,646,186.55

Tabla 10.14: Ingresos del proyecto

10.8. ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

El análisis de rentabilidad permite determinar la viabilidad económica del proyecto y su conveniencia en relación con otras alternativas de inversión. Para ello se emplean herramientas clásicas de evaluación financiera, considerando tanto el valor del dinero en el tiempo como la capacidad de generar retornos sostenibles. A continuación, se presentan los principales indicadores de evaluación económica aplicados al proyecto.

10.7.1. Horizonte de evaluación y supuestos

Se establece un **horizonte de evaluación de 10 años**, en concordancia con la vida útil proyectada de la infraestructura principal del relleno sanitario, la planta de biogás y los moto generadores. La tasa de descuento se define de acuerdo con las condiciones de financiamiento y el costo de oportunidad del capital. Asimismo, se asumen supuestos de



operación estable, con volúmenes de residuos y generación energética representativos de la capacidad de diseño de la planta.

10.7.2. Flujo de caja

El flujo de fondos anual se construye considerando los **ingresos proyectados** (venta de energía, venta de reciclables, bonos de carbono y tarifas de disposición) frente a los **egresos** (costos fijos, variables, capital de trabajo y reposiciones mayores). El balance entre ambas partidas permite obtener el flujo neto de caja de cada año del horizonte de evaluación. Este flujo constituye la base para el cálculo de los indicadores financieros del proyecto



AÑO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos por Venta		\$818.437,71	\$825.532,68	\$1.589.478,68	\$1.596.573,65	\$1.603.655,65	\$1.617.832,61	\$1.624.927,58	\$1.632.009,58	\$1.639.104,55	\$1.646.186,55
Impuesto - Ingresos Brutos (4%)		-\$32.737,51	-\$63.579,15	-\$63.862,95	-\$64.146,23	-\$64.146,23	-\$64.713,30	-\$64.997,10	-\$65.280,38	-\$65.564,18	-\$65.847,46
INGRESOS NETOS		\$785.700,20	\$761.953,53	\$1.532.710,70	\$1.532.427,42	\$1.539.509,42	\$1.553.119,31	\$1.559.930,48	\$1.566.729,20	\$1.573.540,37	\$1.580.339,08
Costos Fijos de Producción		-\$268.860,00	-\$268.860,00	-\$268.860,00	-\$268.860,00	-\$268.860,00	-\$268.860,00	-\$268.860,00	-\$268.860,00	-\$268.860,00	-\$268.860,00
Costos Variables de Producción		-\$361.292,20	-\$361.292,20	-\$361.292,20	-\$361.292,20	-\$361.292,20	-\$361.292,20	-\$361.292,20	-\$361.292,20	-\$361.292,20	-\$361.292,20
Depreciaciones		-\$110.151,95	-\$110.151,95	-\$110.151,95	-\$110.151,95	-\$110.151,95	-\$110.151,95	-\$110.151,95	-\$110.151,95	-\$110.151,95	-\$110.151,95
Amortizaciones		-\$32.050,75	-\$32.050,75								
UTILIDADES ANTE IMPUESTOS		\$13.345,30	-\$10.401,37	\$792.406,55	\$792.123,27	\$799.205,27	\$812.815,16	\$819.626,33	\$826.425,05	\$833.236,22	\$840.034,93
Impuestos a las ganancias (35%)		-\$4.670,86	\$3.640,48	-\$277.342,29	-\$277.243,15	-\$279.721,84	-\$284.485,31	-\$286.869,21	-\$289.248,77	-\$291.632,68	-\$294.012,23
UTILIDAD NETA		\$8.674,45	-\$6.760,89	\$515.064,26	\$514.880,13	\$519.483,43	\$528.329,85	\$532.757,11	\$537.176,28	\$541.603,54	\$546.022,71
Depreciaciones		\$110.151,95	\$110.151,95	\$110.151,95	\$110.151,95	\$110.151,95	\$110.151,95	\$110.151,95	\$110.151,95	\$110.151,95	\$110.151,95
Amortizaciones		\$32.050,75	\$32.050,75								
Inversión Inicial (I₀)	-\$2.247.391,35										
Capital de Trabajo	-\$152.764,17										\$152.764,17
Valor Residual (VR)											\$727.800,00
FLUJO DE CAJA	-\$2.400.155,52	\$150.877,15	\$135.441,81	\$625.216,21	\$625.032,08	\$629.635,38	\$638.481,80	\$642.909,06	\$647.328,23	\$651.755,49	\$1.536.738,83
VAN	-\$ 204.465,30										
TIR	16,69361%										
CAE	-\$ 917.915,77										
Tasa de Descuento (r)	0,1856										

Tabla 10.15: Flujo de caja del proyecto

Fuente: Elaboración propia



10.7.3. Valor Actual Neto (VAN)

El VAN se obtiene actualizando los flujos netos de caja al presente mediante la tasa de descuento definida. Un VAN positivo indica que el proyecto genera un valor superior al costo del capital invertido, mientras que un VAN negativo implica que la inversión no es rentable en las condiciones analizadas. Este indicador es uno de los criterios más utilizados en la toma de decisiones de inversión.

VAN	-\$ 169,822.99
------------	-----------------------

10.7.4. Tasa Interna de Retorno (TIR)

La TIR corresponde a la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Representa la rentabilidad relativa del proyecto en términos porcentuales y permite compararlo con otras alternativas de inversión. En este estudio, se evaluará si la TIR obtenida supera la tasa mínima aceptable de retorno definida para el sector energético y ambiental

TIR	16.98860%
------------	------------------

10.7.5. Período de Recuperación (Payback)

El período de recuperación mide el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a partir de los flujos netos generados por la operación. Este indicador, si bien no considera el valor del dinero en el tiempo, es de gran utilidad práctica ya que refleja el lapso en que el proyecto comienza a generar beneficios netos.

Si los flujos fuesen idénticos y constantes en cada periodo, el cálculo se simplifica en la siguiente expresión:

$$PR = \frac{I_0}{BN}$$
$$PR = \frac{2203215}{970088} = 2.27$$

Periodo de recupero: 2 años y 3 meses

La ventaja de la simplicidad de cálculo no logra contrarrestar los peligros de sus desventajas. Entre estas cabe mencionar que el criterio ignora las ganancias posteriores al periodo de recuperación, subordinando la aceptación a un factor de liquidez más que de rentabilidad. Tampoco considera el valor tiempo del dinero, al asignar igual importancia a los fondos generados el primer año que a los del año n.

10.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad tiene por objetivo evaluar cómo variaciones en los parámetros más relevantes del proyecto afectan los indicadores de rentabilidad (VAN, TIR y período de recuperación). De esta manera, se identifican los factores críticos y se determina el grado de robustez del proyecto ante escenarios de incertidumbre.



En particular, se analizarán las siguientes variables:

- ***IMPACTO DE VARIACIONES EN LA TARIFA DE VENTA DE ENERGÍA:***

Dado que la venta de electricidad constituye la principal fuente de ingresos, se simula el efecto de aumentos o reducciones en la tarifa reconocida por kWh inyectado a la red. Una disminución significativa podría reducir la competitividad del proyecto, mientras que aumentos potenciarán los resultados financieros.

- ***CAMBIOS EN EL PRECIO DE MATERIALES RECICLABLES:***

Los ingresos por venta de materiales (cartón, plásticos, metales) dependen de los precios de mercado, los cuales suelen presentar volatilidad. Se evalúa la sensibilidad de la rentabilidad frente a escenarios de caída o alza en los valores de comercialización.

- ***VARIACIONES EN LA INVERSIÓN INICIAL:***

La inversión de capital fijo puede verse afectada por cambios en los costos de construcción, equipos importados y tipo de cambio. Se analiza el efecto de incrementos en la inversión inicial sobre el VAN y el período de recuperación.

- ***AUMENTO DE COSTOS OPERATIVOS:***

Incluye incrementos en insumos (lubricantes, filtros, carbón activado), energía auxiliar y servicios contratados. Se estima el impacto de un aumento porcentual en los costos fijos y variables sobre la viabilidad económica del proyecto.

Sensibilización de la generación de biogás producida:

La generación de biogás no es un aspecto fácil de predecir, se encuentra afectado a muchas variables, estas variables son difíciles de pronosticar ya que se necesitan mucho tiempo de aprendizaje sobre el estado de los residuos y de la operación del vertedero.

En este caso se presentan cinco escenarios distintos, donde uno es el menos probable que sería la disminución de la producción de biogás con la misma generación de residuos.

- Escenario 1: Disminución de un 3% de la producción de biogás
- Escenario 2: Aumento de un 2% de la producción de biogás
- Escenario 3: Aumento de un 4% de la producción de biogás
- Escenario 4: Aumento de un 6% de la producción de biogás
- Escenario 5: Aumento de un 8% de la producción de biogás



		VAN	TIR
Escenario 0:	0%	-\$ 204.465,30	16,7%
Escenario 1:	-3%	-\$ 244.442,83	16,3%
Escenario 2:	2%	-\$ 177.793,30	16,9%
Escenario 3:	4%	-\$ 150.823,80	17,2%
Escenario 4:	6%	-\$ 123.883,50	17,4%
Escenario 5:	8%	-\$ 96.844,00	17,7%

Tabla 10.16: Análisis de sensibilidad

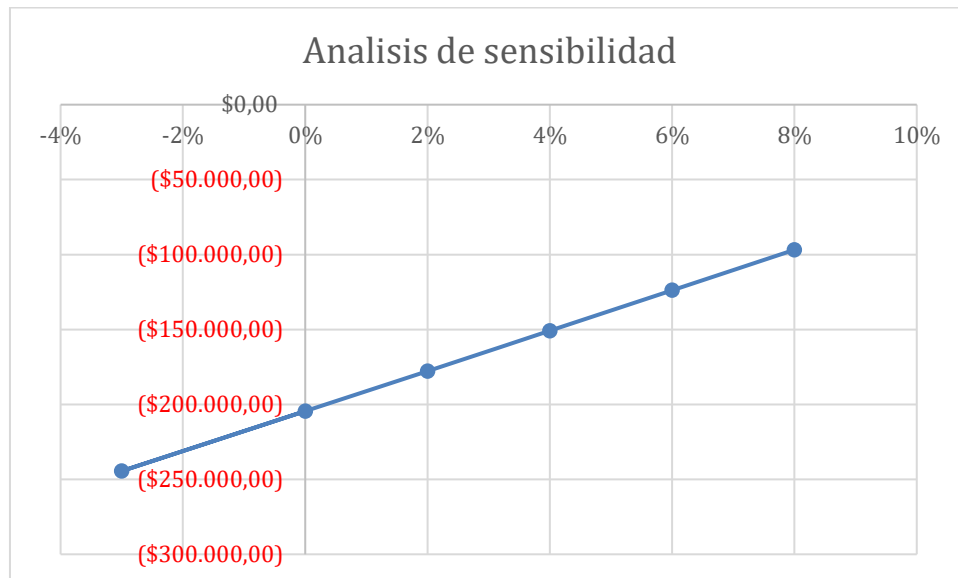


Figura 10.2: Análisis de sensibilidad

Podemos observar que existe un aumento del VAN a medida que la producción y absorción del biogás va aumentando. Entonces con una buena separación de la Materia Orgánica y un buen control del vertedero podemos hacer que este proyecto sea cada vez más rentable.

10.9. CONCLUSIONES ECONÓMICAS

Si bien el análisis económico demuestra que el proyecto no presenta una rentabilidad directa en términos financieros, la realidad actual del vertedero de La Tombina en San Rafael evidencia una gestión inadecuada de los residuos, con un impacto ambiental significativo. En este contexto, la implementación de un sistema de captura y aprovechamiento de biogás no debe evaluarse únicamente desde la perspectiva económica, sino como una estrategia de compensación ambiental que contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, mejora las condiciones de manejo de los residuos y genera externalidades positivas para la comunidad.



CAPITULO 11

CONCLUSIONES DEL PROYECTO

El aprovechamiento de biogás de residuos sólidos urbanos para generar energía eléctrica, a partir de la instalación de una planta en la ciudad de San Rafael, se presenta como un proyecto viable en la búsqueda de una solución a una correcta gestión de residuos en la zona.

Principalmente, el hecho de que en la actualidad se busca optar por tecnologías limpias, fomentando el cuidado del medio ambiente y la economía circular dando una mayor vida a los residuos y un aprovechamiento después de su deposición final, permite una clara ventaja en la consideración de proyectos de esta índole.

Este informe describe los graves problemas que tiene el basurero municipal “La Tombina” con el mal manejo de los residuos y a su vez las grandes ventajas que presentan proyectos de recuperación y valorización de estos mismos.

Con lo anterior mencionado, y dados los ingresos detallados en el análisis económico-financiero a partir de la venta de la energía eléctrica y los residuos reciclables que se puedan llegar a obtener en la planta de separación, se puede determinar la factibilidad del proyecto.

Con los resultados obtenidos, se concluye que el proyecto no es rentable, aunque la Tasa Interna de Retorno, se encuentra por encima del rango propio de proyectos renovables, que varían entre 10% a 14%, siendo esta de 16,7%. Por su parte, el cálculo del VAN arroja un resultado de \$ -204465.30 USD, lo cual al ser menor a cero indica que se pierde dinero al cabo de 10 años de estudio.

Aunque el estudio económico evidencia resultados negativos en términos de rentabilidad financiera, es necesario considerar el elevado costo ambiental asociado a la actual disposición de residuos en un vertedero a cielo abierto. La valorización de los residuos al final de su vida útil mediante la captura y aprovechamiento de biogás representa una alternativa que, si bien difícil de cuantificar en términos estrictamente económicos, incorpora beneficios ambientales y sociales significativos. Bajo esta perspectiva, el proyecto puede considerarse viable para el municipio de San Rafael, dado que contribuye a mitigar los impactos ambientales, mejora la gestión de los residuos y genera externalidades positivas que trascienden la evaluación financiera convencional.



BIBLIOGRAFIA

- Manual de biogás minenergía / pnud / fao / gef editado por: "chile: remoción de barreras para la electrificación rural con energías renovables".
- Gestión integral de residuos sólidos urbanos: presidente de la asociación interamericana de ingeniería sanitaria y ambiental – aidis dra. Pilar Tello Espinoza. Editores: Dra. Pilar Tello Espinoza, Dr. Darci campani, ing. Mba diana rosalba sarafian
- Principales tecnologías de purificación de biogás: universidad nacional del litoral
- Memoria cálculo generación de lixiviados y sistema de gestión centro ambiental el borbollón
- Gestión de rsu en argentina
<https://www.argentina.gob.ar/ambiente/observatorioresiduos/solidosurbanos/gestion>
- Tchobanoglous g., theisen h. Y vigil s. (1994). "gestión integral de residuos sólidos"
- Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental. Cuarta edición
- Programa de gestión integral de residuos sólidos urbanos. Documentos del banco interamericano de desarrollo argentina.
- Landfill gas emissions model (landgem)
- Metodología para el diseño de un sistema de captación y aprovechamiento de biogás proveniente de residuos sólidos urbanos