



**Recopilación de antecedentes técnicos y económicos para
Norma de Emisión de Metano para Rellenos Sanitarios
ID Licitación: 608897-63-LE25**

Estudio solicitado por Subsecretaría del Medio Ambiente

INFORME FINAL

Santiago, 16 de junio de 2026

Título del Proyecto

Recopilación de antecedentes técnicos y económicos para Norma de Emisión de Metano para Rellenos Sanitarios

Autores:

Jefe de proyecto: Luis Cifuentes Lira
Especialistas: César Sáez, Cristóbal De La Maza,
Camila Cabrera Castro
Ingeniero Senior de Proyecto: Pablo Cortés Arias
(Coordinador)
Ingenieros de Proyectos: Scarlett Cárdenas, Sayén
Santander, Renato Cid

Empresa: Dictuc S.A.

RUT: 96.691.330-4

Dirección: Vicuña Mackenna N° 4860, Macul –
Santiago

Datos Mandante

Razón Social: Subsecretaría del Medio Ambiente
RUT: 61.979.930-5
Dirección: San Martín 73, Santiago, RM

Resumen

Según la Ley Marco de Cambio Climático (LMCC) y compromisos internacionales, Chile debe elaborar una norma de emisión de metano para rellenos sanitarios para reducir este gas y cumplir metas de neutralidad al 2050. El presente estudio tiene por objetivo proveer insumos técnicos y económicos para definir dicha norma de emisión, incluyendo la revisión de marcos normativos nacionales e internacionales, la caracterización de los sitios y sus emisiones, la evaluación de tecnologías de mitigación, el diseño de escenarios normativos, la definición de mecanismos de monitoreo y el análisis técnico-económico de las alternativas planteadas.

Cuerpo del informe

292 hojas (incluye portada)

Fecha del informe

16/06/2026

Información Contractual

Correlativo Contrato: 3849
OC N°: 608897-7190-SE25

Contraparte técnica

Nombre: Cristina Figueroa
Cargo: Coordinadora de instrumentos de
Precio al Carbono y Mercado de
Carbono, División de Cambio Climático
E-mail: cfigueroa@mma.gob.cl



Sr. Luis A. Cifuentes
Director Unidad GreenLab
Dictuc S.A.

Sr. Felipe Bahamondes
Gerente General
Dictuc S.A.

Tabla de Contenidos

Normas Generales	XII
Resumen Ejecutivo	XIII
1. Antecedentes y justificación del estudio	1
2. Objetivos del estudio	4
3. Marco de referencia de normas de emisión de metano e instrumentos relacionados internacionales y nacionales	7
4. Caracterización de los rellenos sanitarios del país	37
5. Prácticas de operación y Soluciones tecnológicas aplicables que permiten la reducción de emisiones de metano en los rellenos sanitarios del país	96
6. Propuesta de escenarios para una Norma de Emisión de Metano en Rellenos Sanitarios 112	
7. Análisis y sistematización de los elementos técnicos, operativos y regulatorios contenidos en el DS N°189 actualizado y Criterios de coherencia y complementariedad con otros instrumentos de gestión ambiental	172
8. Propuesta de mecanismos de monitoreo para la fiscalización y cumplimiento de la futura norma y de la modificación del decreto supremo N°189/2005 MINSAL.....	185
9. Análisis técnico y económico de los escenarios de norma de emisión propuestos	197
10. Conclusiones	231
11. Bibliografía.....	235
12. Anexos	240

Lista de Tablas

Tabla 2-1 Actividades abordadas en el informe	5
Tabla 3-1 Levantamiento de normas de emisión e instrumentos que restringen las emisiones de metano en rellenos sanitarios	8
Tabla 3-2 Descripción de parámetros de caracterización de normativas	9
Tabla 3-3 Resumen de los límites de concentración CH ₄ para rellenos sanitarios – Normativas Internacionales	12
Tabla 3-4 Resumen de políticas macro de GEI – Normativas Internacionales	13
Tabla 3-5 Resumen de la información disponible de MRV-F para CH ₄ – Normativas Internacionales*	13
Tabla 3-6 Requisito de capacidad y característica del relleno que requiere sistema de control y recolección de gas.....	17
Tabla 3-7 Variable de frecuencia de monitoreo	23
Tabla 3-8 Frecuencia de monitoreo para Reino Unido.....	26
Tabla 3-9 Criterios de evaluación de ventajas y desventajas de los instrumentos normativos de emisiones de metano para rellenos sanitarios.....	34
Tabla 3-10 Jerarquía Internacional de instrumentos regulatorios de emisiones de metano en rellenos sanitarios.....	36
Tabla 4-1 Número de sitios por tipo sitio y estado operación	38
Tabla 4-2 Número de sitios por tipo de sitio y estado de operación, por región.....	38
Tabla 4-3 Descripción de parámetros de caracterización de SDF	40
Tabla 4-4 Parámetros utilizados de las Directrices del IPCC para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero	55
Tabla 4-5 Homologación tipos SDF a nivel nacional según las Directrices del IPCC 2006.....	67
Tabla 4-6 Comparación metodología y parámetros entre INGEI y GreenLab-Dictuc para RSD ...	69
Tabla 4-7 Comparación metodología y parámetros entre INGEI y GreenLab-Dictuc para RSI	74
Tabla 4-8 Comparación metodología y parámetros entre SNP y GreenLab-Dictuc	87
Tabla 5-1 Eficiencia de captura de gas respecto diferentes materiales de cobertura	97
Tabla 5-2 Condiciones de implementación de medidas de control	104
Tabla 5-3 Resumen costos y potencial de reducción de medidas de control de metano en rellenos sanitarios.....	105
Tabla 5-4 Evaluación de medidas tecnológicas para la reducción	106
Tabla 5-5 Descripción de parámetros para tecnologías identificadas.....	110
Tabla 5-6 Tecnologías de monitoreo de concentraciones y flujo de biogás	110
Tabla 6-1 Agrupaciones posibles de rellenos sanitarios	130
Tabla 6-2 Clasificación de rellenos sanitarios según volumen de residuos recibidas	130
Tabla 6-3 Zona territorial y climática por región	131
Tabla 6-4 Definición de variables para el cálculo de la emisión asignada y la reducción requerida	136

Tabla 6-5 ED1: Reducción Proporcional Uniforme	137
Tabla 6-6 ED2: Diferenciado por Tamaño del Relleno.....	137
Tabla 6-7 ED3: Diferenciado por Zona Climática y Tamaño del Relleno	138
Tabla 6-8 Evolución temporal de la emisión asignada EA(t) según escenario temporal	138
Tabla 6-9 Escenarios Umbral de Excedencias	140
Tabla 6-10 Características del escenario distributivo 1 para rellenos sanitarios grandes al año 2030	142
Tabla 6-11 Características del escenario distributivo 1 para rellenos sanitarios grandes al año 2050	143
Tabla 6-12 Características del escenario distributivo 1 para rellenos sanitarios medianos al año 2030	144
Tabla 6-13 Características del escenario distributivo 1 para rellenos sanitarios medianos al año 2050	145
Tabla 6-14 Características del escenario distributivo 1 para rellenos sanitarios pequeños al año 2030	146
Tabla 6-15 Características del escenario distributivo 1 para rellenos sanitarios pequeños al año 2050	147
Tabla 6-16 Características del escenario distributivo 2 para rellenos sanitarios grandes al año 2030	149
Tabla 6-17 Características del escenario distributivo 2 para rellenos sanitarios grandes al año 2050	149
Tabla 6-18 Características del escenario distributivo 2 para rellenos sanitarios medianos al año 2030	150
Tabla 6-19 Características del escenario distributivo 2 para rellenos sanitarios medianos al año 2050	151
Tabla 6-20 Características del escenario distributivo 2 para rellenos sanitarios pequeños al año 2050	152
Tabla 6-21 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios grandes zona climática seca al año 2030	154
Tabla 6-22 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios grandes zona climática húmeda al año 2030.....	155
Tabla 6-23 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios grandes zona climática seca al año 2050	156
Tabla 6-24 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios grandes zona climática húmeda al año 2050.....	157
Tabla 6-25 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios medianos zona húmeda al año 2030	158
Tabla 6-26 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios medianos zona seca al año 2050.....	159

Tabla 6-27 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios medianos zona húmeda al año 2050	160
Tabla 6-28 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios pequeña zona seca al año 2050.....	161
Tabla 6-29 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios pequeña zona húmeda al año 2050	162
Tabla 6-30 Eficiencia mínima, nominal y máxima de captura, destrucción y oxidación por tecnología.....	165
Tabla 6-31 Fórmulas y descripción considerada para eficiencias cadenas tecnológicas	165
Tabla 6-32 Eficiencia de reducción captura por cadena tecnológica	166
Tabla 6-33 Tecnología de referencia mínima para los escenarios distributivos	167
Tabla 6-34 Certificados de excedencia permitidos por unidad fiscalizable para el cumplimiento de la norma de emisión, Escenario Distributivo 1	168
Tabla 6-35 Certificados de excedencia permitidos por unidad fiscalizable para el cumplimiento de la norma de emisión, Escenario Distributivo 2	169
Tabla 6-36 Certificados de excedencia permitidos por unidad fiscalizable para el cumplimiento de la norma de emisión, Escenario Distributivo 3	170
Tabla 7-1 Factores de línea base normativa por el DS189 para los MDL	180
Tabla 8-1 Cadenas tecnológicas para sistemas de captura activa de biogás	187
Tabla 8-2 Cadenas tecnológicas para sistemas de captura pasiva de biogás.....	188
Tabla 8-3 Acciones de la Medida 2 del PSM vinculadas al monitoreo, reporte y verificación (MRV)	194
Tabla 9-1 Emisión por periodo desde proyección propia	197
Tabla 9-2 Potencial de reducción por escenario distributivo (ED) y temporal (ET) por periodo en comparación línea base	198
Tabla 9-3 Reducción por escenario distributivo (ED) y temporal (ET) por periodo	199
Tabla 9-4 Mitigación esperada PSM	199
Tabla 9-5 Potencial de reducción por escenario distributivo y temporal por periodo en comparación PSM	200
Tabla 9-6 Combinaciones tecnológicas evaluadas: tipo, E/G nominal y referencia de inversión	200
Tabla 9-7 Parámetros del modelo de costos	206
Tabla 9-8 Parámetros de eficiencia y razón E/G por cadena tecnológica	208
Tabla 9-9 Comparativa sectorial de costos de cumplimiento. TSD = 5,5%. Negativo	209
Tabla 9-10 Resumen Costos ED1	212
Tabla 9-11 Resumen Costos ED2	215
Tabla 9-12 Resumen Costo ED3	218
Tabla 9-13 Co-beneficios asociados a cumplimiento de medidas de reducción de metano	226
Tabla 9-14 Matriz de análisis comparativo entre escenarios de norma	227

Tabla 12-1 Caracterización de regulaciones por países – Resumen, fuentes y contaminantes regulados.....	240
Tabla 12-2 Caracterización de regulaciones por país – Monitoreo, Reporte, Verificación y Fiscalización	247
Tabla 12-3 Sitios de disposición identificados 2023	264
Tabla 12-4 Límites Escenario Distributivo E1*	267
Tabla 12-5 Límites Escenario Distributivo E2*	268
Tabla 12-6 Límites Escenario Distributivo E3*	270
Tabla 12-7 Resumen parámetros calibración	276

Lista de Figuras

Figura 4-1 Sitios de disposición en Chile 2023.....	39
Figura 4-2 Esquema de obtención de la composición por sitio de disposición	42
Figura 4-3 Composición promedio de materia orgánica por categoría de sitio de disposición final (SDF) en Chile al año 2025	42
Figura 4-4 Vista general del modelo de residuos Analytica.....	43
Figura 4-5 Procedimiento general NA RSD, módulo “RSD 1950-2024”	44
Figura 4-6 Procedimiento general NA RSD, módulo “Proporcion Poblacion Comunal”	44
Figura 4-7 Procedimiento asignación SDF a RSD y RSI, modulo “Generación residuos por SDF”	45
Figura 4-8 Procedimiento general para estimar los niveles de actividad de residuos sólidos domiciliarios (RSD)	46
Figura 4-9 Nivel de actividad para residuos sólidos domiciliarios (RSD) de los SDF en Chile (1950-2024), datos apilados.....	47
Figura 4-10 Procedimiento general NA RSI, módulo “RSI 1950-2024”	48
Figura 4-11 Procedimiento general NA RSI, módulo “Prop. Empresas Comunales en Region” ...	48
Figura 4-12 Procedimiento para estimar los niveles de actividad de residuos sólidos industriales (RSI)	50
Figura 4-13 Nivel de actividad para residuos sólidos industriales (RSI) de los SDF en Chile (1950-2024)	51
Figura 4-14 Árbol de decisión para las emisiones de CH ₄ provenientes de los SDF	52
Figura 4-15 Procedimiento general generación de metano, módulo “Generacion Metano”	56
Figura 4-16 Generación de metano total desde sitios de disposición final (SDF) por residuos sólidos municipales en Chile, en ktCO ₂ eq. (1950-2024)	57
Figura 4-17 Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) en Chile, en ktCO ₂ eq. (1950-2024)	57
Figura 4-18 Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO ₂ eq. (1950-2024)	58

Figura 4-19 Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según composición de los residuos en Chile, datos apilados, en ktCO ₂ eq. (1950-2024).....	59
Figura 4-20 Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según composición de los residuos y la perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO ₂ eq. (1950-2024)...	60
Figura 4-21 Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según región de Chile y su perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO ₂ eq. (1950-2024).....	61
Figura 4-22 Generación de metano total desde sitios de disposición final (SDF) por residuos sólidos industriales en Chile, en ktCO ₂ eq. (1950-2024)	62
Figura 4-23 Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) en Chile, en ktCO ₂ eq. (1950-2024)	62
Figura 4-24 Generación de metano total por RSI, según tipo de sitio de disposición final (SDF) y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO ₂ eq. (1950-2024)	63
Figura 4-25 Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según la composición de los residuos en Chile, datos apilados, en ktCO ₂ eq. (1950-2024)	64
Figura 4-26 Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según composición de residuos y la perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO ₂ eq. (1950-2024)	65
Figura 4-27 Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según región de Chile y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO ₂ eq. (1950-2024)	66
Figura 4-28 Comparación INGEL: Generación de metano total desde sitios de disposición final (SDF) por residuos sólidos municipales en Chile (1950-2024).....	70
Figura 4-29 Comparación INGEL: Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) en Chile (1950-2024), datos apilados	71
Figura 4-30 Comparación INGEL: Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) y perspectiva territorial (1950-2024), datos apilados	72
Figura 4-31 Comparación INGEL: Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según región de Chile y perspectiva territorial (1950-2024), datos apilados	73
Figura 4-32 Comparación INGEL: Generación de metano total desde sitios de disposición final (SDF) por residuos sólidos industriales en Chile (1950-2024)	75
Figura 4-33 Comparación INGEL: Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) en Chile (1950-2024), datos apilados	75
Figura 4-34 Comparación INGEL: Generación de metano por residuos sólidos industriales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) y perspectiva territorial (norte-sur) (1950-2024), datos apilados	76
Figura 4-35 Comparación INGEL: Generación de metano por residuos sólidos industriales, según región de Chile y perspectiva territorial (norte-sur) (1950-2024), datos apilados.....	77
Figura 4-36 Procedimiento para proyectar las emisiones de CH ₄	78
Figura 4-37 Proyección de la generación de metano total por residuos sólidos domiciliarios en Chile (2024-2050).....	79

Figura 4-38 Proyección de la generación de metano por residuos sólidos domiciliarios, según tipo de Sitio de Disposición Final, en Chile (2025-2050).....	80
Figura 4-39 Proyección de generación de metano por residuos sólidos domiciliarios, según composición de residuo en Chile, datos apilados (2025-2050)	80
Figura 4-40 Proyección de generación de metano por residuos sólidos domiciliarios, según región y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO ₂ eq. (2025-2050)	81
Figura 4-41 Proyección de generación de metano total por residuos sólidos industriales en Chile (2024-2050).....	82
Figura 4-42 Proyección de generación de metano por residuos sólidos industriales, según tipo de Sitio de Disposición Final en Chile, datos apilados, en ktCO ₂ eq. (2025-2050)	83
Figura 4-43 Proyección de emisiones de metano por residuos sólidos industriales, según composición de residuo, en Chile, datos apilados, en ktCO ₂ eq. (2025-2050).....	83
Figura 4-44 Proyección de generación de metano por residuos sólidos industriales, según región y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO ₂ eq. (2025-2050)	84
Figura 4-45 Comparación SNP: Generación de metano total desde sitios de disposición final (SDF) por residuos sólidos municipales en Chile (2025-2050)	87
Figura 4-46 Comparación SNP: Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) en Chile (2025-2050), datos apilados	88
Figura 4-47 Comparación SNP: Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO ₂ eq. (2025-2050)	89
Figura 4-48 Comparación SNP: Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según región de Chile y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO ₂ eq. (2025-2050)	90
Figura 4-49 Comparación SNP: Generación de metano total desde sitios de disposición final (SDF) por residuos sólidos industriales en Chile (2025-2050).....	92
Figura 4-50 Comparación SNP: Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) en Chile (2025-2050), datos apilados	92
Figura 4-51 Comparación SNP: Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO ₂ eq. (2025-2050)	94
Figura 4-52 Comparación SNP: Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según región de Chile y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO ₂ eq. (2025-2050)	95
Figura 6-1 Escenarios de proyección y evaluación para el sector residuos.....	135
Figura 6-2 Representación conceptual de emisiones asignadas en el tiempo.....	136
Figura 6-3 Definición conceptual de los Escenarios Temporales (ET1, ET2, ET3).....	139
Figura 6-4 Escenario distributivo 1 aplicado a rellenos sanitarios grandes al año 2030.....	142
Figura 6-5 Escenario distributivo 1 aplicado a rellenos sanitarios grandes al año 2050.....	143
Figura 6-6 Escenario distributivo 1 aplicado a rellenos sanitarios medianos al año 2030.....	144

Figura 6-7 Escenario distributivo 1 aplicado a rellenos sanitarios medianos al año 2050.....	145
Figura 6-8 Escenario distributivo 1 aplicado a rellenos sanitarios pequeños al año 2030.....	146
Figura 6-9 Escenario distributivo 1 aplicado a rellenos sanitarios pequeños al año 2050.....	148
Figura 6-10 Escenario distributivo 2 aplicado a rellenos sanitarios grandes al año 2030.....	149
Figura 6-11 Escenario distributivo 2 aplicado a rellenos sanitarios grandes al año 2050.....	150
Figura 6-12 Escenario distributivo 2 aplicado a rellenos sanitarios medianos al año 2030.....	151
Figura 6-13 Escenario distributivo 2 aplicado a rellenos sanitarios medianos al año 2050.....	152
Figura 6-14 Escenario distributivo 2 aplicado a rellenos sanitarios pequeños al año 2050.....	153
Figura 6-15 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática seca al año 2030	155
Figura 6-16 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática húmeda al año 2050.....	156
Figura 6-17 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática seca al año 2050	157
Figura 6-18 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática húmeda al año 2050.....	158
Figura 6-19 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática húmeda al año 2030.....	159
Figura 6-20 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática seca al año 2050	160
Figura 6-21 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática húmeda al año 2050.....	161
Figura 6-22 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios pequeños zona climática seca al año 2050.....	162
Figura 6-23 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios pequeños zona climática húmeda al año 2050	163
Figura 6-24 Umbrales generales para los escenarios de norma de emisión de metano para rellenos sanitarios, período 2030-2050, en ktCO ₂ eq.....	164
Figura 7-1 Sistematización de la gestión de monitoreo de biogás y reportabilidad a la autoridad sanitario del D.S. N°189 actualizado	177
Figura 9-1 Alternativas de financiamiento para rellenos sanitarios.....	223
Figura 12-1 Curva de calibración captura activa con antorcha	274
Figura 12-2 Curva de calibración captura activa con valorización	275
Figura 12-3 Curva de calibración captura pasiva	276

Acrónimos y Abreviaturas

Instituciones

CARB:	California Air Resources Board
DIPRES:	Dirección de Presupuestos, Ministerio de Hacienda, Gobierno de Chile
IPCC:	Intergovernmental Panel on Climate Change
MINSAL:	Ministerio de Salud
MMA:	Ministerio del Medio Ambiente
SSA:	Sistema de Seguimiento Ambiental
OCDE:	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
SUBDERE:	Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo
USEPA:	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

Programas y Estudios

PNUMA:	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
--------	--

Países

EE.UU.:	Estados Unidos de América
NZ:	Nueva Zelanda
UE:	Unión Europea
UK:	Reino Unido (<i>United Kingdom</i> , en inglés)

Monedas

CAD:	Dólares de Canadá
CLP:	Pesos de Chile
EUR:	Euros
MUSD:	Millones de Dólares de Estados Unidos
MXN:	Pesos de México
USD:	Dólares de Estados Unidos

Abreviaturas

CH ₄ :	Metano
-------------------	--------

CO ₂	Dióxido de carbono
DS:	Decreto Supremo
ECLP:	Estrategia Climática a Largo Plazo
ETS:	<i>Emissions Trading Scheme</i> (en español, Esquema de Transacción de Emisiones)
FCVC:	Forzantes climáticos de vida corta
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
LFG:	<i>Landfills Gas</i> (en español, hace referencia al gas proveniente de rellenos sanitarios)
LEL:	<i>Lower Explosive Limit</i> (en español, límite explosivo inferior)
LMCC:	Ley Marco de Cambio Climático
MRV:	Monitoreo, Reporte y Verificación
MSWLF:	<i>Municipal Solid Waste Landfill</i> (en español, relleno sanitario de residuos sólidos domiciliarios)
NDC:	Contribución Nacionalmente Determinada
NES-AQ:	<i>National Environmental Standards for Air Quality</i> (en español, estándares ambientales nacionales para la calidad del aire)
PPDA:	Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica
PSM:	Plan Sectorial de Mitigación
RET:	Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
SINADER:	Sistema Nacional de Declaración de Residuos
SDF:	Sitio de Disposición Final
SNP:	Sistema Nacional de Prospectiva
UTCUTS:	Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura
VAN:	Valor Actual Neto

Prefijos

T: Tera (10^{12})
G: Giga (10^9)
M: Mega (10^6)
K: Kilo (10^3)
m: Mili (10^{-3})
 μ : Micro (10^{-6})
n: Nano (10^{-9})

Unidades Básicas

A: Ampere (Corriente eléctrica)
m: Metro (Longitud)



kg: Kilogramo (Masa)

kt: kilotoneladas

S: Segundo (Tiempo)

°C: Celsius (Temperatura)

Unidades Derivadas

m²: Metro cuadrado m² (Superficie o área)

m³: Metro cúbico (Volumen)

m/s: Metro por segundo (Velocidad)

m/s²: Metro por segundo al cuadrado (Aceleración)

J: Joule (Energía, Trabajo)

W: Watt (Potencia)

Formato

"," separador decimal

"." separador de miles

Normas Generales

- El presente informe presenta los resultados finales del estudio “Recopilación de antecedentes técnicos y económicos para la norma de emisión de metano para rellenos sanitarios” desarrollado durante el período septiembre-2025 a junio-2026.
- El presente informe fue preparado por **Dictuc** a solicitud del **Mandante**, bajo su responsabilidad exclusiva.
- Los alcances de este informe están definidos explícitamente en la Sección 2.3 del presente informe. Las conclusiones de este informe se limitan a la información disponible para su ejecución.
- La información contenida en el presente informe no podrá ser reproducida total o parcialmente, para fines publicitarios, sin la autorización previa y por escrito de **Dictuc** mediante un Contrato de Uso de Marca.
- El **Mandante** podrá manifestar y dejar constancia verbal y escrita, frente a terceros, sean estos autoridades judiciales o extrajudiciales, que el trabajo fue preparado por **Dictuc**, y si decide entregar el conocimiento del presente informe de **Dictuc**, a cualquier tercero, deberá hacerlo en forma completa e íntegra, y no partes del mismo.
- El presente informe es propiedad del **Mandante**, sin embargo, si **Dictuc** recibe la solicitud de una instancia judicial, hará entrega de una copia de este documento al tribunal que lo requiera, previa comunicación por escrito al **Mandante**.
- El presente informe es resultado de las metodologías desarrolladas por **Dictuc**, del alcance del informe encomendado y de los antecedentes que el **Mandante** puso a disposición de **Dictuc**. El **Mandante** acepta expresamente que los resultados del presente informe pueden, en definitiva, no serles favorables a sus intereses particulares.

Resumen Ejecutivo

El estudio desarrolla antecedentes técnicos, económicos, y regulatorios para el diseño de una norma de emisión de metano en rellenos sanitarios y su sistema de compensación. El estudio fue solicitado por la Subsecretaría del Medio Ambiente, en el contexto de la implementación de la Ley Marco de Cambio Climático (LMCC) y los compromisos internacionales del país en mitigación de gases de efecto invernadero, tales como la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) y el *Global Methane Pledge* (GMP). El objetivo general del estudio es permitir al MMA elaborar dicha norma y sistema de compensación en coordinación con el Plan Sectorial de Mitigación del Ministerio de Salud (MINSAL) y el DS N°12/2024 del MMA, instrumento legal que define el reglamento para la elaboración de normas de emisión para gases de efecto invernadero (GEI).

En primera instancia, a partir del levantamiento de regulaciones ambientales sectoriales de comando y control aplicables a rellenos sanitarios en países como Estados Unidos, Canadá, la Unión Europea y el Reino Unido, se observa que estas establecen requisitos tecnológicos para los sistemas de captura y control de gas (SCCG), incorporan esquemas robustos de monitoreo, reporte y verificación (MRV) y contemplan mecanismos de cumplimiento con sanciones. Los resultados del análisis evidencian una clara convergencia internacional en los estándares de control de metano, destacando la adopción de límites de concentración superficial del orden de 500 ppmv, exigencias de eficiencia de destrucción superiores al 97% y la implementación de sistemas de monitoreo y reporte periódico.

A nivel país, se identifican 110 sitios de disposición final, incluyendo basurales, vertederos, rellenos manuales y rellenos sanitarios. A partir de esta caracterización se reconstruye una serie histórica de niveles de actividad desde 1950, y se estima para cada sitio la cantidad y composición de los residuos dispuestos con énfasis en la materia orgánica. Con dicha información se calculan las emisiones anuales de CH₄ mediante la metodología de Decaimiento de Primer Orden (FOD, por sus siglas en inglés), recomendada por el IPCC, y se proyectan las emisiones para un horizonte de 25 años, alineadas con los supuestos del Sistema Nacional de Prospectiva del MMA.

En materia de reducción de emisiones en rellenos sanitarios, el análisis identifica tres grupos funcionales: (i) mejoras en la eficiencia de captura de gas de relleno (LFG), (ii) dispositivos de control del LFG y (iii) tecnologías orientadas a incrementar la oxidación de CH₄.

El análisis muestra que el desempeño y viabilidad de estas medidas dependen críticamente de tres variables: el estado operativo del relleno, su capacidad de generación de metano y la existencia de sistemas de captación. En este contexto, se evidencia que la tecnología líder para todos los tamaños de relleno sanitario es la valorización energética, debido a la eventual venta de electricidad generada a partir del biogás, constituyéndose como la alternativa costo-efectiva dentro de rangos de abatimiento expresados en [USD/tCO₂eq].

Además, se proponen mecanismos de fiscalización basados en inspecciones en terreno durante la instalación de las tecnologías y en el seguimiento sistemático de variables de operación y emisiones reportadas periódicamente a la autoridad, con el fin de asegurar su correcta y continua implementación. La propuesta de norma vincula la estimación teórica de emisiones anuales con la medición directa de biogás (y por ende, metano) capturado y destruido o valorizado.

En el ámbito regulatorio, se desarrollan y comparan seis escenarios de norma de emisión de metano para rellenos sanitarios, diferenciados por tres estrategias para distribuir de forma distinta los límites de emisión y dos marcos temporales para aplicarlos. Para los escenarios más atractivos, se incorporó la definición de cantidad máxima acumulada de emisiones, estándar de referencia, umbral de excedencia y límites al uso de certificados, en coherencia con la Ley N° 21.455 y su trayectoria al 2050.

Asimismo, se consideraron instrumentos vigentes y futuros con efectos sinérgicos en la reducción de metano, junto con la caracterización y agrupación de rellenos sanitarios para evaluar adecuadamente la aplicación del artículo 15 respecto del uso de certificados. Complementariamente, se analizaron los elementos técnicos y regulatorios incorporados en la actualización del DS N° 189, fortaleciendo la línea base sectorial y evidenciando un cambio de enfoque hacia el control del metano como gas de efecto invernadero. La revisión de los Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica (PPDA) permitió identificar la necesidad de una mayor articulación regulatoria, dado que la quema obligatoria de biogás transforma emisiones de metano en contaminantes atmosféricos regulados en normas primarias.

Finalmente, el estudio cierra con un análisis técnico-económico de los escenarios de norma de emisión propuestos, resultando en todos los casos en una mayor reducción a la especificada en el Plan Sectorial de Mitigación al Cambio Climático del Sector Salud bajo la implementación de la medida de la cual emana la elaboración de esta norma de emisión.

1. Antecedentes y justificación del estudio

El 13 de junio de 2022, se publicó en el Diario oficial la Ley Marco de Cambio Climático (LMCC) (MMA, 2022) que tiene como objetivo hacer frente a los desafíos que presenta el cambio climático, transitar hacia un desarrollo bajo en emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros forzantes climáticos. Para lograr esto la LMCC define como meta alcanzar y mantener la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero al año 2050, adaptarse al cambio climático, reduciendo la vulnerabilidad y aumentando la resiliencia a los efectos adversos del cambio climático, y dar cumplimiento a los compromisos internacionales asumidos por el Estado de Chile en la materia.

En consonancia con LMCC el día 9 de abril de 2020 Chile presentó la actualización de su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC). Fortalecimiento en el que se compromete al cambio de la tendencia creciente de emisiones, anunciando un máximo de emisiones en el año 2025, y alineándose con la ciencia al presentar una meta absoluta en 2030 y un presupuesto de carbono. Este fortalecimiento de la NDC, evidencia, además, un aumento de ambición entre sus compromisos, especialmente en su compromiso de mitigación el cual se ve mejorado en materia de transparencia definiendo metas claras y sin condiciones.

Con el fin de seguir aumentando el nivel de ambición del país, en noviembre de 2022 se presentó un anexo del fortalecimiento de la NDC, donde se incorporan nuevos compromisos. Dentro de estos nuevos compromisos se presenta revertir la tendencia creciente de emisiones de metano a nivel nacional al 2025 (sin UTCUTS), proponiendo fortalecer la implementación de medidas en las fuentes relevantes a nivel nacional y orientar el trabajo para la próxima actualización de la NDC. Compromiso que va en línea con el Compromiso Global de Metano (Global Methane Pledge) adoptado en la COP26 y suscrito por Chile en 2021, donde se busca reducir las emisiones de metano antropocéntrico global en todos los sectores, al menos en un 30% bajo los niveles del 2020 para el 2030.

Para materializar los compromisos presentados en la NDC y darles seguimiento, la Ley Marco de Cambio Climático (LMCC) determina instrumentos de gestión del cambio climático (CC). Dentro de estos instrumentos está la Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021), que incluye la definición y asignación de presupuestos sectoriales de emisión para cada autoridad sectorial, y los Planes Sectoriales de Mitigación (PSM), los cuales corresponden a la definición sectorial de cómo se lograrán las reducciones de emisiones necesarias para lograr el presupuesto sectorial. Es así como también se definen en su artículo 14 las normas de emisión, con las que se busca establecer la cantidad máxima de un gas de efecto invernadero y/o forzante climático de vida corta que podrá emitir un establecimiento, fuente emisora o agrupación de éstas, con el objeto de cumplir los objetivos de la ECLP y NDC.

El Reglamento para la elaboración de Normas de Emisión para GEI y FCVC (DS. N°12/2024)¹ establece que cuando la elaboración de una norma de emisión de gases de efecto invernadero sea incluida en un plan sectorial de mitigación, el Ministerio del Medio Ambiente contará con un plazo de seis meses, contado desde la publicación del decreto supremo que aprueba el respectivo plan, para dar inicio a la elaboración de dicha norma. Por otro lado, establece los contenidos mínimos que deberán contener estas normas, facultando al Ministerio del Medio Ambiente como responsable de establecer mediante decreto supremo las normas de emisión. Para el procedimiento de elaboración y revisión de las normas, y el detalle del contenido mínimo que contendrán los decretos que las creen, el Ministerio del Medio Ambiente elaboró un reglamento, el cual se encuentra público desde julio 2025. Este, según establece la ley, cuenta con las siguientes etapas: análisis técnico y económico, consulta a organismos y entidades, públicas y privadas, una etapa de participación ciudadana y análisis de observaciones de sesenta días hábiles, consulta al Consejo Nacional para la Sustentabilidad y el Cambio Climático, informe previo del Comité Científico Asesor para el Cambio Climático y el pronunciamiento del Consejo de Ministros para la Sustentabilidad y el Cambio Climático, definiendo, además, los plazos y formalidades del procedimiento.

Además, la Ley Marco de Cambio Climático incorpora un sistema de compensación asociado a estas normas de emisión, regulado en su artículo 15. Este sistema permite que, para el cumplimiento de una norma de emisión, puedan utilizarse certificados que acrediten reducciones o absorciones de emisiones obtenidas mediante proyectos implementados en Chile. La ley dispone que cada norma deberá definir la cantidad o proporción máxima de certificados que podrán usarse para acreditar cumplimiento, y el reglamento de elaboración de normas exigen además fijar el umbral bajo el cual podrían generarse excedentes de cumplimiento. El reglamento del sistema de compensación asociado al artículo 15 fue sometido a consulta ciudadana en noviembre de 2024 y aprobado en proyecto definitivo por el Consejo de Ministros en febrero de 2025.

En relación con el sector residuos, le corresponde al Ministerio de Salud elaborar e implementar el Plan Sectorial de Mitigación del Cambio Climático (PSM), aprobado mediante el Decreto Supremo N°48/2024 del MINSAL y publicado en el Diario Oficial el 09 de enero de 2026². Este Plan tiene por objetivo establecer acciones y medidas para no sobrepasar el presupuesto sectorial de emisiones de gases de efecto invernadero asignado a esta autoridad, el que incluye las emisiones de metano de rellenos sanitarios. En este marco, el PSM plantea la necesidad de que el Ministerio del Medio Ambiente elabore una norma de emisión de metano para rellenos sanitarios. Adicionalmente, propone la modificación del Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios (DS. 189/2005 MINSAL), con la

¹ Disponible en: <https://bcn.cl/Xpj4S6>.

² El Decreto Supremo que aprueba el PSM se encuentra disponible: <https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2026/01/09/44344/01/2745794.pdf>

incorporación de la exigencia de extracción y oxidación del metano generado en estas instalaciones.

Por ende, dados los plazos que contempla la LMCC, es necesario llevar a cabo un estudio para el obtener los antecedentes técnicos y económicos para elaborar una norma de emisión de metano para rellenos sanitarios, los que deberán seguir lo establecido en el Decreto Supremo N°12 del 2024 que Aprueba el reglamento para la elaboración de normas de emisión para gases de efecto invernadero y forzantes climáticos de vida corta para poder facilitar el desarrollo y cumplimiento de los compromisos presentados en la NDC.

2. Objetivos del estudio

2.1 Objetivo general

Proveer insumos técnicos y económicos que permitan elaborar una norma de emisión de metano de rellenos sanitarios y su sistema de compensación, conforme a lo establecido en los artículos 14 y 15 de la Ley 21.455, el Decreto Supremo N°12 del 2024 y en el Plan Sectorial de Mitigación del Ministerio de Salud.

2.2 Objetivos específicos

- a) Identificar, caracterizar y describir normas de emisión de metano e instrumentos relacionados internacionales y nacionales, que puedan servir de referencia.
- b) Caracterizar los rellenos sanitarios del país, contando con una estimación del nivel de actividad y emisiones de metano para cada sitio de disposición de residuos domiciliarios, mono rellenos industriales y similares del país.
- c) Proponer, describir y evaluar, prácticas de operación y soluciones tecnológicas aplicables que permitan la reducción de emisiones de metano en rellenos sanitarios del país.
- d) Generar propuesta de al menos tres escenarios de norma de emisión de metano en rellenos sanitarios y su sistema de compensación, conforme a los artículos 14 y 15 de la ley 21.455/2022, considerando los criterios establecidos en la misma para su determinación, los que incluyen costo – efectividad, equidad, responsabilidad e impactos sociales, ambientales y económicos, determinando para cada escenario la cantidad máxima acumulada, el umbral de excedencia, la cantidad máxima de certificados permitidos y el estándar de referencia y considerando que la norma puede diferenciar su aplicación por tipo de fuente, establecimiento o agrupación de fuentes y ser una progresión en el tiempo hasta el año 2050 en línea con la ECLP.
- e) Analizar y sistematizar los elementos técnicos, operativos y regulatorios contenidos en el DS N°189 actualizado con el fin de utilizarlo como línea base, estableciendo sinergias y compatibilidades con los productos de esta consultoría para la definición de límites, exigencias y mecanismo de cumplimiento de la norma de emisión de metano para rellenos sanitarios, identificado además criterios de coherencia y complementariedad con otros instrumentos de gestión ambiental vigentes, tales como Planes de Prevención y Descontaminación Atmosféricos (PPDA), el reglamento Sanitario sobre manejo de residuos peligrosos, entre otros instrumentos normativos y de gestión de residuos que resulten pertinentes, así como aspectos relevantes para el diseño de esquemas de monitoreo, reporte y verificación (MRV) y de fiscalización, de modo de favorecer su aplicación coordinada y facilitar el cumplimiento normativo.
- f) Proponer mecanismos de monitoreo para la fiscalización y cumplimiento de la respectiva norma considerando que debe ser eficiente y sinérgica con otras normas que tengan por objeto regular a los rellenos sanitarios como el D.S. 189/2005 del MINSAL y sus

actualizaciones. Se debe considerar en este estudio, la propuesta de modificación del D.S. 189/2005 y las consideraciones técnicas contempladas en el Informe Financiero del PSM del MINSAL (ambas actualmente en elaboración por el MINSAL).

- g) Elaborar análisis técnico y económico de los escenarios de norma de emisión propuestos y de la modificación del decreto considerando para esto último el Informe Financiero del PSM del MINSAL (actualmente en elaboración por MINSAL).

2.3 Alcance de este informe

El presente informe contiene el desarrollo de todas las actividades asociadas al cumplimiento de todos los objetivos específicos, entre el a) y el g), presentados en la Sección 2.2, según los términos descrito en las Bases Técnicas. Mientras que en la Tabla 2-1, se presenta la sección en la cual se aborda cada actividad.

Tabla 2-1 Actividades abordadas en el informe

Objetivo Específico	Actividades del objetivo específico	Sección del Informe
a)	a.1) Realizar un levantamiento de normas de emisión y otros instrumentos que restringen las emisiones de metano en rellenos sanitarios en regulaciones de referencias de al menos 8 países	Sección 3.1
	a.2) Caracterizar las regulaciones identificadas	Sección 3.2
	a.3) Analizar las ventajas y desventajas de cada norma considerada y su impacto en la reducción de emisiones de metano	Sección 3.3
b)	b.1) Identificar y caracterizar los rellenos sanitarios del país existentes y futuros planificados o por planificar	Sección 4.1
	b.2) Recrear serie histórica desde 1950 de los niveles de actividad de cada relleno	Sección 4.2
	b.3) Estimar las emisiones anuales de metano para cada relleno sanitario	Sección 4.3
	b.4) Proyectar emisiones anuales para un horizonte de 25 años, en línea con supuestos utilizados por el Sistema Nacional de Prospectiva del MMA	Sección 4.4
c)	c.1) Identificar, describir y evaluar técnicas o medidas de control de emisiones de metano disponibles para implementarse en las fuentes emisoras actuales y futuras	Sección 5.1
	c.2) Describir los potenciales mecanismos para fiscalizar la correcta implementación de las técnicas o medidas de control identificadas	Sección 5.2
d)	d.1) Instrumentos de gestión ambiental actuales, así como futuros, que afecten las emisiones de metano en los rellenos sanitarios	Sección 6.1
	d.2) Evaluar las ventajas de incorporar alternativas como el uso de certificados y/o la generación de excedentes	Sección 6.2
	d.3) Evaluar si la norma debe aplicarse a cada establecimiento, por fuente o por tipo de fuente, y si se pueden agrupar	Sección 6.3
	d.4) Proponer y justificar al menos tres escenarios de norma de emisión de metano en rellenos sanitarios	Sección 6.4
	d.5) Incluir en los escenarios los contenidos de una Norma de GEI especificados en los artículos 14 y 15 de la ley 21.455 y el D.S. N°12/2024	Sección 6
	d.6) Determinar para cada escenario la cantidad máxima acumulada, el umbral de excedencia, la cantidad máxima de certificados permitidos y el estándar de referencia	Sección 6.5

Objetivo Específico	Actividades del objetivo específico	Sección del Informe
e)	e.1) Proponer antecedentes técnicos para la actualización del D.S. 189 del MINSAL; modificado por: e.1) Analizar y sistematizar los elementos técnicos, operativos y regulatorios contenidos en el D.S. 189 actualizado	Sección 7
f)	f.1) Determinar para cada solución tecnológica posibles mecanismos de monitoreo y fiscalización para el cumplimiento de la norma y del decreto 189/2005 de MINSAL	Sección 8.1
	f.2) Evaluar costos, actores y brechas para la implementación de cada mecanismo propuesto	Sección 8.2
g)	g.1) Realizar una estimación del potencial de reducción de emisiones de cada escenario propuesto respecto a la línea base, y comparación con los objetivos del PSM del MINSAL	Sección 9.1
	g.2) Realizar un análisis de los costos de cada uno de los escenarios, el rango de los costos se debe fundamentar e incluir la fuente de financiamiento	Sección 9.2
	g.3) Identificar y cuantificar, en la medida de lo posible, los beneficios que implique el cumplimiento de dichas medidas para la población e identificar los co-beneficios para los titulares	Sección 9.3
	g.4) Realizar un análisis comparativo entre los escenarios, comparando las ventajas y desventajas de cada escenario	Sección 9.4

Fuente: Elaboración propia

3. Marco de referencia de normas de emisión de metano e instrumentos relacionados internacionales y nacionales

3.1 Regulaciones internacionales que restringen las emisiones de metano en rellenos sanitarios

Para identificar integralmente normas de emisión de metano en rellenos sanitarios y otros instrumentos complementarios (como reglamentos que regulan mercados voluntarios u obligatorios de carbono), el Equipo Consultor acordó, junto a la Contraparte Técnica, una lista de países de interés, fundamentado en la propuesta técnica del Equipo Consultor.

Inicialmente se definió revisar el marco normativo de:

- Estado de California, Estados Unidos.
- Estado de Quebec, Canadá.
- Gobierno de Nueva Zelanda.
- Reino Unido.
- Unión Europea.
- Colombia (con observaciones de la Contraparte Técnica respecto a su grado de avance, asignándole una baja prioridad).

Posteriormente, a partir de consultas con expertos y la revisión de experiencias internacionales, se identifican e incorporan los siguientes países:

- Estado de Washington, Estados Unidos.
- Estado de Colorado, Estados Unidos.
- Estado de Oregon, Estados Unidos.
- Estado de Maryland, Estados Unidos.
- US EPA, Estados Unidos.
- Suecia.
- Australia.

El Equipo Consultor procedió a revisar los portales públicos de cada una de las jurisdicciones con el fin de identificar los documentos que contienen las leyes, normas o reglamentos que operan como instrumentos para restringir las emisiones de metano en rellenos sanitarios. Toda la información recopilada y organizada de manera sistemática se encuentra disponible en el anexo digital “NEMetano-Characterizacion_normas_internacionales.xlsx”, además, se incluye una carpeta con los documentos revisados por país en formato PDF. Mientras que la Tabla 3-1 presenta los resultados del levantamiento de las normativas e instrumentos recopilados para cada país. Cabe destacar que, en términos conceptuales, en países como Estados Unidos, Reino Unido, Suecia los rellenos sanitarios normados y regulados son abarcados por el término general “Landfills”, el cual se puede definir como vertedero o relleno sanitario.

Tabla 3-1 Levantamiento de normas de emisión e instrumentos que restringen las emisiones de metano en rellenos sanitarios

País	Territorio	Instrumento	Tipo Instrumento	Referencia
Australia	New South Wales	Environmental Guidelines: Solid Waste Landfills	Guía	(EPA, 2016a)
	Nacional	Nacional Greenhouse and Energy Reporting	Reglamento	(Office of Parliamentary Counse, 2015)
Canadá	Quebec	Regulation respecting the landfilling and incineration of residual materials	Reglamento	(Minister of Sustainable Development, 2025b)
		Regulation respecting a cap-and-trade system for greenhouse gas emission allowances	Reglamento	(Minister of Sustainable Development, 2025a)
Colombia	Nacional	Decreto 1784 de 2017	Decreto	(Ministerio de Vivienda, 2017)
EEUU	California	Regulation on Methane in Landfills (LMR)	Norma emisión	(CARB, 2016)
		SB 1383 (Short-Lived Climate Pollutants: Organic Waste Methane Emission Reduction)	Plan de acción	(CalRecycle, 2020) (CARB, 2017)
	Colorado	Regulation Number 6, Part A: Standards of Performance for New Stationary Sources	Reglamento	(Department of Public Health and Environment, 2020)
	EPA	Criteria for municipal solid waste landfills (MSWLF)	Regulación	(EPA, 1991)
	Maryland	Control of Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfills (MSW Landfills)	Reglamento	(Department of the Environment Maryland, 2022)
	Oregon	Division 239 – LANDFILL GAS EMISSIONS	Reglas	(Department of Environmental Quality, 2025)
	Washington	RCW LANDFILLS-METHANE EMISSIONS (Chapter 70A.540)	Reglamento	(Departament of Ecology, 2024a)
		Landfill Methane Emissions	Norma emisión	(Departament of Ecology, 2024b)
México	Nacional	Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003	Norma emisión	(Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003)
Nueva Zelanda	Nacional	Climate Change Response (Disposal facilities) regulation 2010	Reglamento	(Ministry for the Environment, 2010)
	Nacional	Resource Management (National Enviornmental Standars for Air Cuality) Regulations 2004	Reglamento	(Ministry for the Environment, 2004)
Reino Unido	Escocia	Landfill regulations	Regulación	(SEPA, 2003)
	Inglaterra /Gales	Landfill regulations	Regulación	(UK Government, 2002)
	Irlanda del Norte	Landfill regulations	Regulación	(Department of the Environment, 2003) (Department of the Environment, 2004)
Suecia	Nacional	Manual 2004:2 con directrices sobre la Ordenanza (2001:512) relativa al vertido de residuos	Manual	(Swedish Environmental Protection Agency, 2004)
Unión Europea	Nacional	Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos	Directiva	(Consejo de la Unión Europea, 1999)

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Sección 3.2 se explican los parámetros de caracterización de estos instrumentos y los resultados de la actividad.

3.2 Caracterización de regulaciones identificadas

3.2.1 Parámetros utilizados para la caracterización

Con el fin de facilitar la caracterización y el análisis de las regulaciones levantadas, cada norma e instrumento fue caracterizado en la base de datos del anexo digital llamada “NEMetano- Caracterizacion_normas_internacionales.xlsx” mediante un conjunto de parámetros estandarizados. Estos parámetros permiten describir las normativas, sus principales elementos técnicos y de fiscalización. En la Tabla 3-2 se presentan los parámetros considerados y una breve descripción de la información contenida en cada uno.

Tabla 3-2 Descripción de parámetros de caracterización de normativas

Agrupación Parámetro	Parámetro	Descripción
ID Repositorio	ID Repositorio	Identificador único de las normativas e instrumentos en la base de datos
Ubicación	País	País a la cual pertenece la norma o instrumento caracterizado
	Estado/Región	División administrativa intermedia en que aplica la regulación
	Provincia/Comuna	División administrativa local en que aplica la regulación, si corresponde
Año Vigencia	Año entrada en vigencia	Año en que la norma o instrumento comenzó a regir oficialmente
Información General	Nombre	Nombre oficial de la norma o instrumento caracterizado
	Descripción_resumen	Síntesis del contenido principal de la norma, incluye su objetivo y alcance
	Institución responsable	Autoridad encargada de la implementación de la norma o instrumento
	Tipo instrumento	Clasificación del instrumento (EJ: norma, reglamento, manual, etc)
	Alcance territorial	Extensión de aplicación del instrumento (EJ: estatal, territorial, etc)
	Fuentes de emisión reguladas	Tipos de instalaciones o actividades reguladas
Límites	Contaminantes regulados	Contaminantes controlados por la norma, con énfasis en metano
	Unidad límite de emisión	Unidad de medida utilizada para establecer el límite de emisión
	Valor límite de emisión	Valor numérico del límite de emisión definido en la norma
	Detalle_limite	Información complementaria sobre la aplicación del límite
	Otros KPIs ambientales	Indicadores adicionales relaciones con el desempeño ambiental
Monitoreo (por parte de la empresa)	Monitoreo	Monitoreos establecidos en las normativas por parte de la empresa
	Frecuencia de monitoreo	Plazo en que la empresa responsable de los rellenos debe monitorear
Reporte (por parte de la empresa)	Frecuencia de reporte	Plazo en que las entidades reguladas deben reportar cumplimiento
	Características del reporte	Requisitos de contenido, formato u otro para el reporte
Verificación (por parte de un 3° independiente)	Verificación	Verificaciones realizadas por un tercero independiente según la normativa
Fiscalización (por parte de la autoridad)	Métodos de fiscalización	Procedimiento de fiscalización por parte de la autoridad para asegurar el cumplimiento
	Frecuencia de fiscalización	Plazo en que se realiza el control
	Tecnologías de fiscalización	Herramientas o técnicas específicas utilizadas para fiscalizar
Requisitos	Exigencias tecnológicas mínimas	Tecnologías o prácticas mínimas que deben implementarse para cumplir la norma
Otra Información	Instrumentos complementarios	Programas, incentivos o políticas que apoyas, refuerzan o útiles para la aplicación de la norma
	Periodo actualización	Plazo con que la norma debe ser revisada o actualizada
Referencias	Link	Enlace directo a la fuente del documento
Observaciones	Observaciones Consultora	Comentarios adicionales, notas metodológicas o consideraciones relevantes del Equipo Consultor

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.1 Caracterización en base a revisión bibliográfica

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización de las regulaciones identificadas, a partir del levantamiento de instrumentos realizado en la Sección 3.1 y de acuerdo con los parámetros definidos en la Sección 3.2.1. Los resultados completos se encuentran sistematizados en el anexo digital “NEMetano-Characterizacion_normas_internacionales.xlsx” y se presentan en el Anexo 12.1 en la Tabla 12-1 y Tabla 12-2 de forma separada.

La Tabla 12-1 muestra información general de cada instrumento como un resumen, las fuentes, contaminantes y límites de regulación, mientras que la Tabla 12-2 muestra la información sobre el monitoreo, el reporte, la verificación y la fiscalización requeridas por las regulaciones. Esta información permite consultar cada normativa en función de los criterios técnicos, institucionales, de fiscalización y reporte previamente descrito.

En total se revisaron 21 regulaciones correspondientes a 9 países, que abarcan diversos tipos de instrumentos normativos (como reglamentos, normas, guías, decretos) orientados al control de emisiones en rellenos sanitarios de residuos sólidos, con énfasis en el metano como contaminante regulado. Si bien algunas regulaciones establecen límites numéricos, la mayoría opta por definir estándares de desempeño u obligaciones tecnológicas (como la captura y quema o valorización del biogás, el monitoreo de fugas y la operación de antorchas), lo que permite controlar las emisiones sin establecer un umbral único.

En la Tabla 3-3 se presentan los principales límites cuantitativos y parámetros operacionales aplicables al CH₄ en rellenos sanitarios. Se observa que varias regulaciones consideran 500 ppmv para el monitoreo superficial instantáneo y 25 ppmv para el monitoreo superficial integrado, junto con estándares de migración o acumulación límite en estructuras, expresados como el 25% del Límite Explosivo Inferior ($\approx 1,25\%$ v/v). Los umbrales de los sistemas de recolección y control de gas (GCCS), o la tasa de generación de CH₄ que obliga a instalar u operar dichos sistemas, varían según el estado del sitio. En cuanto al control de equipos, varias normas fijan 500 ppmv como criterio de fuga de componentes y 62,8°C como límite de temperatura en la boca del pozo para garantizar una operación segura.

Varios países no establecen límites específicos de CH₄ en rellenos sanitarios (por ejemplo, Colombia, México, Reino Unido, Suecia, entre otros) que presentan una perspectiva más sanitaria y de seguridad, mientras que otros optan por marcos generales de GEI que inciden indirectamente en el control de emisiones, como se presenta en la Tabla 3-4. Se observa que, Australia aplica una reducción anual de la línea base por instalación de 4,9% (en CO₂e); Quebec opera un sistema de comercio de emisiones con un umbral de cobertura de 25.000 tonCO₂e/año y permite el uso de compensaciones de hasta un 8%; California fija metas estatales por contaminante, con niveles objetivo en MMTCO₂e al 2030 (alcanzando 71 MMTCO₂e para CH₄); y

Colorado establece metas de reducción de GEI a 2025, 2030 y 2050 en comparación con los niveles de 2005, siguiendo la lógica de emisiones netas cero al 2050.

Respecto al monitoreo, reporte y verificación (MRV), se identifican reportes anuales complementados en algunos casos por reportes iniciales o periódicos. La fiscalización, incluye inspecciones en el sitio, revisión de reportes y mediciones operacionales que consideran prácticas como la búsqueda de fugas, el monitoreo de superficie y la verificación de la eficiencia del sistema de captura o valorización del gas.

En la Tabla 3-5 se presenta un resumen de la información disponible sobre MRV-F para CH₄. La información se representa mediante símbolos: ✓ (exige o entrega información específica sobre CH₄), ~ (entrega información parcial, no necesariamente sobre CH₄) y X (no explícito, no entrega información sobre CH₄). Para mayor detalle, se recomienda revisar la información descritas en cada sección del país respectivo (por ejemplo, Sección 3.2.1.2 para EE.UU. o la Sección 3.2.1.3 para Canadá, etc) o el anexo digital “NEMetano-Characterizacion_normas_internacionales.xlsx”, presentado en la Tabla 12-2 del Anexo 12.1.

Se observa que la mayoría de las regulaciones exigen un monitoreo explícito de CH₄, mientras que un número menor establece monitoreo sin vinculación explícita con este gas. La mayoría especifica las frecuencias de monitoreo y la información de reporte correspondiente. En la verificación por parte de terceros independientes, predomina la entrega parcial de información, limitada a certificaciones profesionales y análisis de laboratorios, aunque no siempre aplicables al CH₄. Finalmente, la fiscalización por parte de la autoridad suele estar definida (mediante inspecciones, revisión de reportes y pruebas de desempeño), aunque pocas normas establecen una frecuencia explícita de inspección, operando con enfoques basados en riesgo, excedencias o hitos.

Tabla 3-3 Resumen de los límites de concentración CH₄ para rellenos sanitarios – Normativas Internacionales

País	Nombre	Monitoreo instantáneo	Monitoreo integrado	Límite en estructuras	Umbral GCCS (ton CH ₄ /año)	Fuga de componentes (ppmv)	T° boca de pozo (°C)	Observaciones
EEUU – CA	Regulations on Methane in Landfills	500 ppmv	25 ppmv	–	–	–	–	Doble estándar: instantáneo + media espacial
EEUU – MD	COMAR – Methane Emission Control from RSM Landfills	500 ppmv	25 ppmv	–	≥8.548	≥500 (etiquetado y reparación)	< 62,8	Fuga de componentes: 500 ppmv o mayor requiere etiquetado y reparación.
EEUU – OR	Division 239 – LANDFILL GAS EMISSIONS	500 ppmv	25 ppmv	–	≥732 o ≥8.548 (según edad y estatus)	≥500 (reparación)	< 62,8	Fuga de componentes: Concentración de metano de 500 ppm o más.
EEUU – DC	Chapter 70A.540 RCW LANDFILLS—CH ₄ EMISSIONS	500 ppmv	25 ppmv	–	–	≤500 (en componentes bajo presión)	–	Fugas del sist. de recolección de gas: No exceder 500 ppmv en comp. bajo P positiva
EEUU – DC	Landfill Methane Emissions	500 ppmv	25 ppmv	–	–	–	–	–
AU – NSW	Enviormental Guidelines: Solid Waste Landfills	500 ppmv 1% v/v	–	–	–	–	–	–
NZ	Resource Management (National Enviornmental Standars for Air Cuality) Regulations 2004	5.000 ppmv	–	–	–	–	–	Deriva de la “Resource Management Act 1991”, que promueve el manejo sustentable de los recursos físicos y naturales, considera al CH ₄ como una consecuencia del manejo de los recursos y no un forzante climático
CA – QB	Regulations respecting the landfilling and incineration of residual materials (Cap. Q-2, r.19)	500 ppmv	–	25% LEL (≈1,25%v/v)	–	–	–	El CH ₄ no debe superar el 25% del límite explosivo inferior (LEL) en estructuras ni en el límite de la propiedad, excluye los sistemas de control o recuperación de gas
EEUU – EPA	Criteria for municipal solid waste landfills	–	–	25% LEL (≈1,25%v/v)	–	–	–	Aplica a estructuras y límite de propiedad, excluye componentes del sistema de control o recuperación de gas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-4 Resumen de políticas macro de GEI – Normativas Internacionales

País	Norma	Tipo de límite	Unidad	Valor	Aplicabilidad/Disparador
AU	Nacional Greenhouse and Energy Reporting (Safeguard Mechanism)	Reducción de línea base	% (CO ₂ e)	4,9% anual	Por instalación cubierta. Tasa anual de reducción aplicada a la línea base.
CA – QB	Regulation respecting a cap-and-trade system for greenhouse gas emission allowances (Capítulo Q-2, r.46.1)	Umbral de cobertura	tCO ₂ e/año	25.000	Cobertura y uso de compensaciones (≤8%)
EEUU – CA	Regulación SB 1383 (Short-Lived Climate Pollutants: Organic Waste Methane Emission Reduction)	Meta estatal por contaminante Reducción al 2030 vs 2013	MMTCO ₂ e	-CH ₄ : 71 -BC: 19 -HFC: 24	-CH ₄ ; 40% reducción (118 a 71 MMTCO ₂ e). -CN; 50% reducción (38 a 19 MMTCO ₂ e). -HFC; 40% reducción (40 a 24 MMTCO ₂ e).
EEUU – CO	5 CCR 1001-26 – Regulation Number 6, Part A: Standards of Performance for New Stationary Sources	Metas de reducción GEI	–	–	Reducción de GEI de 26% al 2025, 50% al 2030 y 90% al 2050 respecto a 2005

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-5 Resumen de la información disponible de MRV-F para CH₄ – Normativas Internacionales*

País	Nombre	Monitoreo		Reporte		Verificación	Fiscalización	
		Monitoreo	Frecuencia	Características	Frecuencia		Métodos	Frecuencia
AU - NSW	Environmental Guidelines: Solid Waste Landfills	✓	✓	✓	~	~	~	✗
AU	Nacional Greenhouse and Energy Reporting	~	~	✓	✓	~	~	~
CA - QB	Regulation respecting the landfilling and incineration of residual materials (Cap. Q-2, r. 19)	✓	✓	✓	✓	✓	~	~
CA - QB	Regulation respecting a cap-and-trade system for greenhouse gas emission allowances (Cap. Q-2, r. 46.1)	~	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CO	Decreto 1784 de 2017	~	~	~	~	✗	~	✗
EEUU - CA	Regulation on Methane in Landfills (LMR)	✓	✓	✓	✓	~	✓	✗
EEUU - CA	Regulation SB 1383 (SLCP: Organic Waste Methane Emission Reduction)	~	~	✓	✓	~	✗	✗
EEUU - CO	5 CCR 1001-26 – Standards of Performance for New Stationary Sources	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EEUU - EPA	Criteria for municipal solid waste landfills	✓	✓	✓	✓	~	~	✗
EEUU - MD	COMAR 26.11.42 – CH ₄ Emission Control from RSM Landfills	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EEUU - OR	Division 239 – LANDFILL GAS EMISSIONS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
EEUU - DC	Chapter 70A.540 RCW LANDFILLS—METHANE EMISSIONS	✓	✓	✓	✓	✗	✓	~
EEUU - DC	Landfill Methane Emissions	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
ME	Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003	✓	~	✓	✓	✓	✓	~
NZ	Climate Change Response (Disposal facilities) regulation 2010	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
NZ	Resource Management (NWSAC) Regulations 2004	✓	✗	~	~	✗	~	✗
UK - SC	Landfill regulations (Escocia)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
UK - ING/GL	Landfill regulations (Inglaterra y Gales)	✓	✓	✓	✓	~	✓	✗

País	Nombre	Monitoreo		Reporte		Verificación	Fiscalización	
		Monitoreo	Frecuencia	Características	Frecuencia		Métodos	Frecuencia
UK - IRL	Landfill regulations (Irlanda del Norte)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	~
SE	Manual 2004:2 con directrices sobre la Ordenanza (2001:512) relativa al vertido de residuos	✓	~	✓	~	X	✓	~
UE	Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos	✓	✓	✓	✓	~	✓	~

* ✓ (exige, entrega información para CH₄); ~ (parcial, entrega información, no necesariamente para CH₄); X (no explícito, no entrega información para CH₄)

Fuente: Elaboración propia

3.2.1.2 Estados Unidos

- **Estado de California, Estados Unidos**

Entre los instrumentos regulatorios, específicamente para el control del gas metano en rellenos sanitarios del estado de California, se identificaron los siguientes:

- “Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfills” (CARB, 2010).
- “Short -Lived Climate Pollutant Reduction Strategy” (CARB, 2017).

Estos instrumentos se complementan con la información obtenida de la entrevista descrita en la Sección 3.2.2.1. El primer instrumento sobre regulaciones de metano para rellenos sanitarios “Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfills”, desde ahora LMR (Regulation on methane in landfills) cuenta con límite de emisiones, requisitos de monitoreo, control, reporte, y de cálculo de emisiones. Además de normas de rendimientos y fugas para el sistema de recolección y control de gases. Por otro lado, “Short -Lived Climate Pollutant Reduction Strategy” presenta opciones para la reducción de emisiones, regulaciones, incentivos, y actividades de apoyo al mercado.

En cuanto al monitoreo el primer instrumento detalla los diversos monitoreos con los que deben cumplir los rellenos que deban tener un sistema de control y recolección de gas, el cual establece que el dueño u operador del sitio de disposición final debe realizar:

- Monitoreo de emisiones superficiales (instantáneo e integrado): Trimestral.
- Monitoreo de fugas: Trimestral.
- Monitoreo de cabeza de pozo: Mensual
- Monitoreo de Pruebas de eficiencia: Anual, con flexibilización por buen desempeño.

En complemento a este monitoreo, el documento también fija límites de concentraciones para el monitoreo de emisiones superficiales, los cuales son:

- Monitoreo instantáneo: 500 ppmv
- Monitoreo integrado: Promedio de 25 ppmv (integrado por cuadrícula de 7,62 m (25 pies)).

En cuanto al reporte que debe entregar el operador debe contar con una frecuencia de:

- Monitoreo de superficie: Trimestral, aunque puede hacerse anualmente si se cumplen ciertas condiciones (cuatro períodos trimestrales sin excedentes).
- Trimestral: Para concentraciones superficiales que no superen 500 ppmv (instantáneo) y con límite promedio de 25 ppmv de metano (medido como metano).
- Anual: Si se cumplen las condiciones establecidas en la normativa “95469” del LMR.

Respecto la verificación, no se exige un requisito general de verificación externa para monitoreos o reportes. Sin embargo, los planes de diseño deben ser preparados y certificados por un ingeniero profesional.

El segundo documento “Short -Lived Climate Pollutant Reduction Strategy”, considera metas de reducción de 40% al 2030 vs 2013 para CH₄, la disminución de los desechos orgánicos a vertedero a -50% (2020) y -75% (2025) vs 2014, y recuperación del 20% de alimentos comestibles al 2025 y exige MRV municipal y de instalaciones.

En cuanto al monitoreo por parte de la empresa:

- Revisión de rutas: Inspección visual de contenedores y rutas de transporte para identificar contaminación.
- Revisión de cumplimiento: Verificación de registros y suscripciones a servicios de recolección.
- Mediciones de residuos: Protocolos de muestreo para determinar eficiencia de recuperación y contenido orgánico

En cuanto a la frecuencia del monitoreo anterior:

- Contenedores grises: Trimestralmente (para instalaciones con más de 500 ton/año).
- Procesamiento: Muestras de 10 días operativos por trimestre.
- Rutas y contenedores (3 y 2): Dos veces al año mínimo.

Respecto al reporte acerca el tipo de recolección, número de generadores, resultados del monitoreo y educación ambiental, supervisión de transportistas, y peso de los residuos orgánicos y enviados:

- Procesadores/transferidores: Trimestralmente, con muestreos de al menos 10 días.
- Reportes anuales de jurisdicción: Primer reporte en 2022, luego anual (agosto).
- Procesamiento/Reciclaje/Compostaje: Reportes trimestrales.

En cuanto a la verificación de garantizar la calidad y precisión del monitoreo incluye mantener los registros y entrenamiento del personal, la agencia de cumplimiento puede aprobar protocolos alternativos si se garantiza la misma precisión, y se puede sustituir el muestreo obligatorio si se usa un estándar de calidad equivalente o superior, lo que implica una revisión externa.

- **Estado de Washington, Estados Unidos**

Al evaluar instrumentos regulatorios sobre metano del estado de Washington, se identifican dos relevantes:

- “Chapter 70a.540 RCW: LANDFILLS—METHANE EMISSIONS” (Department of Ecology, 2024a).
- “Chapter 173-408 WAC: LANDFILL METHANE EMISSIONS” (Department of Ecology, 2024b).

Ambos documentos importantes funcionan de manera conjunta. El Capítulo 173-408 WAC es la regulación de implementación adoptada por el Departamento de Ecología bajo la autoridad de la Ley RCW 70A.540, proporcionando los procedimientos detallados y técnicos. Por lo tanto,

trabajan de manera complementaria para abordar la fiscalización y reducción de metano en rellenos sanitarios.

El reglamento 173-408 WAC establece requisitos para implementar un sistema de control y recolección de las emisiones de metano de los rellenos sanitarios municipales de residuos sólidos, y sus reportes. En la Tabla 3-6 se presentan los requisitos de capacidad y características del relleno que requiere un sistema de control y recolección de gas, necesarios para aplicar el árbol de decisiones presentados para poder aplicar el reglamento.

Uno de estos requisitos el cálculo del Heat Input Capacity (HIC) que es el flujo de energía térmica que se liberaría si la generación de metano del relleno se quemara por completo. En la norma se detallan las ecuaciones y supuestos para hacer el cálculo. Mientras que el otro requisito clave es el Instantaneous Surface Monitoring (ISM), el cual corresponde al monitoreo superficial instantáneo que se debe aplicar en 4 trimestres consecutivos; y se considera un ISM < 200 ppmv si es que en ningún registro de los 4 monitoreos resulta en un registro superior a ese valor.

Tabla 3-6 Requisito de capacidad y característica del relleno que requiere sistema de control y recolección de gas

Requisito cantidad de residuos	Requisito HIC	Requisito ISM	¿Requiere sistema de control de gas?	Estado de actividad	Acción requerida
Si Residuos < 450.000 ton	-	-	No	Activo	Reporte anual de residuos "In situ"
Si Residuos ≥ 450.000 ton	HIC < 3 MBtu/h	-	No	Activo	Calcular, recalcular y reportar HIC anual.
	HIC ≥ 3 MBtu/h	ISM < 200 ppmv	No	Activo	Recalcular y reportar HIC anual
		ISM ≥ 200 ppmv	Si	Activo	Recalcular y reportar HIC anual
Si Residuos ≥ 750.000 ton	HIC < 3 MBtu/h	-	No	Inactivo o cerrado	Calcular, recalcular y reportar HIC anual
	HIC ≥ 3 MBtu/h	ISM < 200 ppmv	No	Inactivo o cerrado	Calcular, recalcular y reportar HIC anual
		ISM ≥ 200 ppmv	Si	Inactivo	Recalcular y reportar HIC anual

Fuente: Elaboración propia

Esta norma detalla los diversos monitoreos con los que deben cumplir los rellenos que deban tener un sistema de control y recolección de gas, el cual establece que el dueño u operador del sitio de disposición final debe realizar:

- Monitoreo de emisiones superficiales (instantáneo e integrado): Trimestral.
- Monitoreo del equipo de colección y control de gases: Trimestral.
- Monitoreo del cabezal de pozo: Mensual.

En complemento a este monitoreo, el reglamento también fija límites de concentraciones para el monitoreo de emisiones superficiales, las cuales son:

- Límites de Concentración de Metano en Superficie:
 - Monitoreo instantáneo: 500 ppm por volumen.
 - Monitoreo integrado: Promedio de 25 ppm por volumen.

Se menciona también en la norma que, ante cualquier excedencia de los límites establecidos, los dueños u operadores deben notificar a la autoridad local sobre la situación incluyendo también medidas correctivas a aplicar.

El reglamento exige que cada dueño u operador de un relleno (activo, inactivo o cerrado), debe hacer un reporte anual con la siguiente información:

- Información sobre el relleno, nombre, dueño u operador, dirección, georreferencia más actual, y otros antecedentes generales.
- Reporte de residuos “in situ”, si ese es el caso.
- Reporte de HIC, si ese es el caso.
- Registro de las excedencias monitoreadas.

Los métodos de fiscalización se resumen en los reportes anuales y en los avisos de excedencia de los monitoreos a la autoridad local.

Como método alternativo, y no sustitutivo, para el monitoreo de emisiones superficiales de metano, se contempla la aprobación federal del *EPA Other Test Method 51 (OTM-51)*, el cual emplea sistemas aéreos no tripulados (UAS) para llevar a cabo las mediciones.

- **Estado de Colorado, Estados Unidos**

Al evaluar instrumentos regulatorios sobre metano del estado de Colorado, se identifica:

- “5 CCR 1001-26 – Regulation Number 6” (Department of Public Health and Environment, 2020).

La regulación establece Requisitos de Informe y Reducción de Emisiones de GEI de Colorado, estableciendo exigencias de monitoreo, mantención y reporte de GEI para propietarios y operadores de las instalaciones de rellenos sanitarios; incorpora por referencia la Regla Federal de Reporte de GEI (40 CFR Parte 98) aplicables a rellenos. Además, establece estándares de desempeño para nuevas fuentes estacionarias, incluyendo los rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales.

En monitoreo, se establecen requisitos obligatorios de monitoreo para los propietarios y operadores de ciertas instalaciones, incluyendo los rellenos sanitarios municipales. Las emisiones deben ser cuantificadas anualmente siguiendo las metodologías y ecuaciones de 40 CFR Parte 98 y sus subpartes aplicables (Subparte C, si aplica, y la Subparte HH). Además, Colorado considera un monitoreo por crédito, en que para proyectos de CH₄ recuperado (biogás) destinados a generar créditos se utiliza la metodología “Landfill Gas Destruction and Beneficial Use Projects”, la cual especifica los procedimientos de recolección de datos y el monitoreo. En reporte, los propietarios/operadores deben presentar un informe de todas las emisiones de GEI del año

calendario anterior. Los GEI deben reportarse como constituyentes individuales (en ton métricas por año) y como emisiones totales (en CO₂e). Además, debe incluir toda la información sobre la instalación reportada, el periodo de reporte, fecha de envío. La verificación formal externa no es un requisito general del reporte anual de GEI, sin embargo, los reportes deben incluir una certificación firmada por el responsable/representante para validar su veracidad y completitud. Mientras que para los créditos por metano recuperado la verificación es obligatoria.

- **Estado de Oregon, Estados Unidos**

Al evaluar instrumentos regulatorios sobre metano del estado de Oregon, se identifica:

- “Chapter 340 – Division 239, Landfills gas emissions” (Department of Environmental Quality, 2025).

El reglamento aplica a todos los vertederos en el Estado que hayan recibido residuos sólidos después del 8 de noviembre de 1987 y que cumpla cierta cantidad de residuos en el sitio. Su objetivo es la regulación y el control de las emisiones de gas de vertedero, principalmente metano, mediante la exigencia de la instalación y operación de un Sistema de Recolección y Control de Gas (GCCS). Esta exigencia aplica a establecimientos que presenten una cantidad de residuos mayor o igual a 200.000 toneladas en el lugar, tener una tasa de generación de metano mayor o igual a 732 tCH₄/año y demostrar una concentración de 200 ppmv metano superficial. También los sitios de disposición final que tengan una tasa igual o superior a 8.548 tCH₄/año deben emplear un GCCS, sin necesidad de demostrar una concentración de 200 ppmv en superficie.

Para aquellos establecimientos que, en base a los requisitos anteriores, deban implementar un GCCS están obligados a realizar Monitoreos de Emisiones Superficiales (SEM), y con el sistema ya en funcionamiento estas emisiones no deben superar:

- Límites de Concentración de Metano en Superficie (instantáneo): 500 ppmv.
- Límites de Concentración de Metano en Superficie (integrada): 25 ppmv.

Este Sistema de Recolección y Control de Gas debe presentar pozos verticales u horizontales y cabezales para la extracción del gas, el cual puede ser quemado en llamarada abierta o cerrada, o puede ser utilizado para aprovechamiento energético.

El reglamento detalla que los Monitoreos de Emisiones Superficiales se realizan 4 veces en el año (de forma trimestral), y paralelamente se debe entregar un reporte por cada monitoreo realizado, también de forma trimestral. De esta misma forma, semestralmente se debe entregar un reporte que resuma la capacidad de operar del relleno, además mencionar, en el caso que aplique, las excedencias registradas en los monitoreos. Este reporte semestral también debe presentar los resultados del monitoreo mensual que se le debe aplicar al cabezal/sistema de recolección. Todos los reportes son enviados al Oregon Department of Environmental Quality (DEQ) como autoridad local.

En cuanto a la fiscalización, en este reglamento se menciona que la autoridad local se basa en la revisión periódica de los reportes y los requerimientos que la misma autoridad le solicite corregir al dueño u operador del sitio. También tiene facultades de hacer inspecciones en terreno, por sospechas o denuncias.

- **Estado de Maryland, Estados Unidos**

Al evaluar instrumentos regulatorios sobre metano del estado de Maryland, se identifica el instrumento “COMAR 26.11.42 – Control of Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfills” (Department of the Environment Maryland, 2022). El reglamento establece estándares para reducir las emisiones de metano y compuestos orgánicos no metánicos (NMOC) provenientes de vertederos de residuos sólidos municipales. Los límites de concentración de CH₄ en superficie son:

- Límites de CH₄ en Superficie (instantáneo): 500 ppmv.
- Límites de CH₄ en Superficie (integrado promedio por malla): 25 ppmv.

Además, establece umbrales de generación de CH₄ que obligan a instalar/operar un sistema de recolección y control de gases (GCCS), y parámetros de operación como temperatura y presión en pozos. El cumplimiento se asegura mediante:

- Monitoreos periódicos (superficie, pozos, equipos y fugas).
 - Monitoreo superficial: Trimestral y, en vertederos cerrados/inactivos sin excedencias durante 4 trimestres, puede pasar a anual (si existen excedencias, vuelve a ser trimestral).
 - Monitoreo pozos: Mensuales en cada pozo (se mide la presión, T°, O₂/N₂).
 - Fugas en componentes GCCS: Trimestral, si ≥ 500 ppmv implica etiquetar y reparar la fuga.
- Uso de métodos de referencia de la EPA y tecnologías avanzadas (drones, cámaras OGI, monitoreo aéreo):
 - Monitoreo superficial: Con detector según Método 21 de la EPA, a 5,08 cm (2”) de la superficie, con mallas de 0,46 ha (50.000 ft²) y registro de viento.
 - Monitoreo de pozo: Usando Métodos 3A/3C (y ASTM D6522-20 según aplique) y calibración anual de temperatura con Método 2.
 - Pruebas de desempeño de dispositivos de control: Con métodos 18, 25, 25A o 25C; tipificación de métodos y cálculo de eficiencia de destrucción.
 - Monitoreo mejorado si T° de gas en boca de pozo > 62,8 C°: O₂/N₂, T° por tramos del pozo, CO con Métodos 10, y CH₄ con Método 3C/18.
- Reportes semianuales y anuales, con registros detallados de fugas, acciones correctivas y pruebas de rendimiento.
- Mantenimiento de registros por al menos 5 años.

En reporte, se requieren informes semestrales y anuales, además de informes iniciales/actualizados de capacidad y tasa de generación; todo con registro de al menos 5 años. Debe incluir ubicaciones con coordenadas, velocidades de viento, fugas/acciones correctivas y resultados de pruebas. Los reportes se envían al Air Quality Compliance Program de MDE y, cuando corresponde, vía reportes electrónicos bajo 40 CFR. En verificación, el reglamento incorpora utilizar los métodos EPA/ASTM para trazabilidad técnica, y el Departamento puede solicitar información adicional para verificar la tasa de generación modelada; además, define especificaciones de los equipos (por ejemplo, calibración y desempeño del detector tipo con el Método 21 de la EPA para CH₄) que se deben cumplir para demostrar la verificación.

Finalmente, sobre medidas complementarias, Maryland articula esta regla dentro de su estrategia climática (GGRA) y del trabajo de la Maryland Climate Change Commission (MCCC), que impulsa desvío de residuos (reciclaje, compostaje, digestión anaeróbica, programas de restos de alimentos) para limitar el ingreso de residuos generadores de CH₄. El MDE lo gestiona vía su Waste Diversion Division y, como apoyo instrumental, reconoce tecnologías complementarias (aeronaves, OGI, drones) para mejorar el hallazgo de fugas y hotspots (no son obligatorias, pero se impulsan como buenas prácticas y apoyo al cumplimiento).

- **US EPA**

La regulación de la EPA para rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales (MSWLF, Municipal Solid Waste Landfill), promulgada según la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA, Resource Conservation and Recovery Act), fija criterios mínimos de ubicación, diseño, operación, monitoreo, cierre y post-cierre. No es una norma de emisión atmosférica de CH₄, pero exige un control de mezclas de gas explosivas con dos umbrales:

- En estructuras de la instalación el CH₄ no puede superar el 25% del Límite Explosivo Inferior (LEL, Lower Explosive Limit), excluyendo componentes del sistema de control/recuperación de gas.
- En el límite de la propiedad la concentración de CH₄ no puede exceder el LEL.

El monitoreo de CH₄ se realiza mediante un programa trimestral (ajustable según las condiciones del suelo y el contexto hidrogeológico/hidráulico), con puntos de control adecuados en las estructuras. Ante excedencias de CH₄, el operador debe notificar de inmediato a la autoridad; dentro de 7 días se deben registrar los niveles detectados y una descripción de las medidas adoptadas para proteger la salud; y dentro de 60 días se debe implementar un plan de remediación para las emisiones de metano (considera incluir una copia en el Registro Operativo y notificar su ejecución). Por último, no se exige la verificación de una tercera parte para el CH₄; sin embargo, la verificación se basa en el registro y trazabilidad documental, en la revisión de la autoridad y en certificaciones profesionales (por ejemplo, requiere un ingeniero profesional para cierre/post-cierre y un especialista en aguas subterráneas).

3.2.1.3 Canadá

- **Quebec, Canadá**

Al evaluar los instrumentos regulatorios sobre metano de la Provincia de Quebec, se identifican dos con directa regulación a los sitios de disposición final y sus emisiones:

- Capítulo Q-2, r. 19: “Regulation respecting the landfilling and incineration of residual materials” (Reglamento sobre vertido e incineración de materiales residuales) (Minister of Sustainable Development, 2025b).
- Capítulo Q-2, r. 46: “Regulation respecting a cap-and-trade system for greenhouse gas emission allowances” (Reglamento sobre un esquema de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero) (Minister of Sustainable Development, 2025a).

Ambos son insumos importantes de manera conjunta ya que conforman una estructura regulatoria de las emisiones de metano semejante a lo que las bases técnicas del proyecto buscan evaluar para el contexto nacional. El Capítulo Q-2 / r.19 fija exigencias técnicas y límites para biogás/metano en rellenos sanitarios y su monitoreo, mientras que el Capítulo Q-2 / r.46.1 regula el esquema CTS para cubrir y verificar emisiones de GEI a nivel provincial.

El primer reglamento establece estándares inequívocos para la recolección y remoción del biogás producido en rellenos sanitarios con el fin de asegurar el cumplimiento de valores límites de emisión mediante la supervisión de la concentración de metano tanto dentro del sistema como en la superficie exterior de éste, procurando vigilar la migración de metano hacia el entorno. Éste regula los siguientes contaminantes:

- CH₄
- N₂
- O₂
- Compuestos orgánicos no metánicos (COVs)

Para el metano (CH₄) fija 3 umbrales de concentración en el relleno sanitario, los cuales fueron establecidos siguiendo los siguientes criterios:

- Seguridad operacional.
- Desempeño eficaz de los sistemas de captura.
- Minimización de frecuencia de muestreo en superficie.
- Factibilidad de seguimiento y reporte al ente fiscalizador.

Así, los límites de seguridad regulados de las concentraciones de metano de rellenos sanitarios en la Provincia de Quebec corresponden a:

- Concentración de metano en el biogás inferior al 25% de su límite explosivo inferior, ó 1,25% volumen de metano presente en el biogás.
 - El límite explosivo inferior se refiere a la concentración en volumen más baja de metano en el biogás que permite mantener una antorcha en condiciones estándar (temperatura de 25 °C y presión de 101.325 kPa).
 - Se aplica cuando el biogás emitido migra y se acumula en el suelo, las estructuras e instalaciones situadas hasta a 150 m desde el sitio de disposición final.

- La concentración se mide en el suelo y al interior de los edificios/instalaciones dentro del perímetro regulado.
- Concentración máxima de metano, en la superficie de un sitio de disposición final con sistema de recolección de biogás, es de 500 ppmv:
 - Esto aplica independientemente si las superficies cuentan con una cobertura definitiva, aplica a la concentración de CH₄ en la superficie de las áreas de disposición (control de emisiones superficiales del relleno).

En monitoreo, se exige medir al menos 4 veces al año (distribuidas uniformemente), la concentración de CH₄ en el suelo y al interior de los edificios/instalaciones dentro del perímetro regulado, con más de 4 puntos alrededor de áreas de disposición y la trazabilidad de las condiciones (fecha, hora, T°, presión). Cuando está operativo el sistema de captura activa de biogás se debe medir y registrar continuamente el flujo de biogás y además debe realizar los siguientes monitoreos:

- Monitorear cada 3 meses la concentración del metano generado, y también las concentraciones del nitrógeno u oxígeno y la temperatura de cada dren y pozo del sistema de captura (para el nitrógeno no debe superar la concentración de 20%v/v y la concentración del oxígeno no debe superar el 5%v/v de concentración).
- Monitorear superficialmente siguiendo las condiciones de la Tabla 3-7.

Tabla 3-7 Variable de frecuencia de monitoreo

Cantidad de residuos	Frecuencia de monitoreo
Residuos ≤ 100.000 t/año	Al menos 1 vez por año
Residuos > 100.000 t/año	Al menos 3 veces por año (primavera, verano y otoño) o al menos 1 vez al año ³

Fuente: Elaboración propia

En reporte, se deben enviar los resultados dentro de 30 días del mes del muestreo por vía electrónica, incluyendo las medidas de CH₄ en superficie y la verificación de la eficiencia de destrucción (si aplica); si se excede un valor límite, se debe reportar en 15 días las medidas correctivas. En verificación, todos los materiales y equipos utilizados para el sistema de biogás deben ser verificados por expertos independientes antes/durante la operación mediante pruebas de laboratorio. Mientras que en cierre/post-cierre se requiere un informe de expertos que acredite el funcionamiento y cumplimiento de límites, manteniendo obligaciones mientras exista riesgo, con la posibilidad de liberación tras ≥5 años cumpliendo (incluye CH₄ <1,25% v/v en componentes del sistema, medido ≥4 veces/año).

En cuanto a la otra normativa que regula el esquema CTS (Capítulo Q-2 / r.46.1) aplica para aquellas fuentes de ciertas actividades que emitan igual o más de 25.000 toneladas métricas CO₂e/año en GEI están obligadas a ingresar al sistema Cap and Trade, siendo este mismo valor el

³ Si por 2 años de realizar el monitoreo 3 veces/año sin exceder el límite de concentración superficial, el operador o dueño puede monitorear 1 vez/año.

umbral superior por el cual pueden compensar con certificados de reducción, mientras que existen las fuentes voluntarias que son aquellas que emiten entre 10.000-25.000 toneladas métricas CO₂e/año pueden generar certificados de reducción y transarlas con las fuentes que están obligadas a cumplir.

3.2.1.4 Nueva Zelanda

Al evaluar instrumentos regulatorios sobre metano de Nueva Zelanda, se identifican dos instrumentos centrales y complementarios:

- Climate Change Response (Disposal Facilities) Regulations 2010 (vigentes desde 2011).
- Resource Management (National Environmental Standards for Air Quality) Regulations 2004 (NES-AQ).

Por una parte, se tiene la *Climate Change Response (Disposal Facilities) Regulations 2010*, el cual es un reglamento que proviene de una ley general de cambio climático llamada *Climate Change Response Act 2002*, en la cual se describe y detalla el funcionamiento del *New Zealand Emissions Trading Scheme* (NZ ETS). La regulación *CCR (Disposal Facilities)* incluye a la actividad de sitios de disposición final a reportar sus emisiones e ingresarlas al comercio de emisiones (NZ ETS). También entrega metodologías muy usadas para estimar estas emisiones (balance de masa, medición directa o método FOD⁴) y poder calcular sus unidades de contaminante correspondientes. Le otorga también, solo responsabilidad a rendir y comerciar sobre las emisiones de metano emitidas por los sitios de disposición final, y no de otro GEI.

Un aspecto clave, es que para el sector Residuos en el *NZ ETS*, la obligación de los regulados es de reportar la masa total bruta, en toneladas de residuos, que entra a los sitios de disposición final en un año para calcular las emisiones totales en base a un factor de emisión por defecto, facilitado por la autoridad ambiental.

El NZ ETS responde a la necesidad cumplir con los compromisos internacionales respecto a la emisión neta cero de GEI al 2050 y meta de reducir el metano biogénico de un 14-24% de 2017 al 2050.

Por otro lado, pero no en otra línea, se presenta la norma de calidad de aire NES-AQ la cual regula distintas actividades que afectan la calidad del aire, siendo una de estas normadas los sitios de disposición final que presenten alguna de las siguientes características:

- Capacidad total del sitio de disposición final de 1 millón de toneladas de residuos; y
- Contener 200.000 toneladas de residuos en el lugar o más.

⁴ Estos métodos pueden ser usados para el NZ ETS como para el inventario de emisiones, si bien para el NZ ETS el equipo técnico recomienda el uso del balance de masa, en el inventario nacional de Nueva Zelanda se suele usar el FOD.

También esta norma prohíbe liberar el biogás a la atmosfera, salvo en aquellos sitios de disposición final que cuenten con un sistema de control de gas adecuado, de modo que cualquier emisión superficial no supere los 5.000 ppmv de CH₄ en superficie. Para el caso de esta última situación, la norma presenta diversas obligaciones tecnológicas, en cuanto a tener:

- Secuestrador de llama.
- Equipo de succión automático.
- Medidor de temperatura.
- Encendedor automático.

También obliga a tener un sistema con alguno de los equipos mencionados en forma de respaldo de forma preventiva.

Esta normativa NES-AQ nace de una ley superior “Resource Management Act 1991” y que tiene por objetivo general promover el manejo sustentable de los recursos físicos y naturales, por ello considera al CH₄ una consecuencia del manejo de los recursos y no como un forzante climático.

El MRV considera pruebas de muestreo y avisos públicos de superaciones, en que los consejos regionales deben informar mensualmente toda excedencia. La fiscalización se refleja en inspecciones, la verificación del diseño/operación de antorchas, y el registro de la operación y de las emisiones.

3.2.1.5 Reino Unido

La evaluación de los instrumentos regulatorios sobre metano de Reino Unido, consideran las regulaciones de Escocia, Inglaterra y Gales, e Irlanda del Norte. Se obtiene que los tres reglamentos implementan la Directiva 1999/31/CE, lo cual genera un marco sinérgico que regula la autorización, operación, monitoreo y cierre de los vertederos. En Reino Unido, las normas en vertederos exigen gestionar el biogás (captura y tratamiento/uso o quema), la verificación periódica de la eficiencia del sistema de extracción de gas, y barretas geológicas con criterios de espesores y permeabilidad. Si bien no se fijan límites numéricos de emisión del CH₄, se entregan criterios técnicos y constructivos generales para su desempeño.

En monitoreo, el operador debe realizar controles periódicos de gases de vertedero (al menos CH₄, CO₂, O₂ y, según corresponda, H₂S, H₂), lixiviados y aguas superficiales/subterráneas. En la Tabla 3-8 se presenta la frecuencia de monitoreo (que aplica en todas las regulaciones identificadas para Reino Unido), se observa que, durante la fase de operación, el gas se monitorea mensualmente y, en post-cierre, cada seis meses.

Tabla 3-8 Frecuencia de monitoreo para Reino Unido

Monitoreo	Fase Operación (a)	Fase post-cierre (b)
Emisiones potenciales de gases y presión atmosférica (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ S, H ₂ , etc) (c)	Mensual	Cada seis meses
Composición del lixiviado	Trimestral	Cada seis meses
Volumen de lixiviado	Mensual (b)	Cada seis meses
Volumen y composición del agua superficial	Trimestral	Cada seis meses

(a) Se podría permitir intervalos más largos si la evaluación de los datos indica que son igualmente eficaces.

(b) La frecuencia de muestreo puede ser adaptada según la morfología de los residuos del vertedero.

(c) Estas mediciones se relacionan principalmente con el contenido de materia orgánica en los residuos.

Fuente: Elaboración propia en base a normativas de Reino Unido

Se exige inspección visual de los residuos a la entrada y en el punto de depósito, además de mantener un registro de cantidades, características, origen y ubicación. En reporte, como mínimo una vez al año el operador debe informar a la autoridad (SEPA en Escocia; Jefe Inspector en Irlanda del Norte; Environment Agency en Inglaterra y Gales) los tipos y cantidades de residuos y los resultados del programa de monitoreo. En verificación, el control de calidad de las operaciones analíticas y de las muestras representativas debe ser realizadas por laboratorios competentes, además, la autoridad realiza inspecciones iniciales y puede requerir medidas correctivas si el monitoreo evidencia efectos ambientales adversos, manteniendo obligaciones de monitoreo durante el post-cierre por el tiempo que la autoridad determine.

3.2.1.6 Unión Europea

Establece un esquema común en los Estados para reducir progresivamente el vertido—especialmente de residuos municipales biodegradables— con metas del 75%, 50% y 35% a los 5, 8 y 15 años desde su entrada en vigor. No fija límites numéricos para CH₄; sino que exige criterios técnicos y constructivos (barrera geológica, revestimiento de fondo, capa impermeable, capa de drenaje > 0,5 m y cobertura superficial > 1 m. Además, requiere sistemas de captación/extracción de biogás cuya eficiencia debe ser comprobada periódicamente, junto con el control de lixiviados y las emisiones al agua.

En MRV, el operador debe implementar un programa de control y seguimiento que considere los gases de vertedero (con frecuencia mensual), lixiviados (volumen mensual y composición trimestral) y aguas superficiales (trimestral), con ajuste de frecuencia en función de la morfología de los residuos del sitio según el permiso y monitoreo post-cierre semestral. Los operadores deben registrar tipos y cantidades vertidas y reportar anualmente los resultados de seguimiento, notificando de inmediato cualquier efecto ambiental adverso significativo. Se requiere validar mediante laboratorios competentes el control de calidad analítica para los procedimientos de control y monitoreo, sin embargo, no especifica una verificación por parte de un tercero para todos los resultados (entre ellos, el monitoreo de gas).

3.2.1.7 Colombia

Al evaluar los instrumentos regulatorios sobre metano de Colombia, se identifica que el Decreto 1784 de 2017 (que modifica el DS. 1077/2015) para la disposición final de residuos (Ministerio de Vivienda, 2017) establece una línea técnica-operativa obligatoria para rellenos sanitarios y no fija límites numéricos de emisión de CH₄; en su lugar exige la captura y quema de biogás en todas las categorías, con un diseño de drenes/chimeneas de evacuación (número, diámetro y espaciamiento).

En monitoreo, el prestador debe implementar un programa operativo que abarque el monitoreo de: biogás (definir puntos de muestreo en chimeneas o pozos, y medir CH₄, H₂S e índices de explosividad con sonda), lixiviados (caudal y calidad, al menos DBO, DQO y SST), aguas superficiales (pH, temperatura, DBO, DQO, SST), vida útil/capacidad, compactación y cobertura diaria, además de parámetros meteorológicos y control de olores, entre otros. El sitio debe contar con instrumentos de seguimiento (piezómetros, instrumentación geotécnica y pozos de monitoreo. En reporte, no se fija una frecuencia de envío a la autoridad, pero el Reglamento Operativo (instrumento interno del prestador) debe establecer manuales, procedimientos y bitácoras diarias con las actividades, condiciones climáticas, cumplimiento de medidas de control, inconvenientes y soluciones. En verificación, la norma asigna al prestador el monitoreo, seguimiento y control técnico de la operación; contempla inspección visual de residuos al ingreso y no exige una verificación de una tercera parte significativa para el monitoreo de biogás, sin perjuicio de las funciones de inspección y vigilancia sectoriales.

3.2.1.8 Australia

De los instrumentos aplicados al control de emisión de CH₄ para sitios de disposición final, se identifica el reglamento National Greenhouse and Energy Reporting (Safeguard Mechanism) Rule (Office of Parliamentary Counse, 2015) que regula a los grandes emisores de GEI entregando herramientas para calcular sus emisiones, entregando también un mecanismo para reducirlas, todo esto en el marco general de registrar las emisiones para poder facilitar el flujo de comercio de unidades de contaminantes. El requisito para que la norma aplique a distintas actividades de gran emisión es que emitan 100.000 [tonCO₂-eq] en un año financiero o fiscal, calculo que debe realizar el dueño u operador de la fuente emisora. Esta norma aplica, generando una línea base (límite máximo de emisiones) sobre las emisiones del sitio de disposición final y anualmente este límite debe ir disminuyendo en 4,9% linealmente, para dar cumplimiento de las emisiones cero al 2050.

En cuanto a los mecanismos de MRV, se menciona que la forma de medir y seguir esta disminución ya mencionada es mediante el monitoreo de la información en los mecanismos y metodologías por las que se reducirán las emisiones. Todo sitio de disposición final debe reportar de forma anual las medidas implementadas para la mitigación de emisiones, la cuantía de las reducciones, las unidades de créditos, entre otros antecedentes. En cuanto a la validación, para aquellos sitios de disposición que cuentan con emisiones iguales o superior a 1 [MtonCO₂-eq],

éstos deberán tener la verificación de un tercero independiente y el sitio también debe recibir una auditoria de los informes de forma anual.

También se identifica la guía *Enviormental Guidelines: Solid Waste Landfill*, la cual está diseñada por el estado de *New South Wales* y ofrece en detalle consideraciones y requerimientos necesarios para desarrollar un sistema de disposición final, teniendo presente las distintas relaciones de éste con el ambiente, siendo uno de estos el manejo y monitoreo de los gases resultantes (metano). Algunas consideraciones que se presentan para el manejo del gas es la liberación de este, ya sea por ventilación mediante tuberías o quemándolo en chimeneas con la idea de que dentro del sitio no se generen bolsas de biogás que puedan, eventualmente, explotar.

En cuanto al monitoreo, se entregan algunos límites de concentración del sitio de disposición final, considerando que el sitio presenta un sistema de recolección y control de gas, los cuales serían:

- Límite de 500 ppmv de metano monitoreado en superficie.
- Límite de 1% v/v de metano monitoreado en superficie.

Por último, se identifica el Carbon Credits (Carbon Farming Initiative—Reducing Methane Emissions from Landfill Gas) Methodology Determination 2025 es un instrumento regulatorio dictado en virtud de la *Carbon Credits (Carbon Farming Initiative) Act 2011*. Este documento establece las metodologías oficiales para cuantificar y acreditar la reducción de emisiones de metano provenientes de rellenos sanitarios en Australia. Se trata de un instrumento clave y habilitante para la generación de Australian Carbon Credit Units, ACCUs (Unidades de Créditos de Carbono Australiano) en sitios de disposición final, ya que define las condiciones técnicas, criterios de elegibilidad y parámetros de cálculo que deben cumplirse para que las reducciones sean reconocidas por la autoridad competente.

El instrumento regula y cuantifica tanto las emisiones abatidas mediante la captura y destrucción de metano, como aquellas reducciones asociadas al refinamiento del biogás para su conversión en biometano, permitiendo su uso como sustituto del gas natural. Asimismo, establece que solo pueden generar créditos las reducciones de los sitios que ya cuentan con la normativa ambiental cumplida, es decir, aquellas que correspondan a abatimiento adicional respecto de lo ya exigido normativamente.

En cuanto al monitoreo, reporte y verificación (MRV), el instrumento contempla dos enfoques principales de monitoreo: 1) estimación mediante metodologías de cálculo utilizando parámetros y factores establecidos en el propio instrumento y en normativa complementaria; y 2) medición directa a través de equipos de monitoreo con registro continuo de flujo y concentración de metano. En ambos casos, el reporte se realiza de forma periódica anual e incluye el detalle de los cálculos efectuados y los parámetros utilizados y su argumentación correspondiente de su uso. Cuando se emplea medición directa, debe incorporarse el registro anual de datos monitoreados.

La verificación se realiza mediante el cálculo de un tercero independiente acreditado, quien debe cumplir requisitos de competencia técnica, independencia y ausencia de conflicto de interés, conforme a lo establecido en el marco regulatorio. Finalmente, la fiscalización recae en la autoridad competente, la cual revisa los reportes presentados, evalúa la consistencia metodológica de los cálculos y valida la certificación emitida por el tercero independiente antes de reconocer las unidades de crédito correspondientes.

Las metodologías propuestas por la autoridad para el cálculo de las emisiones provienen procedimientos externos al país como los son los estándares internacionales (ISO), estándares de Estados Unidos como los de USEPA, ASTM y otros. Y también cuenta con metodologías y factores propios en base a mediciones locales medias.

3.2.1.9 Suecia

Respecto al instrumento identificado para Suecia se obtiene:

- Manual 2004:2 con directrices sobre la Ordenanza (2001:512) relativa al vertido de residuos (Swedish Environmental Protection Agency, 2004).

Corresponde a un manual de la Agencia Sueca de Protección Ambiental que guía a autoridades y operadores en la aplicación de la Ordenanza de Vertederos y del Código Ambiental. Respecto al CH₄, no fija un límite de emisión, sino que posee un enfoque regulatorio de desempeño del sistema (captura, diseño y control) y de gestión de riesgo durante la operación, cierre y post-cierre. Se debe asegurar la recolección de gas de vertederos que acepten residuos biodegradables, con sistemas diseñados para alta tasa de captura y evitar fugas, se exige evaluar periódicamente si ampliar o mejorar la planta.

En monitoreo, durante la operación, el operador debe tomar muestras y medir las estructuras/composición y asentamiento del relleno, lixiviados, aguas subterráneas/superficiales y gas de vertedero (incluido CH₄). Los sistemas de gas deben diseñarse para capturar el CH₄ en todas las partes del sitio, con alta tasa de captura y sin fugas al aire. No se fija una frecuencia de monitoreo para el gas; el manual exige evaluaciones periódicas de la eficiencia del sistema y la mantención del programa de control durante la operación y post-cierre (al menos 30 años). En reporte, no se especifica una frecuencia para reportar los datos de gas, sin embargo, los planes de acondicionamiento y cierre deben incluir: cómo se gestionará el gas recogido; auto-monitoreo y programas de control, incluye el muestreo/monitoreo y algún otro control; cálculo teórico del potencial de gas complementado con investigaciones de campo para verificar los resultados. En verificación, no se especifica una validación de tercera parte para el gas, establece que la supervisión y aprobación recaen en la autoridad y que los controles verifican la validez de los cálculos teóricos. La autoridad de inspección aprueba los planes de acondicionamiento/cierre, puede exigir investigaciones del vertedero, aprueba la cubierta final antes de cerrar el sitio y define la duración del post-cierre.

3.2.1.10 México

La NOM-083 fija especificaciones para sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de los sitios de disposición final de RSU; es obligatoria para entidades públicas y privadas responsables de la disposición final. Respecto al CH₄, no establece un límite de concentración, sino que el enfoque es de control de biogás; se debe garantizar la extracción, captación, conducción y control de biogás. Si no hay sistema de aprovechamiento, se debe quemar en pozos individuales o red de quemadores. Además, se debe estimar la cantidad de generación esperada del biogás, mediante análisis químicos estequiométricos (que consideran la composición química de los residuos por manejar).

En monitoreo, es obligatorio generar un programa de monitoreo de biogás, el cual debe tener por objetivo conocer el grado de estabilización de los residuos y detectar migraciones fuera del predio, el programa debe especificar parámetros de composición, explosividad y flujo de biogás. La norma no indica una frecuencia única de monitoreo, sino que exige una verificación periódica. En reporte, los sitios de disposición poseen instrumentos internos obligatorios: manual de operación con programas de monitoreo ambiental (biogás, lixiviados, acuíferos), control de acceso, contingencias; control de registro con generación y manejo de biogás, incluye el ingreso de residuos, secuencias de llenado; informes mensuales de actividades, incluye los registros de los monitoreos. En verificación, la evaluación de la conformidad la realizan Unidades de Verificación (UV) acreditadas y aprobadas, a petición del responsable del sitio. La UV no puede tener relación comercial con el operador o propietario. Para la verificación, la UV acuerda términos con el responsable; puede verificar por etapas/módulos, realiza visitas con inspección ocular del cumplimiento, levanta actas circunstanciadas, emite informes técnicos y, si todo cumple, emite Dictamen de Verificación (no se emite dictamen si hay incumplimiento).

3.2.2 Entrevistas complementarias

Con el fin de además levantar antecedentes desde la experiencia comprobada de implementadores de regulaciones de países de referencia destacados (California, Quebec-Canadá, Nueva Zelanda y Reino Unido), el Equipo Consultor junto a la Contraparte Técnica agendaron y ejecutaron entrevistas con representantes de dichos estados. En el anexo digital se incluye una carpeta con los documentos relativos a la entrevista, tanto las pautas como minutas o transcripciones generadas.

3.2.2.1 Estado de California – EE.UU.

La entrevista se realizó con los representantes del California Air Resources Board (CARB), con el equipo que implementa la regulación de metano en vertederos (LMR) y el programa de comercio de emisiones (cap-and-trade). La LMR de California es una normativa de las más estrictas de país, supervisando aproximadamente 190 sitios, los cuales están obligados a instalar sistemas de capturas de gas y a su destrucción o valorización.

Se indica que se trabaja en actualizar la normativa con una nueva propuesta, la cual ha incluido un taller de investigación a fines de 2022 y un taller amplio en mayo de 2023 con aportes de operadores, industria, comunidades y organizaciones ambientales. Se indica que los procesos formales duran un año y se rigen por la Ley de Procedimientos Administrativos, la cual exige participación pública, obtención de comentarios y respuesta fundamentada de la aceptación o rechazo de comentarios. Además, suelen realizar 6-12 meses de preparación previa y publicar borradores informales para recoger observaciones técnicas previo al proceso formal.

La normativa entrega un límite de fugas en superficie de 500 ppmv de CH₄ y exige reportar valores entre 200-500 ppmv a modo de seguimiento. El valor de 500 ppmv se elevó desde una propuesta inicial de 200 ppmv porque se induce a una mayor succión, lo que puede introducir oxígeno al vertedero y una combustión subterránea. Además, se indica un estándar doble de control, en que, si el promedio de una malla de 7,62 m (25 pies) supera los 25 ppmv, se deben ajustar las operaciones para reducir las emisiones. Mientras que el umbral de generación de metano usado para determinar cuándo un vertedero debe instalar un sistema de recogida y control de gases, se fijó en 3 millones de BTU/h de flujo de gas, como mínimo para la operación continua y segura de control.

Cabe destacar que el umbral de 500 ppmv es un límite puntual para reparar fugas detectadas en mediciones específicas, si un operador intenta cumplirlo mediante la succión en los pozos cercanos a este punto alto de medición (fuga), puede generar un gradiente de vacío fuerte que arrastran aire a través de grietas, introduciendo oxígeno al cuerpo del relleno y aumentando el riesgo de calentamiento o combustión subterránea. En cambio, el criterio de 25 ppmv como promedio sobre 7,62 m funciona como un estándar espacial de desempeño, dado que obliga a gestionar el campo de pozos y la cubierta de manera integral. Este enfoque reduce los puntos locales de vacío, disminuye la probabilidad de ingreso de oxígeno y prioriza controles preventivos distribuidos por sobre correcciones basadas en un punto.

La normativa regula los residuos sólidos urbanos, en la práctica incluye sitios con presencia de orgánicos degradables (>10%), independiente que acepten otros residuos. Se excluyen los vertederos de residuos peligrosos dado que están regulados por otras normativas y los residuos de construcción/demolición, dado que poseen materiales inertes como el hormigón con una baja generación de metano.

La normativa se basa en el modelo de descomposición de primer orden del IPCC como estándar oficial, pero posee dificultades por la calidad de los datos (composición real de residuos) que suelen inferir desde estudios representativos cada cuatro años, varios parámetros se fijan con supuestos conservadores, como una oxidación en cubiertas de 10% (dentro del rango del IPCC de 10-35%) ante falta de información local. Como alternativa emergente citan CALMIM, que modela el paso y la oxidación del CH₄ en la cubierta y exige datos más finos (p. ej., concentración en la interfaz residuo-cubierta y propiedades del suelo), destacando que suelos arenosos capturan/oxidan peor que arcillosos. En MRV, la norma usa mediciones continuas del gas

capturado, asumiendo para inventarios una eficiencia de captura del 75% coherente con el cumplimiento normativo; a partir de esos volúmenes se estima ex post lo emitido.

3.2.2.2 Gobierno de Quebec – Canadá

La entrevista se realizó con representantes del Ministerio de Medio Ambiente, Lucha contra el Cambio Climático, Fauna y Parques (MELCCFP) de Quebec, específicamente del equipo a cargo del esquema de comercio de emisiones (SPEDE). Participaron Mourad Ziani (líder de compensaciones), Steve Doucet-Heon (coordinador de emisores industriales y distribuidores de combustibles), Ibrahim Diallo (analista de compensaciones) y Vanessa Jaramillo (asesora de alianzas internacionales). Los funcionarios precisaron que su responsabilidad se centra en el diseño e implementación de protocolos de compensación, incluyendo uno aplicable a rellenos sanitarios, mientras que otro equipo ministerial es el encargado directo de la regulación de emisiones de metano en estos sitios.

Respecto al proceso regulatorio, explicaron que todo comienza con un estudio de factibilidad que evalúa criterios de adicionalidad y reducción potencial de emisiones, seguido de la elaboración de una versión técnica basada en metodologías internacionales adaptadas a la realidad de Quebec. En este paso, se caracteriza el universo de rellenos (cantidad, tipo, estado) y posteriormente se abre un proceso de consulta en dos etapas: una versión técnica para revisión científico-técnica y una versión borrador abierta al público general con un período de 45 días para comentarios. Señalaron que el ciclo completo de elaboración de una nueva regulación puede tardar alrededor de dos años, mientras que la incorporación de nuevas tecnologías podría resolverse en aproximadamente un año.

En cuanto a requisitos técnicos, destacaron que la regulación de rellenos en Quebec exige una eficiencia mínima de destrucción del 99,5% del metano captado, con revisiones anuales del sistema de recolección de biogás utilizando medidores de flujo, calibración de equipos y verificación de la competencia técnica del personal. El sistema de MRV se apoya en reportes de proyecto elaborados por los operadores, verificación por terceros acreditados y un recálculo independiente realizado por el propio Ministerio. Los entrevistados también resaltaron la participación de actores clave como operadores de rellenos, industrias, asociaciones gremiales y organizaciones ambientales, así como el rol importante de las consultoras en la implementación de proyectos de compensación.

3.2.2.3 Gobierno de Nueva Zelanda

Esta entrevista se aplicó al equipo encargado del Mercado de Emisiones de Nueva Zelanda (NZ ETS) del Ministerio del Medio Ambiente de Nueva Zelanda. Participaron Scott Gulliver, James Coombes y Sean Rae, participando principalmente el primero como punto focal de las respuestas y acotando los tres de que su equipo puede entregar mayores antecedentes sobre el mercado

de emisiones y no de la regulación de metano, para lo cual sería necesario entrevistar a otro equipo.

La base de existencia del NZ ETS se vincula con la exigencia de que los rellenos sanitarios sobre el umbral especificado en la regulación deben contar con Sistemas de Gestión de Biogás, lo cual se identifica como el principal motor de cambio para la reducción de emisiones del sector, más que el mercado de emisiones. Complementariamente, la mitigación del sector se ve impulsada por un impuesto municipal que incentiva a que se evite la disposición de residuos hacia rellenos, aunque no es de un valor alto y ha servido como ingreso dirigido en un 50% a la municipalidad y en un 50% al gobierno central, promoviendo además el compostaje y el reciclaje en la población.

La experiencia neozelandesa de su ETS se destaca por un aumento en el compostaje, reducción de residuos orgánicos a disposición final y un descarte de la alternativa de valoración energética de los residuos. En efecto, comentan que han crecido los negocios dedicados a la digestión de residuos alimentarios para obtener biogás y biofertilizantes. Además, es atractivo que han incluido la exportación de biogás mediante gaseoductos como destrucción válida, dado que se le considera un recurso valioso.

Respecto a la cuantificación de gases de efecto invernadero en el ETS, se confirma que utilizan un reporte anual en base al modelo FOD del IPCC, sumando la medición de la captura de biogás. En este contexto, los satélites y drones son utilizados para identificar fuentes críticas de emisión y no para medir emisiones que sean contabilizadas en el balance anual. Sin embargo, identifican problemas en la aplicación del modelo FOD y las mediciones reportadas por los operadores, como por ejemplo tasas de eficiencia mayores al 100% en la captura de biogás (cuando la realidad indica que debiese estar entre 70% y 80%). Concluyen que el uso de factores de emisión por defecto a escala nacional facilita las mediciones, pero dificulta contar con precisión por sitio para el mercado de emisiones.

Así, el equipo de Nueva Zelanda comenta que una mejora atractiva sería parametrizar por sitio las entradas al modelo FOD, habilitando a tener inventarios desde tanto un enfoque “top-down” como “bottom-up”. Como lección clave para que Chile considere, sugieren combinar la medición directa de captura con modelos mejorados del FOD por sitio, definiendo además desde el inicio exenciones y reglas claras para tratamientos energéticos y evitar arbitraje.

3.2.2.4 Gobierno de Reino Unido

Esta fue la única entrevista que se concretó presencialmente en las dependencias del Ministerio del Medio Ambiente de Chile y contó con la participación de varias personas representantes del Ministerio del Medio Ambiente de Reino Unido, incluyendo una representante de la Embajada de Reino Unido. Además, excepcionalmente participó el Jefe de División de Cambio Climático del MMA.

La mayor parte de la instancia consistió en una contextualización del proyecto de norma de emisión de metano por parte del Jefe de División de Cambio Climático del MMA al equipo británico, orientada a habilitar el desarrollo conjunto de enfoques metodológicos para construir la norma de emisión y el mercado de créditos de emisiones respectivo.

Algunas diferencias clave entre Reino Unido y Chile que se identificaron son la composición general de los residuos dispuestos a relleno sanitario y la forma de valorizarlos, ya que en el país europeo se favorece la incineración. Esto resulta en que no tengan planificado abrir nuevos sitios, sino más bien concentrarse en reducir la contaminación y mejorar la captura de biogás, de cara a que próximamente integrarán al sector residuos al mercado de créditos de emisiones de su país (*UK ETS*). Quedó pendiente de esta instancia levantar mayores antecedentes sobre el sistema MRV para este sector.

En general, no fue posible aplicar la pauta de entrevistas consensuada, por lo cual se optó por recopilar antecedentes metodológicos puntuales, pero la mayor parte de la información se encuentra disponible en la Sección 3.2.1.5.

3.3 Ventajas y Desventajas de cada regulación analizada e Impacto en la reducción de emisiones de metano

A continuación, se desarrolló un análisis comparativo de las normas e instrumentos regulatorios identificados y caracterizados en las actividades anteriores, con el propósito de evaluar las ventajas, desventajas y el impacto en la reducción de emisiones de metano.

El análisis considera la eficiencia y aplicabilidad de cada regulación al contexto nacional, considerando los compromisos establecidos en el Plan Sectorial de Mitigación (PSM) del MINSAL, en lo relativo a las metas de reducción de emisiones de metano en el sector residuos. Para cada normativa o instrumento se examinaron los aspectos descritos en la Tabla 3-9, donde aquellos con una **valoración positiva** corresponden a **ventajas** y aquellos con una **valoración negativa** a **desventajas**.

Tabla 3-9 Criterios de evaluación de ventajas y desventajas de los instrumentos normativos de emisiones de metano para rellenos sanitarios

Criterio de evaluación	Rango puntaje	Valoración	Descripción
Eficiencia	1 - 3	Positiva	3 = Exige evidencia reportada en captura y quema/valorización, posee un sistema MRV robusto y presenta amplia cobertura. 1 = Solamente entrega guías o impone obligaciones operacionales sin un sistema MRV.
Claridad	1 - 3	Positiva	3 = Indica explícitamente límites/umbrales, entrega definiciones operativas; establece plazos, responsabilidades y sanciones claras. 1 = Requiere instrumentos complementarios para inferir límites, definiciones operativas; no indica explícitamente plazos o éstos son relativos a circunstancias poco controlables. Las responsabilidades

			pueden estar explícitas, pero la competencia de los servicios no necesariamente (como, por ejemplo, del ente fiscalizador).
Compatibilidad tecnológica	0 - 3	Positiva	3 = exige o recomienda antorchas, pozos de biogás, generación eléctrica/BTES, u otra tecnología disponible en Chile. 1 = exige o recomienda tecnologías que requieren un esfuerzo significativo en importaciones, capacitaciones y/o transferencia tecnológica hacia los operadores en Chile. 0 = las tecnologías descritas no son factibles de replicar en Chile.
Fiscalización	0 - 3	Positiva	3 = La norma establece y exige inspecciones regulares, verificación de las condiciones de operación, búsqueda y detección de fugas en la superficie y la infraestructura. 0 = no existe un esquema de fiscalización.
Sinergias	0 - 2	Positiva	2 = Si se establece una potencial aplicación nacional que contribuya o se vincule al Plan Sectorial de Mitigación, la NDC, los planes de acción climática comunal, regional, Ley REP, entre otros. 0 = No es posible establecer un vínculo de aplicación.
MRV	0 - 3	Positiva	3 = Si considera reportes regulares, medición y verificación de flujos y operación, si existe trazabilidad y sanciones específicas. 2 = Si existe reporte periódico con verificación limitada. 1 = Si se exige reporte, pero no verificación. 0 = Si no existe un sistema MRV en el instrumento.
Limite CH₄	0 - 1	Positiva	1 = Se establece un límite de emisiones de metano para rellenos sanitarios. 0 = No establece.
Dificultad implementación	0 - 3	Negativa	0 = Fácil implementación, de acuerdo con juicio experto del equipo consultor completo. 3 = Difícil implementación, con significativas dificultades socioculturales, económicas, tecnológicas y operativas.
Costos	0 - 3	Negativa	0 = CAPEX y OPEX muy bajos, de acuerdo con juicio experto del equipo consultor completo. Se orienta a tecnologías de captura, antorcha, recuperación energética y sistema MRV. 3 = CAPEX y OPEX significativos, amenaza la rentabilidad de las unidades de negocio.
Barreras	0 - 3	Negativa	0 = No se identifican barreras institucionales, legales, financieras ni técnicas en capacidades para replicarse en Chile. 3 = El equipo consultor, de acuerdo con su juicio experto, considera que existen barreras en todos los ámbitos: institucional, legal, financiero y técnico.
Impacto	0 - 3	Positiva	3 = Alto 2 = Medio 1 = Bajo 0 = No existente
Puntaje	N/A	N/A	El puntaje se obtiene mediante la siguiente fórmula de cálculo: $\sum_i \left(C_{i,p} \times \frac{C_i}{\max(C_i)} \right) + C_{\text{impacto}} + C_{\text{sinergias}} - \sum_n C_{i,n}$ Donde: ■ i: puntaje del criterio “i” de evaluación. ■ p: si el criterio positivo. ■ n: si el criterio negativo.

			■ C_{impacto}: puntaje del criterio de impacto. ■ C_{sinergias}: puntaje del criterio de sinergia.
Ranking	N/A	N/A	Se jerarquizan las normas desde la perspectiva de referencia para la elaboración de su símil en Chile de mayor a menor puntaje calculado.

Fuente: Elaboración propia

Se elaboró una matriz de análisis en la hoja “BD_Análisis_Regulaciones” del anexo digital “NEMetano-Characterizacion_normas_internacionales.xlsx”. Este análisis permitió realizar una comparación entre los instrumentos, identificando aquellos con mayores ventajas y clasificando su potencial de reducción de metano en una escala cualitativa, de acuerdo con la información disponible. Así, el Equipo Consultor pudo jerarquizar los instrumentos reguladores a considerar como base o referencia para la elaboración de la norma de emisión de metano en rellenos sanitarios, los cuales se presentan en la Tabla 3-10.

Tabla 3-10 Jerarquía Internacional de instrumentos regulatorios de emisiones de metano en rellenos sanitarios

País	Estado	Nombre	Puntaje	Ranking
EEUU	Washington	Chapter 70A.540 RCW LANDFILLS—METHANE EMISSIONS	14	1
EEUU	California	Regulation on Methane in Landfills (LMR)	13	2
Canadá	Quebec	Regulation respecting a cap-and-trade system for greenhouse gas emission allowances (Capítulo Q-2, r. 46.1)	11,3	3
Reino Unido	Irlanda del Norte	Landfill regulations (Irlanda del Norte)	10,3	4
Reino Unido	Escocia	Landfill regulations (Escocia)	9,7	5
Canadá	Quebec	Regulation respecting the landfilling and incineration of residual materials (Capítulo Q-2, r. 19)	9,3	6
Australia	Nacional	Nacional Greenhouse and Energy Reporting (Safeguard Mechanism)	8,7	7
EEUU	EPA	Criteria for municipal solid waste landfills (MSWLF)	8,3	8
México	Nacional	Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003	7,3	9
Nueva Zelanda	Nacional	Resource Management (National Environmental Standards for Air Quality) Regulations 2004	6,7	10
Colombia	Nacional	Decreto 1784 de 2017	5,7	11
EEUU	California	Regulación SB 1383 (Short-Lived Climate Pollutants: Organic Waste Methane Emission Reduction)	5,7	12
EEUU	Colorado	5 CCR 1001-26 – Regulation Number 6, Part A: Standards of Performance for New Stationary Sources	5,7	13
EEUU	Maryland	COMAR 26.11.42 – Control of Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfills (MSW Landfills)	5,7	14
EEUU	Oregon	Division 239 – LANDFILL GAS EMISSIONS	5,7	15
EEUU	Washington	Landfill Methane Emissions	5,7	16
Nueva Zelanda	Nacional	Climate Change Response (Disposal facilities) regulation 2010	5,7	17
Australia	New South Wales	Environmental Guidelines: Solid Waste Landfills	5,3	18
Reino Unido	Inglaterra y Gales	Landfill regulations (Inglaterra y Gales)	4,7	19
Suecia	Nacional	Manual 2004:2 con directrices sobre la Ordenanza (2001:512) relativa al vertido de residuos	4,7	20
Unión Europea	Nacional	Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos	3,7	21

Fuente: Elaboración propia

4. Caracterización de los rellenos sanitarios del país

4.1 Identificación y caracterización de los rellenos sanitarios del país existentes y futuros (planificados o por planificar)

4.1.1 Identificación de rellenos existentes y futuros

Se identifican y caracterizan los rellenos sanitarios existentes en el país, así como aquellos sitios futuros planificados o en proceso de planificación. Se incluyen tanto los sitios destinados a la disposición de residuos domiciliarios como los mono-rellenos industriales y otras instalaciones similares que corresponden a fuentes relevantes de emisiones de metano.

Según la SUBDERE en su estudio “Diagnóstico y catastro nacional de residuos sólidos domiciliarios” (SUBDERE, 2024), los principales tipos de sitios de disposición final se definen:

- **Basural:** Sitio donde se disponen residuos sin control sanitario ni protección ambiental, de forma espontánea o programada
- **Vertedero:** Sitio planificado para disposición final de residuos, no cumple con las medidas sanitarias mínimas del DS N°189/2008 del MINSAL.
- **Relleno Sanitario:** Instalación diseñada y operada con control sanitario y ambiental, los residuos se compactan y cubren diariamente cumpliendo el DS N°189/2008 del MINSAL.

El proceso para identificar y caracterizar los sitios incluye la revisión de antecedentes desde fuentes oficiales, como el Catastro Nacional de Rellenos Sanitarios de SUBDERE, las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) disponibles en el SEIA y antecedentes técnicos complementarios. Toda la información recopilada se encuentra disponible en el anexo digital “NEMetano-02_Caracterizacion_rellenos.xlsx”.

En la Tabla 4-1 se muestra la cantidad de sitios identificados por tipo de sitio y por estado de operación y en la Sección 12.2 de Anexos se muestran los sitios de disposición identificados. Se observa que en la actualidad existen 110 sitios, de ese total, 49 corresponden a rellenos sanitarios, 36 a vertederos y 25 a basurales. Además, de los 49 rellenos sanitarios iniciales se identifican 8 rellenos sanitarios que para 2023 se encuentran por operar, siendo 40 los rellenos identificados en operación, dado que el Relleno Sanitario Bahía Murta, que aparece en operación según la SUBDERE (2024), no posee información de residuos ni comunas que dispongan en él.

Mientras que la Tabla 4-2 presenta la cantidad de sitios por región. Se observa que las regiones con la mayor cantidad de sitios son Aysén (19 sitios), Los Lagos (15), Coquimbo y la Araucanía (10 cada una), siendo los vertederos la fracción importante de los sitios en operación, mientras que los rellenos sanitarios predominan en zonas de mayor densidad poblacional como Antofagasta, Atacama, Valparaíso y la Región Metropolitana. De manera complementaria, la Figura 4-1 presenta sitios de disposición en Chile según su tipo de sitio en 2023.

Tabla 4-1 Número de sitios por tipo sitio y estado operación

Tipo Sitio	En Operación	Por Operar	Total
Basural	25		25
Relleno Sanitario	41	8	49
Vertedero	36		36
Total	102	8	110

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-2 Número de sitios por tipo de sitio y estado de operación, por región

Región	En Operación			Por Operar	Total
	Basural	Relleno Sanitario	Vertedero	Relleno Sanitario	
Región de Arica y Parinacota	1	1	1		3
Región de Tarapacá	1	3	1	4	9
Región de Antofagasta		5	3	1	9
Región de Atacama	1	4		1	6
Región de Coquimbo		1	9		10
Región de Valparaíso	2	3	1		6
Región Metropolitana de Santiago		3	1		4
Región del Libertador General Bernardo O'Higgins		2			2
Región del Maule		4			4
Región del Ñuble		1			1
Región del Biobío		3	1		4
Región de La Araucanía	2	3	5		10
Región de Los Ríos			1	1	2
Región de Los Lagos	6	2	7		15
Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo	7	6	5	1	19
Región de Magallanes y de la Antártica Chilena	5		1		6
Total	25	41	36	8	110

Fuente: Elaboración propia



Figura 4-1 Sitios de disposición en Chile 2023

Fuente: Elaboración propia desde Google Earth

4.1.2 Caracterización de los rellenos identificados

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización de los rellenos identificados a partir del levantamiento realizado en la Sección 4.1.1. Los resultados completos se encuentran sistematizados en el anexo digital “NEMetano-02_Caracterizacion_rellenos.xlsx”.

Respecto a la caracterización realizada para cada relleno, se consideró un conjunto mínimo de criterios técnicos y administrativos, entre los que destacan su ubicación, funcionamiento, el sistema de recuperación CH₄, su entidad operadora y composición del sitio. Estos parámetros permiten describir los sitios y sus principales elementos. En la Tabla 4-3 se presentan los parámetros caracterizados y una breve descripción de la información contenida en cada uno.

Tabla 4-3 Descripción de parámetros de caracterización de SDF

Agrupación	Parámetro	Descripción
Sitio	ID Sitio	Código único para identificar el sitio en la base de datos
	Nombre Sitio	Nombre del sitio de disposición final
	Estado Sitio	Situación actual (en operación, por operar)
	Clasificación Sitio	Tipo de sitio (relleno sanitario, vertedero, basural)
Ubicación	Region	Región donde se emplaza el sitio
	Comuna	Comuna donde se emplaza el sitio
	Latitud	Posición geográfica norte-sur de la comuna, expresada en grados decimales respecto al Ecuador
	Longitud	Posición geográfica este-oeste de la comuna, expresada en grados decimales respecto al meridiano de Greenwich
Funcionamiento	Superficie (ha)	Área del sitio de disposición
	Capacidad Disposicion (m3)	Volumen total autorizado/estimado para disposición
	Año Inicio	Año de inicio de operación
	Vida Útil	Duración de operación (en años)
	Año Cierre	Año de cierre operacional
	Origen Residuos	Tipo de residuos que recibe el sitio
Sistemas CH₄	Sistema Recuperacion CH ₄	Tipo general de sistema de manejo de biogás
	Tecnologia	Tecnología que considera el sistema de recuperación CH ₄
	Eficiencia Sistema Recuperacion CH ₄ (%)	Eficiencia (en %) de CH ₄ capturado/destruido
Regulación / Compromisos	Regulacion Aplicable Emisión Aire	Normas que afectan las emisiones y el manejo de biogás
	Compromisos Reduccion	Compromisos voluntarios de reducción
Entidad	N° Autorización Sanitaria	Identificación de la autorización sanitaria vigente del sitio
	N° RCA	Identificación de la RCA del sitio
	Tipo Operación	Modalidad de gestión (pública, privada, mixta)
	Propietario	Titular del sitio
	Operador	Entidad responsable de la operación diaria
	Duracion Contrato	Plazo de operación/concesión
	Mecanismo Financiamiento	Financiamiento de la operación
	Otras Entidades	Organismos relacionados
Composición	Composicion_Papel (%)	Composición de papel/cartón en residuos por sitio

Agrupación	Parámetro	Descripción
	Composicion_Textiles (%)	Composición de textiles en residuos por sitio
	Composicion_Plastico (%)	Composición de plástico en residuos por sitio
	Composicion_Vidrios (%)	Composición de vidrio en residuos por sitio
	Composicion_Metales (%)	Composición de metales en residuos por sitio
	Composicion_Materia organica (%)	Composición de materia orgánica en residuos por sitio
	Composicion_Residuos voluminosos (%)	Composición de residuos voluminosos en residuos por sitio
	Composicion_Otros (%)	Composición de otros en residuos por sitio
	Composicion_MOD (%)	Composición de materia orgánica degradable (MOD) en residuos por sitio
Observaciones	Observaciones	Comentarios relevantes de la Consultora
	Recibe_Industrial	Indica si el SDF identificado recibe residuos industriales

Fuente: Elaboración propia

Para la caracterización de los rellenos sanitarios, la información base fue obtenida principalmente del estudio “Diagnóstico y catastro nacional de residuos sólidos domiciliarios” (SUBDERE, 2024), desde donde se extrajeron antecedentes generales de los sitios, tales como nombre, estado y clasificación, además de su ubicación geográfica y aspectos operativos como año de inicio, vida útil, año de cierre, tipo de operación, propietario, operador y número de autorización sanitaria y de Resolución de Calificación Ambiental (RCA). Complementariamente, a partir de la revisión de las RCA se completó parte de la información anterior y se incorporan parámetros técnicos asociados a la gestión ambiental, entre ellos, la superficie del sitio, capacidad de disposición, origen de los residuos, sistema de recuperación de metano, tecnologías empleadas, regulación aplicable en materia de emisiones atmosféricas y compromisos de reducción.

Por otra parte, se incluyen antecedentes provenientes del “Estudio de caracterización de los residuos sólidos domiciliarios y asimilables generados a nivel municipal en Chile” (PUCV, 2024), el cual aporta información sobre la composición de los residuos para todas las comunas, excepto aquellas pertenecientes a la Región Metropolitana. Para obtener la composición se utilizó el anexo digital “NEMetano-01_Composicion_rellenos.xlsx”, en el cual, mediante una serie de pasos descritos en la hoja “Pasos”, se obtiene la información de la composición de los rellenos.

En la Figura 4-2 se presenta un esquema resumen con el procedimiento seguido para obtener la composición. Este proceso incluyó la unificación de la información de las campañas de verano e inviernos al calcular el promedio por comuna, luego se identifican las comunas que disponen en cada relleno a partir de la Subdere (2024) y se obtiene la composición promedio por comuna en cada relleno sanitario. Posteriormente, se calculó la composición promedio de cada relleno, considerando que varios de ellos reciben residuos provenientes de más de una comuna.

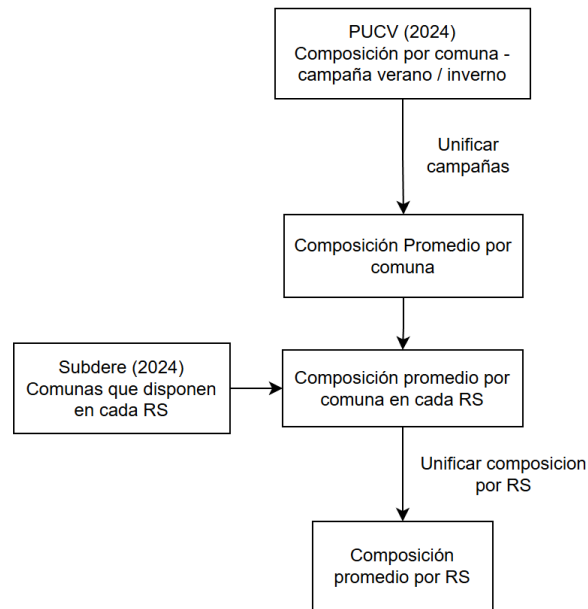


Figura 4-2 Esquema de obtención de la composición por sitio de disposición

Fuente: Elaboración propia

Uno de los resultados críticos de la caracterización es la composición de materia orgánica (y otros residuos que contienen carbono degradable), el cual se presenta en la Figura 4-3.

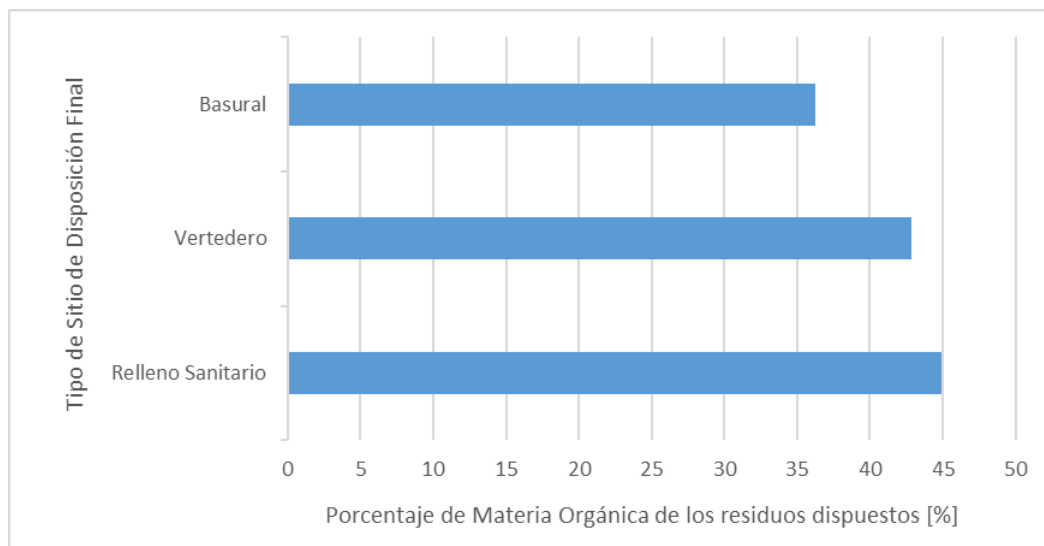


Figura 4-3 Composición promedio de materia orgánica por categoría de sitio de disposición final (SDF) en Chile al año 2025

Fuente: Elaboración propia

Se aprecia que, en los tipos de sitios de disposición final predominante en Chile hacia 2050, predomina la presencia de materia orgánica que favorece la generación de biogás y, por ende, emisiones atmosféricas de metano.

4.2 Serie histórica de los niveles de actividad de cada relleno (1950-2024)

4.2.1 Serie histórica de los niveles de actividad de los residuos sólidos domiciliarios (RSD)

4.2.1.1 Modelo conceptual

Se recreó una serie histórica desde el año 1950 hasta la actualidad sobre los niveles de actividad de cada relleno sanitario identificado en la Sección 4.1. Los niveles de actividad recreados incluyen tanto la cantidad de residuos dispuestos en cada sitio como la composición de dichos residuos, con énfasis en la materia orgánica debido a su importancia en la generación de metano (CH_4). La recreación se realiza en el *software* Analytica, mientras que los resultados de esta estimación se encuentran disponibles en el anexo digital "NEMetano_Modelo_Residuos.ana".

La estimación se elaboró a partir de diversas fuentes, entre ellas información entregada por la Contraparte Técnica, antecedentes del Sistema Nacional de Declaración de Residuos (SINADER), el Catastro Nacional de Rellenos Sanitarios de SUBDERE, datos censales y proyecciones de población del INE, del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) y el Sistema Nacional de Prospectiva (SNP), además de otras fuentes complementarias validadas.

El modelo de Analytica generado contiene cuatro módulos, tal como se muestra en la Figura 4-4. Los módulos corresponden a "Generación Residuos en tiempo", "Generación residuos por SDF", "Generación Metano" y "Generación Metano SDF", además de un "Indíces" que alimenta los módulos anteriores y se tienen variables como año, tipo SDF, nombre SDF, zona región, región, comuna, entre otros.

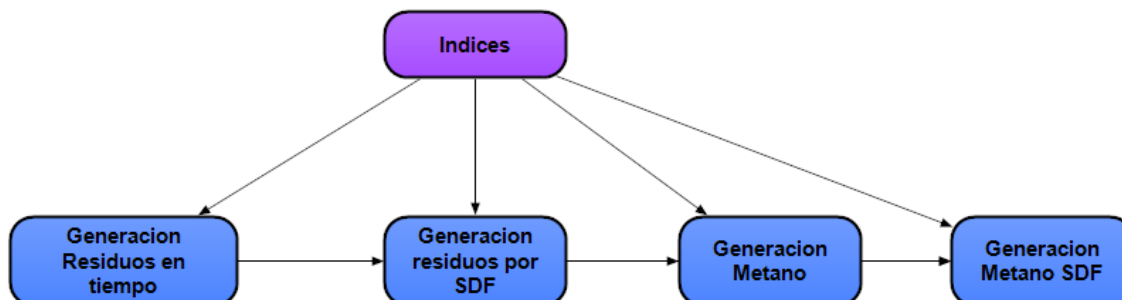


Figura 4-4 Vista general del modelo de residuos Analytica

Fuente: Elaboración propia desde *software* Analytica

Al entrar al módulo “Generación Residuos en tiempo” y luego a “RSD 1950-2024”, se visualizan de manera general los distintos nodos utilizados para recrear el nivel de actividad para los residuos sólidos domiciliarios (RSD), tal como se presenta en la Figura 4-5 y Figura 4-6. Mientras que la Figura 4-7 muestra el módulo “Generación residuos por SDF” en el cual se asignan los residuos a cada SDF por comuna.

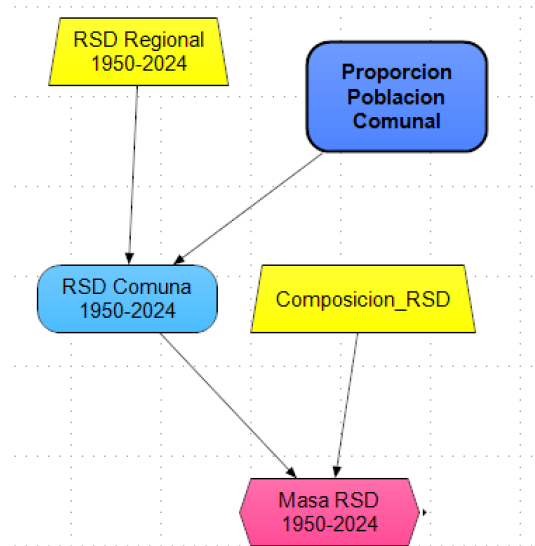


Figura 4-5 Procedimiento general NA RSD, módulo “RSD 1950-2024”

Fuente: Elaboración propia

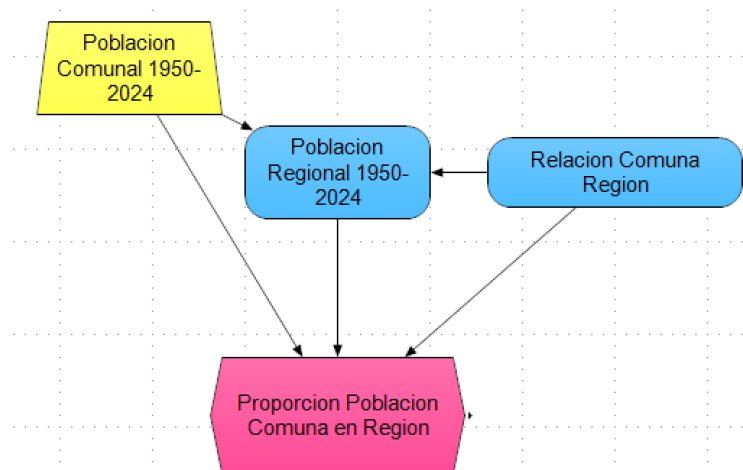


Figura 4-6 Procedimiento general NA RSD, módulo “Proporcion Poblacion Comunal”

Fuente: Elaboración propia

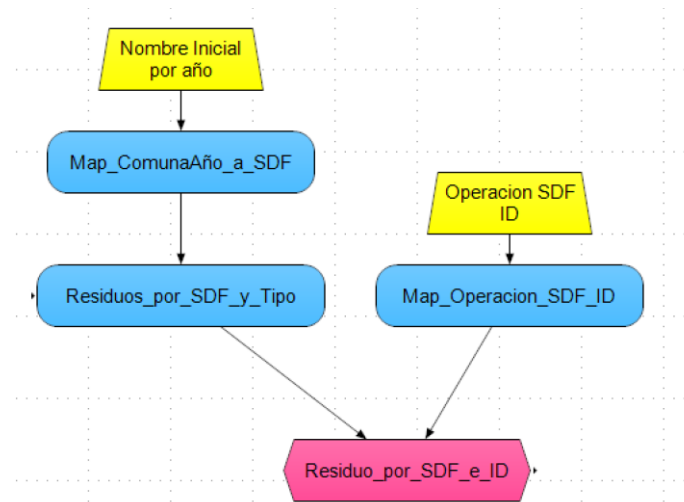


Figura 4-7 Procedimiento asignación SDF a RSD y RSI, modulo “Generación residuos por SDF”

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.2 Procedimiento de estimación

Para estimar el nivel de actividad por SDF y año, el Equipo Consultor ejecutó el siguiente procedimiento en Analytica:

- I. Calcular la proporción entre población comunal y regional:
 1. Calcular la población total por año y región, en base a los datos compilados de diversos CENSO.
 2. El nodo “Proporción Poblacion Comunal”, calcula la proporción asignable a cada comuna (F_c) como división entre Pobl_Comuna (Pob_c) y Pobl_Region (Pob_r):

$$F_c = \frac{Pob_c}{Pob_r}$$
- II. Calcular la masa de residuos sólidos domiciliarios (RSD) comunales:
 1. El nodo “RSD Regional 1950-2024” integran los valores de RSD históricos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) de Chile por región.
 2. El nodo “RSD Comuna 1950-2024” asigna a cada comuna para estimar el nivel de actividad comunal, en base a la proporción asignable a cada comuna (F_c).
- III. Relacionar la composición de los RSD por comuna:
 1. Para el nodo “Composicion_RSD” el Equipo Consultor toma como supuesto que la composición de los residuos post pandemia (2023-2050) se mantendrá constante, de acuerdo a los resultados del estudio publicado por la PUCV (2024), y que pre pandemia (1950-2022) los residuos siguen la composición descrita por el estudio de la SUBDERE (2018) por comuna.
- IV. Estimar el nivel de actividad por comuna:
 1. Calcular la multiplicación entre la masa de residuos generada por cada comuna (nodo “RSD Comunal 1950-2024”) y la proporción de composición de cada tipo de residuo (nodo “Composicion_RSD”).
- V. Asignar los residuos a cada SDF respectivo según la comuna:

1. Completar la información de SDF al que dispone cada comuna, de acuerdo con la caracterización (Sección 4.1.2).
 2. Nodo “Nombre Inicial por año” evalúa si el SDF recibe residuos de la comuna en un año t . El Equipo Consultor asume que cada comuna siempre ha dispuesto al mismo SDF para que el sitio reciba residuos durante todo el tiempo.
- VI. Evaluar el estado de operación del sitio:
1. El nodo “Operación SDF ID” agrega un ID por tipo de SDF para asignar a un ID=000=“Sitio Desconocido” o ID=666=“Sitio Futuro” al SDF que dispone la comuna para los años en que no se encuentre operativo.
 2. El nodo “Tipo SDF año” asigna el tipo de SDF de acuerdo a si en el año respectivo del dato no opera o termina la operación del SDF (por ejemplo: si la comuna dispone a un relleno sanitario y en un año $t-1$ no se encuentra en operación el sitio, entonces se clasifica como vertedero o basural, según corresponda). Para asignar qué tipo de sitio antecede al SDF, se ajusta la distribución de los sitios en los años según información del INGEI 2022, la cual posee la distribución de los sitios de manera regional.
- VII. Estimar el nivel de actividad por SDF:
1. Calcular la multiplicación entre la masa de residuos generada por cada comuna, la asignación de residuos a cada SDF y el estado de operación de los sitios.

De manera complementaria, el procedimiento anteriormente descrito se presenta resumido en la Figura 4-8. Como resultado, se obtiene la masa por categoría de residuos dispuesta a cada Sitio de Disposición Final de Chile por año para el período 1950-2024.

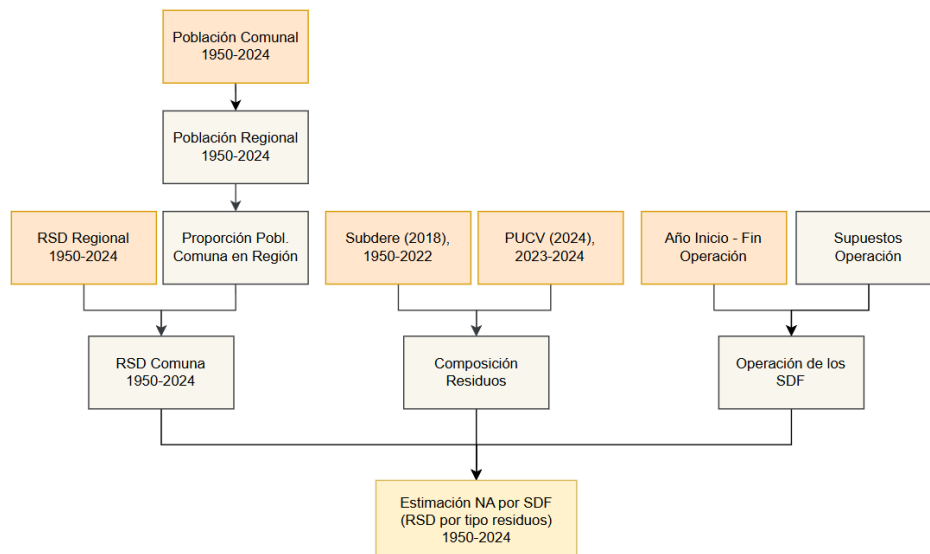


Figura 4-8 Procedimiento general para estimar los niveles de actividad de residuos sólidos domiciliarios (RSD)

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.3 Resultados de estimación

En la Figura 4-9 se grafica el nivel de actividad para las 3 categorías de sitio de disposición final: basural, vertedero y relleno sanitario anaeróbico. Cabe destacar que el nivel de actividad considera los residuos generados por los tipos de residuos que generan metano, es decir, la materia orgánica, el papel y cartón, y otros residuos.

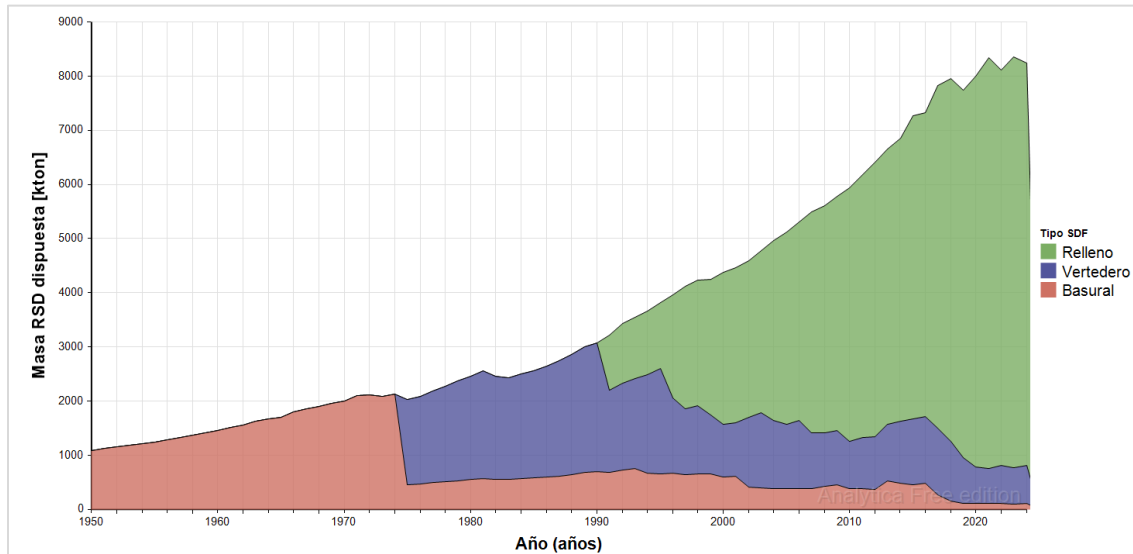


Figura 4-9 Nivel de actividad para residuos sólidos domiciliarios (RSD) de los SDF en Chile (1950-2024), datos apilados

Fuente: Elaboración propia

Los resultados consideran la existencia principalmente de basurales hasta el año 1973, donde se comienza a disponer en vertederos y, posteriormente, a rellenos sanitarios anaeróbicos desde 1995. Con la entrada de estos dos tipos de SDF, la disposición a basurales disminuye considerable, acompañada luego de una predominancia de los rellenos sanitarios.

4.2.2 Serie histórica de los niveles de actividad de los residuos sólidos industriales (RSI)

4.2.2.1 Modelo conceptual

Se recreó la serie histórica desde 1950 hasta la actualidad de los niveles de actividad de cada relleno sanitario identificado en la Sección 4.1 que recibe residuos industriales. Los resultados de esta estimación se encuentran en el anexo digital "NEMetano_Modelo_Residuos.ana".

En el modelo, al ingresar al módulo "Generación Residuos en tiempo" y luego a "RSI 1950-2024", se visualizan de manera general los distintos nodos utilizados para recrear el nivel de actividad para los residuos sólidos industriales (RSI), tal como se presenta en la Figura 4-10.

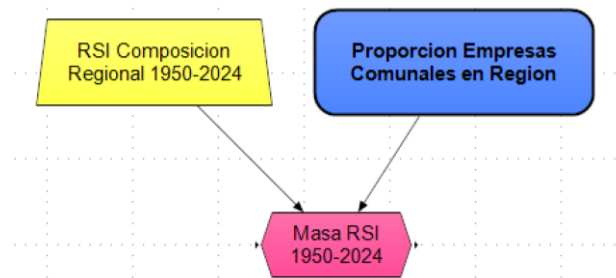


Figura 4-10 Procedimiento general NA RSI, módulo “RSI 1950-2024”

Fuente: Elaboración propia

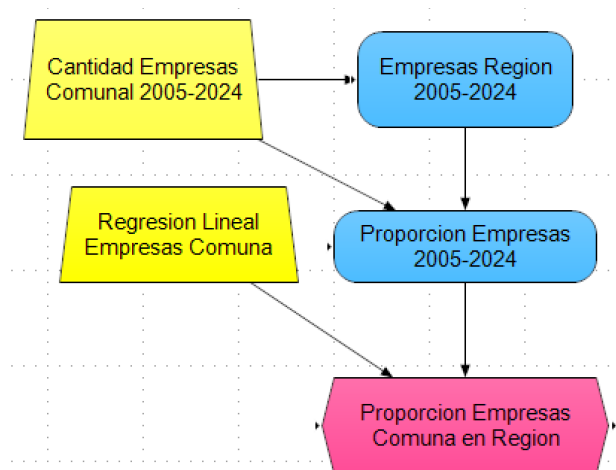


Figura 4-11 Procedimiento general NA RSI, módulo “Prop. Empresas Comunales en Region”

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2 Procedimiento de estimación

Para estimar el nivel de actividad por SDF y año, el Equipo Consultor ejecutó el siguiente procedimiento en Analytica:

- I. Calcular la proporción entre la cantidad de industrias comunal y regional:
 1. El nodo “Empresas Region 2005-2024” calcula la cantidad total de industrias por año y región, en base a los datos comunal compilados del Servicio de Impuestos Internos (SII) (2005-2024).
 2. El nodo “Regresion Lineal Empresas Comuna” muestra la regresión lineal realizada por comuna para obtener la pendiente y el intercepto, aplicar a los años sin información.
 3. El nodo “Proporcion Empresas Comuna en Region” calcula la proporción asignable a cada comuna como división entre “Empresa_Comuna” y “Empresa_Region”.
- II. Calcular la masa de residuos sólidos industriales (RSI) comunales por composición:
 1. El nodo “RSI Composicion Regional 1950-2024” contiene los valores de RSI históricos del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) de Chile por región.

2. El nodo “Masa RSI 1950-2024” estima el nivel de actividad comunal, mediante la multiplicación entre la masa de residuos por región y la proporción asignable a cada comuna o su regresión lineal, según corresponda.
- III. Asignar los residuos a cada SDF respectivo según cada comuna:
1. Completar la información de SDF al que dispone cada comuna, de acuerdo con la caracterización (Sección 4.1.2).
 2. El nodo “Nombre Inicial por año” evalúa si el SDF recibe residuos de la comuna en un año t. El Equipo Consultor asume que cada comuna siempre ha dispuesto al mismo SDF para que el sitio reciba residuos durante todo el tiempo.
- IV. Evaluar el estado de operación del sitio:
1. El nodo “Operación SDF ID” agrega un ID por tipo de SDF para asignar a un ID=000=“Sitio Desconocido” o ID=666=“Sitio Futuro” al SDF que dispone la comuna para los años en que no se encuentre operativo.
 2. El nodo “Tipo SDF año” asigna el tipo de SDF de acuerdo a si en el año respectivo del dato no opera o termina la operación del SDF (por ejemplo: si la comuna dispone a un relleno sanitario y en un año t-1 no se encuentra en operación el sitio, entonces se clasifica como vertedero o basural, según corresponda). Para asignar qué tipo de sitio antecede al SDF, se ajusta la distribución de los sitios en los años según información del INGEI 2022, la cual posee la distribución de los sitios de manera regional.
- V. Estimar el nivel de actividad por SDF:
1. Calcular la multiplicación entre la masa de residuos generada por cada comuna, la asignación de residuos a cada SDF y el estado de operación de los sitios.

De manera complementaria, el procedimiento descrito anteriormente se presenta resumido en la Figura 4-12. Como resultado, se obtiene la masa por categoría de residuos industriales dispuesta a cada Sitio de Disposición Final de Chile por año para el período 1950-2024.

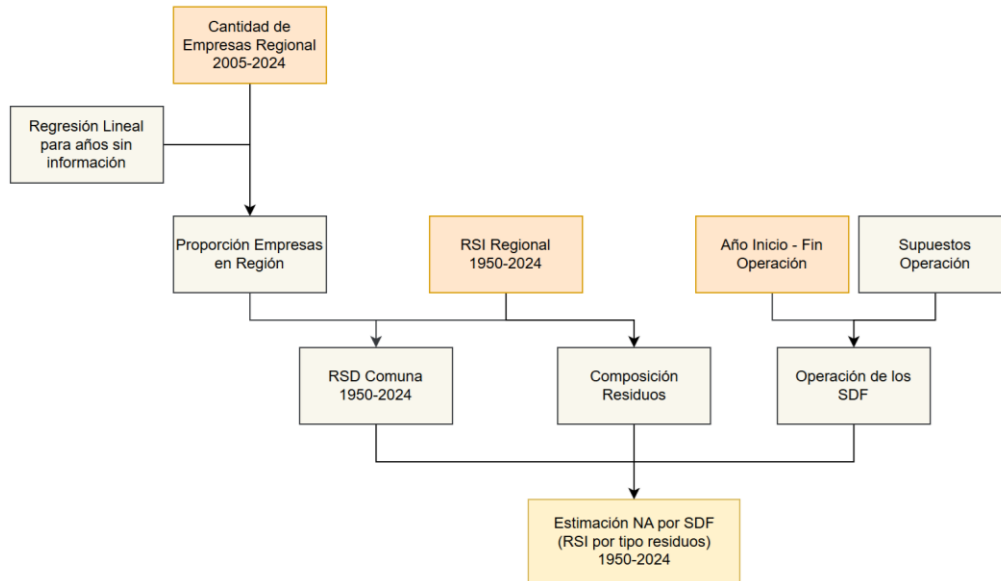


Figura 4-12 Procedimiento para estimar los niveles de actividad de residuos sólidos industriales (RSI)

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.3 Resultados de estimación

En la Figura 4-13 se grafica el nivel de actividad para las 3 categorías de sitio de disposición final: basural, vertedero y relleno sanitario anaeróbico. Se observa una baja cantidad de residuos industriales en los basurales, mientras que los rellenos identificados presentan la mayor cantidad de residuos de este tipo, especialmente desde los años 2000 en adelante dónde se observa un aumento considerable de residuos industriales en rellenos.

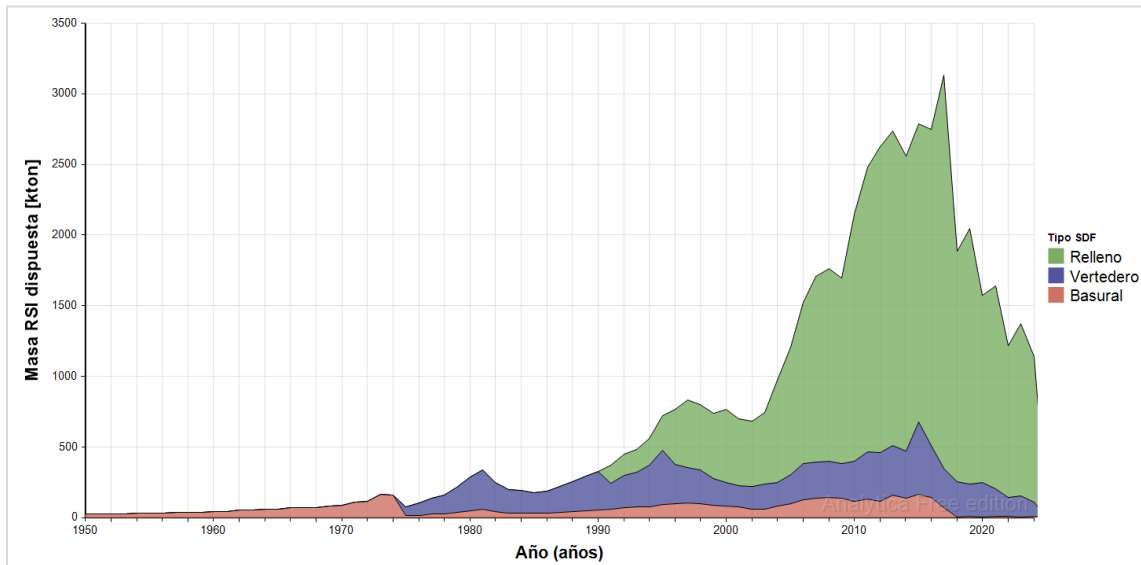


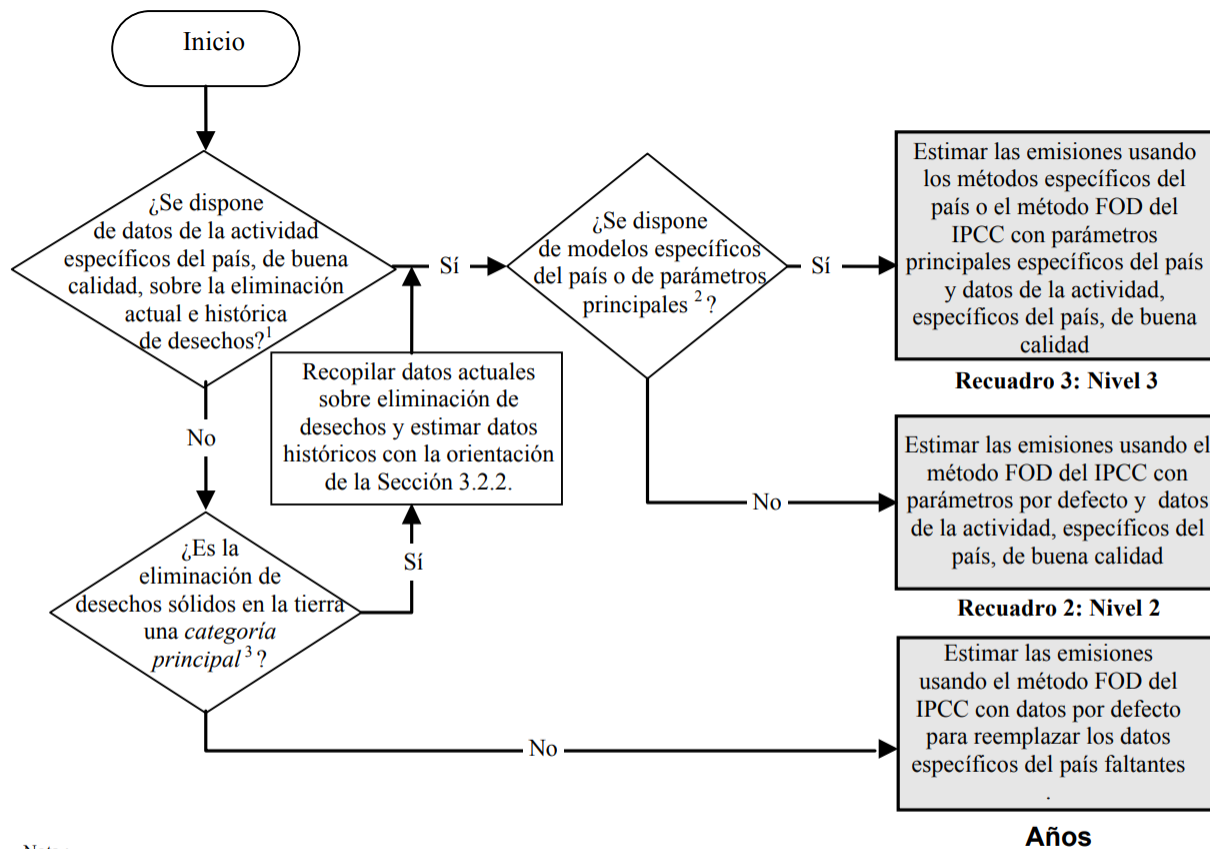
Figura 4-13 Nivel de actividad para residuos sólidos industriales (RSI) de los SDF en Chile (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

4.3 Estimación de emisiones anuales de metano para cada relleno sanitario

Se estiman las emisiones anuales de CH_4 generadas en cada relleno sanitario del país identificados en la Sección 4.1, a partir de los niveles de actividad recreados en la Sección 4.2. La estimación realizada se encuentra en el anexo digital "NEMetano_Modelo_Residuos.ana".

Para ello, se utiliza la metodología descrita en el Volumen 5 (Residuos) de las Directrices del IPCC para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (IPCC, 2006a) y su actualización en 2019 (IPCC, 2019). Dicha metodología se estructura en tres niveles (o Tiers, en inglés), donde el segundo nivel (Tier 2) permite estimar las emisiones mediante el método de Decaimiento de Primer Orden (*First Order Decay, FOD*), tal como se muestra en la Figura 4-14.



Nota :

1. Los datos de la actividad específicos del país, de buena calidad, significan los datos específicos del país sobre desechos eliminados en SEDS durante 10 años o más
2. Los parámetros principales significan: COD/L₀, COD_T y la vida media
3. Para un análisis de las categorías principales y uso de los árboles de decisión, véase el Volumen 1, Capítulo 4, «Opción metodológica e identificación de categorías principales» (nótese la Sección 4.1.2 sobre recursos limitados)

Figura 4-14 Árbol de decisión para las emisiones de CH₄ provenientes de los SDF

Fuente: (IPCC, 2006a)

4.3.1 Metodología FOD utilizada

Para la estimación de emisiones de GEI, se utiliza una metodología de Nivel 2, de acuerdo con las Directrices del IPCC (2006). Esta metodología corresponde al modelo de Decaimiento de Primer Orden (*First Order Decay*, en adelante *FOD*), el cual considera un factor exponencial que describe la fracción de material degradable que se descompone anualmente en CH₄ y CO₂, según los datos de actividad y parámetros específicos del país.

De acuerdo con el IPCC, las emisiones de CH₄ por la disposición de Residuos sólidos durante un solo año puede ser estimada siguiendo la Ecuación 4-1. En que el CH₄ se genera como resultado de la descomposición de materias orgánicas bajo condiciones anaeróbicas, una parte del CH₄ generado se oxida en la cubierta de los sitios de disposición final (SDF) o puede ser recuperada para obtener energía o la quema en antorchas, por lo tanto, la cantidad de CH₄ emitido será información a la cantidad generada.

Ecuación 4-1 Estimación de emisiones de metano por la disposición de residuos sólidos

$$CH_4Emision = \left[\sum_x CH_4generado_{x,T} - R_T \right] \cdot (1 - OX_T)$$

Donde:

- $CH_4Emision$: CH_4 emitido durante el año T , Gg.
- T : Año del inventario.
- x : Categoría de residuo o tipo/material.
- R_T : CH_4 recuperado durante el año T , Gg.
- OX_T : Factor de oxidación en el año T , fracción.

El CH_4 potencial que se genera a través de los años puede estimarse considerando las cantidades y la composición de los desechos eliminados en los SDF, y en las prácticas de gestión en los sitios de eliminación. La base del cálculo corresponde al carbono orgánico degradable disuelto (DDOC_m), entendido como la fracción del carbono orgánico que se degrada bajo condiciones anaeróbicas en los SDF. Tal como se presenta en la Ecuación 4-2, este se calcula como el producto entre la masa de residuos dispuestos (W), la fracción de carbono orgánico degradable (DOC), la fracción que efectivamente se descompone bajo condiciones anaeróbicas (DOC_f) y el factor de conversión de metano del sitio (MCF).

Ecuación 4-2 DOC disuelto a partir de los datos sobre eliminación de desechos

$$DDOC_m = W \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot MCF$$

Donde:

- $DDOC_m$: Masa de DDOC depositado, Gg.
- W : Masa de los desechos depositados, Gg.
- DOC : Carbono orgánico degradable durante el año de deposición, Gg de C/Gg de desechos.
- DOC_f : Fracción del DDOC que puede descomponerse.
- MFC : Factor de corrección de CH_4 .

El modelo FOD asume que lo relevante es la masa en descomposición existente en los SDF en cada año; por ello, el stock inicial cada periodo se trata como el “año 1” para generar un cálculo incremental. Mediante la Ecuación 4-3 y Ecuación 4-4, el modelo actualiza anualmente el DDOC_m acumulado y estima el DDOC_m descompuesto para el año T . La constante de reacción k depende de la vida media del residuo, la cual a su vez está determinada por su composición, las condiciones climáticas, y las características y operación del SDF.

Ecuación 4-3 DDOCm acumulado en los SDF al término del año T

$$DDOCma_T = DDOCmd_T + (DDOCma_{T-1} \cdot e^{-k})$$

Ecuación 4-4 DDOCm acumulado en los SDF al término del año T

$$DDOCm_{descomp_T} = DDOCm_{a_{T-1}} \cdot (1 - e^{-k})$$

Donde:

- T : Año del inventario.
- $DDOCm_{a_T}$: DDCOm acumulado en los SDF al final del año T , Gg.
- $DDOCm_{a_{T-1}}$: DDCOm acumulado en los SDF al final del año $T-1$, Gg.
- $DDOCmd_T$: DDCOm depositado en los SDF durante el año T , Gg.
- $DDOCm_{descomp_T}$: DDOCm descompuesto en los SDF durante el año T , Gg.
- $t_{1/2}$: vida media, años.
- k : Constante de reacción, con $k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$, años⁻¹.

El CH₄ generado en el año T se obtiene convirtiendo el DDOCm descompuesto de dicho año mediante la misma estequiometría (16/12) y considera la fracción F del gas, tal como se muestra en la Ecuación 4-5. Este valor representa el flujo previo a los procesos de recuperación y oxidación.

Ecuación 4-5 CH₄ generado a partir de los DDOCm en descomposición

$$CH_4_{generado_T} = DDOCm_{descomp_T} \cdot F \cdot 16/12$$

Donde:

- $CH_4_{generado_T}$: Cantidad de CH₄ generado a partir del material en descomposición.
- $DDOCm_{descomp_T}$: CH₄ descompuesto durante el año T , Gg.
- F : Fracción volumétrica de CH₄ en el gas de vertedero generado.
- 16/12: Cociente de pesos moleculares CH₄/C.

Finalmente, cuando se requiere una mayor precisión para el propio año de la eliminación (es decir, para reflejar que la reacción puede comenzar antes del 1 de enero del año siguiente), se aplican los ajustes temporales descritos en la Ecuación 4-6 y Ecuación 4-7.

Ecuación 4-6 DDOCm restante al término del año de la eliminación

$$DDOCm_{rem_T} = DDOCmd_T \cdot e^{-k \cdot (13-M)/12}$$

Ecuación 4-7 DDOCm descompuesto durante el año de la eliminación

$$DDOCm_{dec_T} = DDOCmd_T \cdot [1 - e^{-k \cdot (13-M)/12}]$$

Donde:

- $DDOCm_{rem_T}$: DDOCm eliminado durante el año T que permanece todavía al término del año T , Gg.
- $DDOCmd_T$: DDOCm eliminado durante el año T , Gg.
- $DDOCm_{dec_T}$: DDOCm eliminado durante el año T que se ha descompuesto al término del año T , Gg.
- T : Año T , año del inventario.

- k : Tasa de la constante de reacción, año⁻¹.
- M : Mes en que se impone el comienzo de la reacción, ideal al tiempo de retardo promedio +7, mes.

4.3.2 Parámetros utilizados

Para realizar los cálculos utilizando el modelo FOD, el Equipo Consultor selecciona los parámetros por defecto desde el Capítulo 3, Volumen 5 de las Directrices del IPCC para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero aplicables a los sitios de disposición final caracterizados, presentados en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4 Parámetros utilizados de las Directrices del IPCC para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero

Parám.	Valor	Unidad	Justificación/Uso	Origen	Fuente
DOC	0,15	Gg C/Gg residuos	Residuo de tipo orgánico	Domiciliario	Tabla 3.1, Capítulo 3, Volumen 5, Directrices del IPCC para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero 2006
	0,16		Residuo de tipo otros	Domiciliario	
	0,4		Residuo de tipo papel y cartón	Domiciliario	
	0,15		Residuos de tipo alimentos, bebidas y tabaco (otros que lodo)	Industrial	
	0,06		Residuos de tipo lodos agrícolas y pulpa/papel	Industrial	
	0,24		Residuos de tipo textiles	Industrial	
	0,4		Residuos de tipo pulpa y papel (otros que lodo)	Industrial	
	0,04		Residuos de tipo construcción y demolición	Industrial	
	0,16		Residuos de tipo otros	Industrial	
DOCf	0,5	Fracción	Valor por defecto recomendado por el IPCC	Ambos	Capítulo 3, Vol. 5, Directrices del IPCC para Inventarios Nacionales de GEI 2006
k	0,04	Años ⁻¹	Para los SDF en clima templado seco, con composición papel/cartón	Domiciliario	Tabla 3.3, Capítulo 3, Volumen 5, Directrices del IPCC para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero
	0,05		Para los SDF en clima templado seco, con composición de tipo otros	Domiciliario	
	0,06		Para los SDF en clima templado seco con composición de tipo orgánico, o, un clima templado húmedo para papel/cartón	Domiciliario	
	0,09		Para los SDF en clima templado húmedo, con composición de tipo otros	Domiciliario	
	0,185		Para los SDF en clima templado húmedo, con composición de tipo orgánico	Domiciliario	
	0,05		Para los SDF en clima templado seco, con cualquier composición de origen industrial.	Industrial	
	0,09		Para los SDF en clima templado húmedo, con cualquier composición de origen industrial.	Industrial	
M	13	Meses	Valor por defecto recomendado por el IPCC	Ambos	Capítulo 3, Volumen 5, Directrices del IPCC para Inventarios Nacionales de GEI
F	0,5	Fracción	Valor por defecto recomendado por el IPCC	Ambos	Capítulo 3, V5, Directrices del

Parám.	Valor	Unidad	Justificación/Uso	Origen	Fuente
		volumen			IPCC para Inventarios Nacionales de GEI 2006
MCF	0,2	Fracción	Para los SDF de tipo basural	Ambos	Tabla 3.1, Capítulo 3, Volumen 5, Directrices del IPCC para Inventarios de GEI
	0,3		Para los SDF de tipo vertedero	Ambos	
	1		Para los SDF de tipo relleno anaeróbico	Ambos	
GWP	28	CO ₂ eq/CH ₄	Para toda la estimación, coincidir con INGEI	Ambos	-

Fuente: (IPCC, 2006; 2019r)

En Analytica, el módulo “Generacion Metano” permite visualizar de manera general los nodos y el procedimiento anteriormente descrito para obtener el metano generado.

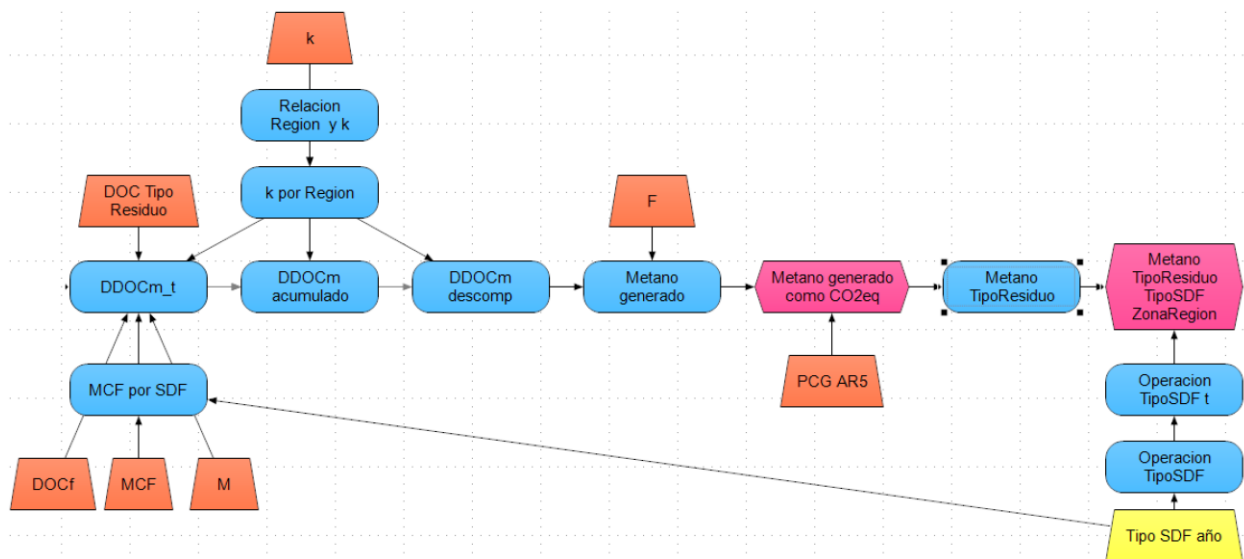


Figura 4-15 Procedimiento general generación de metano, módulo “Generacion Metano”

Fuente: Elaboración propia

4.3.3 Resultados estimación de emisiones de CH₄

4.3.3.1 Resultados estimación de emisiones de CH₄ para residuos sólidos domiciliarios (RSD)

La Figura 4-16 presenta el resultado de la generación de gases de efecto invernadero (metano en este caso) en ktCO₂ equivalente debido a la degradación de residuos sólidos domiciliarios en todos los sitios de disposición final presentes en Chile entre 1950 y 2024. Se observa cómo incrementan las emisiones con la entrada de los rellenos sanitarios y, por supuesto, el incremento de población durante el siglo 21. Se observa cómo incrementan las emisiones con la entrada de los rellenos sanitarios y, por supuesto, el incremento de población durante el siglo 21, Figura 4-17.

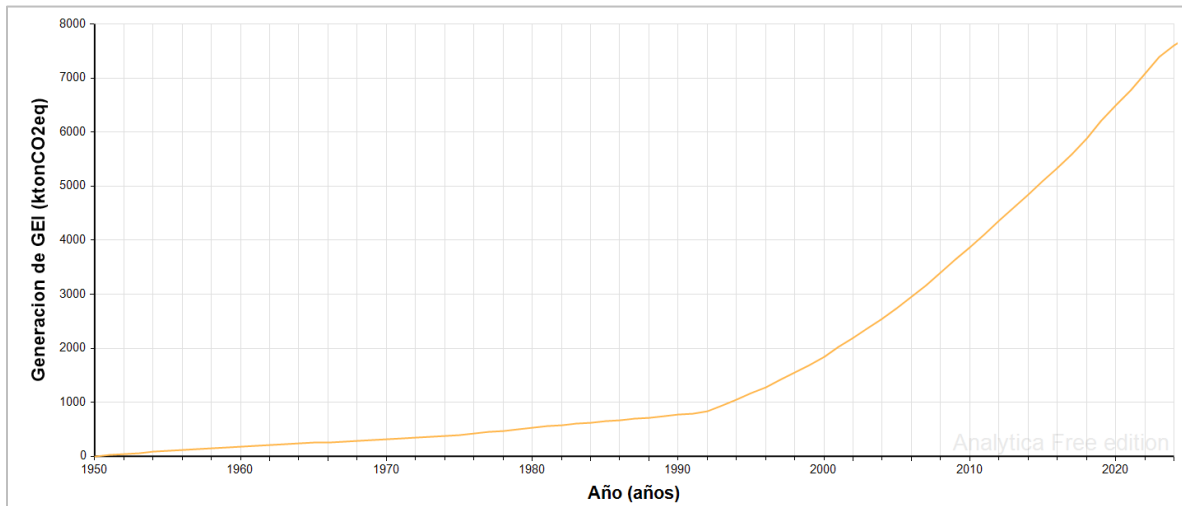


Figura 4-16 Generación de metano total desde sitios de disposición final (SDF) por residuos sólidos municipales en Chile, en ktCO₂eq. (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

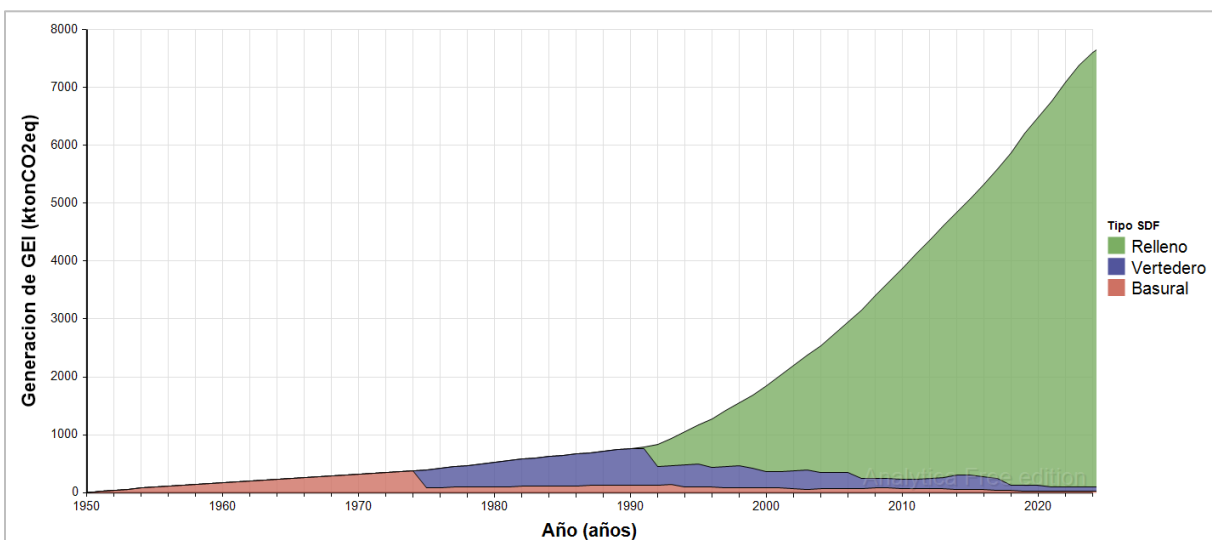


Figura 4-17 Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) en Chile, en ktCO₂eq. (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

De manera complementaria, en la Figura 4-18 se presenta la generación de GEI por tipo de sitio según la perspectiva territorial de norte a sur, respectivamente. Se observa que la mayor cantidad de emisiones se generan por los rellenos en la zona central de Chile, seguido por la zona sur.

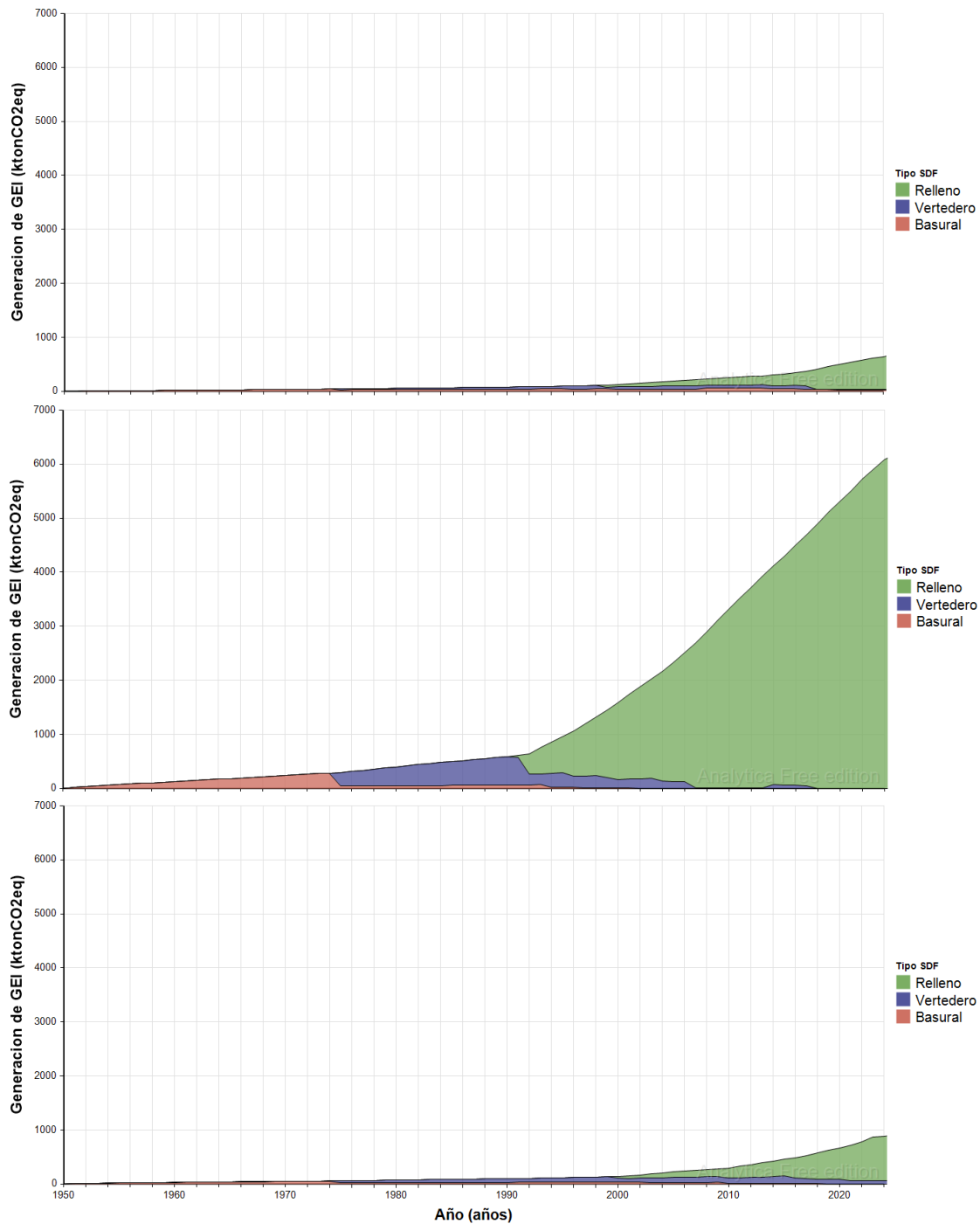


Figura 4-18 Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO₂eq. (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

Luego, la Figura 4-19 ofrece una desagregación de la generación por tipo de residuo sólido domiciliario considerado para el cálculo de emisiones de metano, la cual presenta evidencia la relevancia de contar con estrategias para gestionar los residuos orgánicos dada su alta contribución al total de emisiones. Sin embargo, es esperable que todas las categorías presenten aumento ya que los cálculos asumieron una producción de residuos per cápita constante, por lo que aumentan las emisiones debido a cada categoría proporcionalmente.

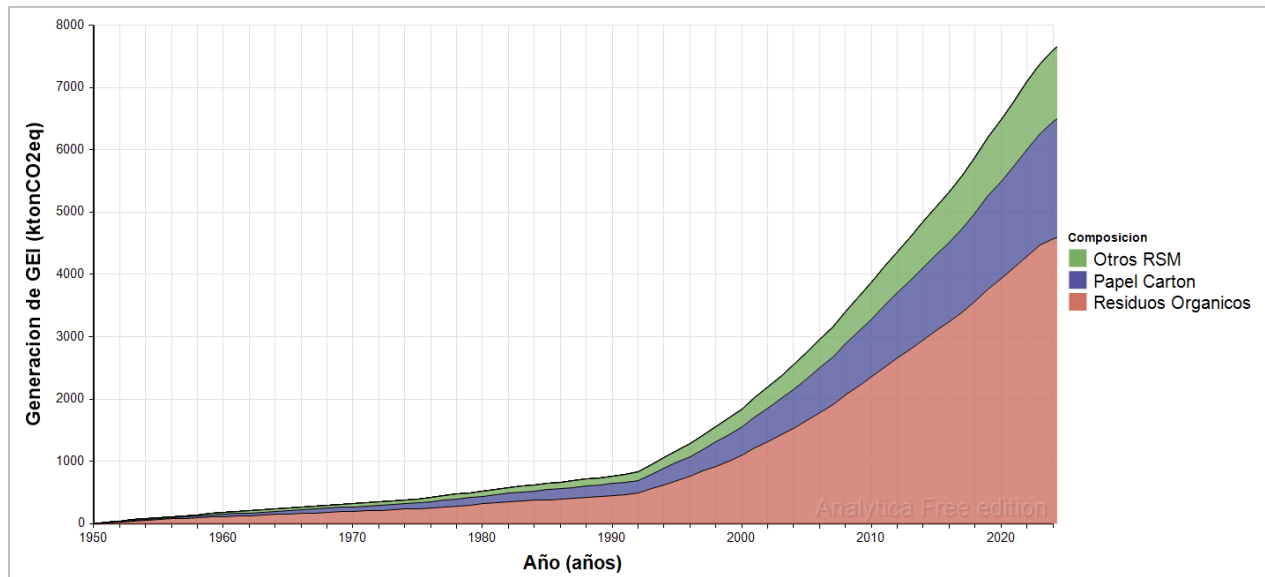


Figura 4-19 Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según composición de los residuos en Chile, datos apilados, en ktCO₂eq. (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

De manera complementaria, la Figura 4-20 presenta la generación de GEI por tipo de residuos domiciliario según la perspectiva territorial de norte a sur en Chile. Se observa que la mayor cantidad de emisiones es generada por los residuos orgánicos, siendo la principal emisora la zona central de Chile.

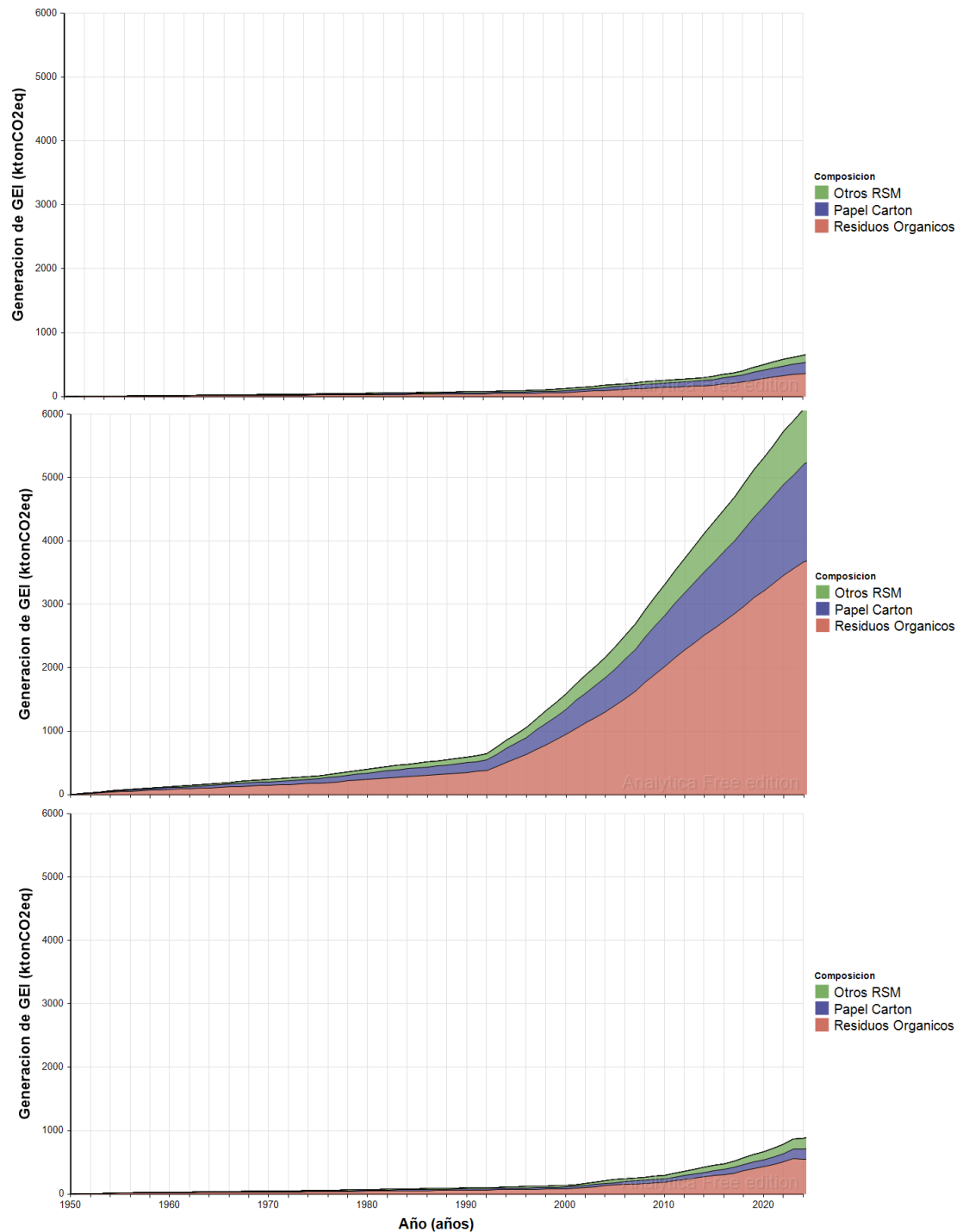


Figura 4-20 Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según composición de los residuos y la perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO₂eq. (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la Figura 4-21 desagrega las emisiones para el período 1950-2024 mediante una perspectiva territorial por región, se destaca la relevancia de las regiones Metropolitana, Maule y del Bío Bío. La zona norte posee una baja emisión dado sus condiciones climáticas no favorables para la generación de CH₄, mientras que en el sur-austral la emisión es baja en algunas regiones dada la cantidad de residuos domiciliarios dispuestos.

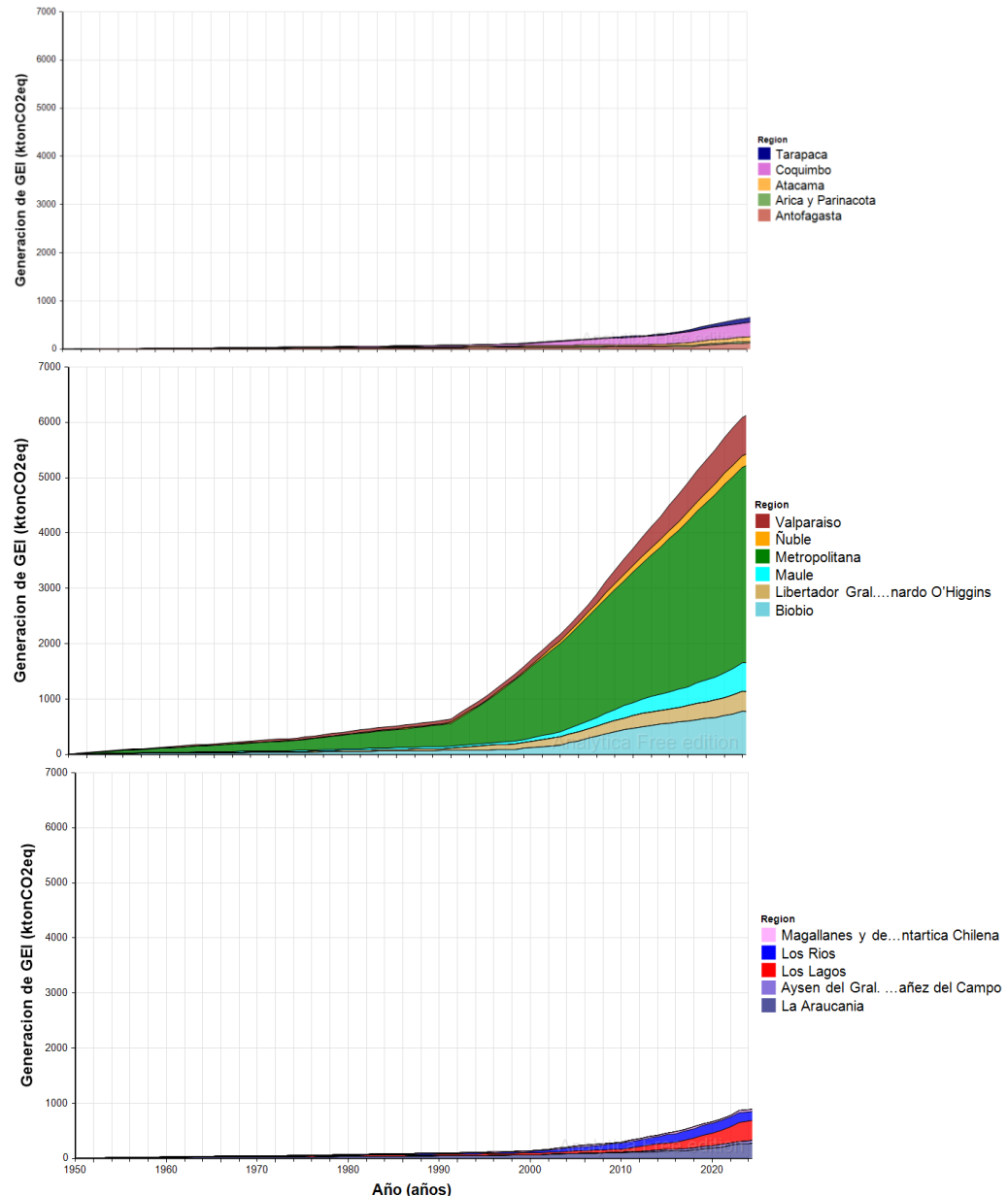


Figura 4-21 Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según región de Chile y su perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO₂eq. (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

4.3.3.2 Resultados estimación de emisiones de CH₄ para residuos sólidos industriales (RSI)

La Figura 4-22 presenta el resultado de la generación de gases de efecto invernadero (metano en este caso) en ktCO₂ equivalente en Chile entre 1950 y 2024. De la misma manera que los RSD, se observa el incremento de las emisiones con la entrada de los rellenos sanitarios, el incremento de población y el aumento de la cantidad de empresas durante el siglo 21, Figura 4-23.

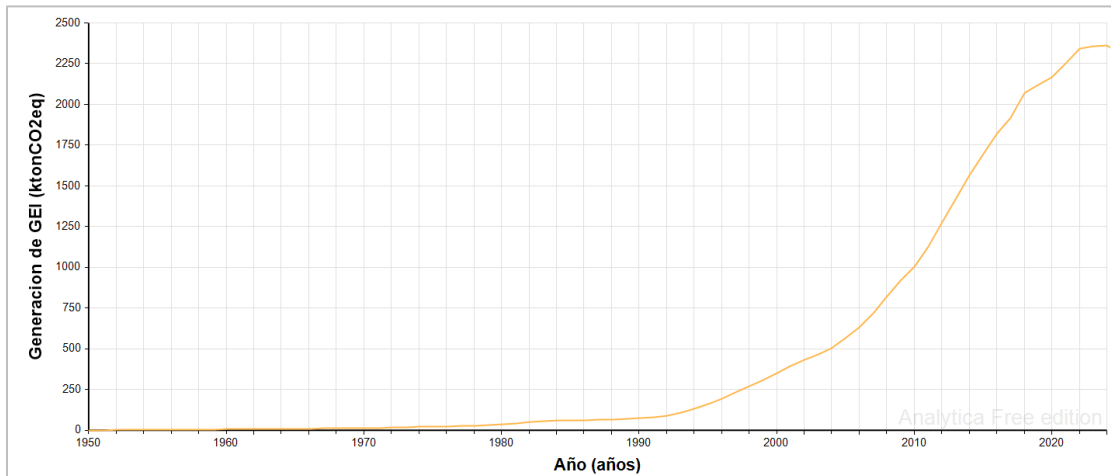


Figura 4-22 Generación de metano total desde sitios de disposición final (SDF) por residuos sólidos industriales en Chile, en ktCO₂eq. (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

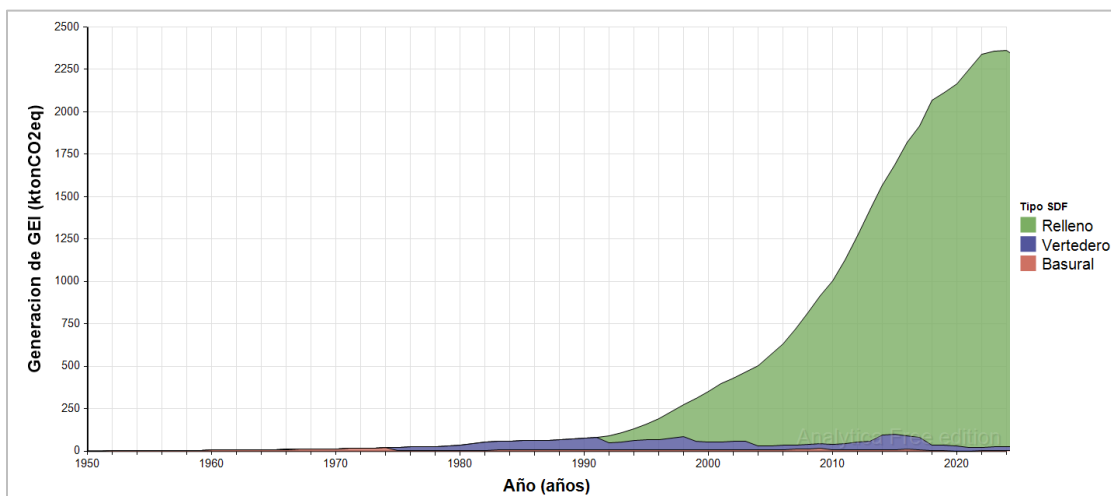


Figura 4-23 Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) en Chile, en ktCO₂eq. (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

De manera complementaria, en la Figura 4-24 se presenta la emisión de GEI por tipo de sitio según la perspectiva territorial de norte a sur, respectivamente. Se observa que la mayor

cantidad de emisiones se generan en la zona central de Chile, seguido por la zona sur y finalmente la zona norte, todas ellas con predominio de los rellenos sanitarios como fuente emisora.

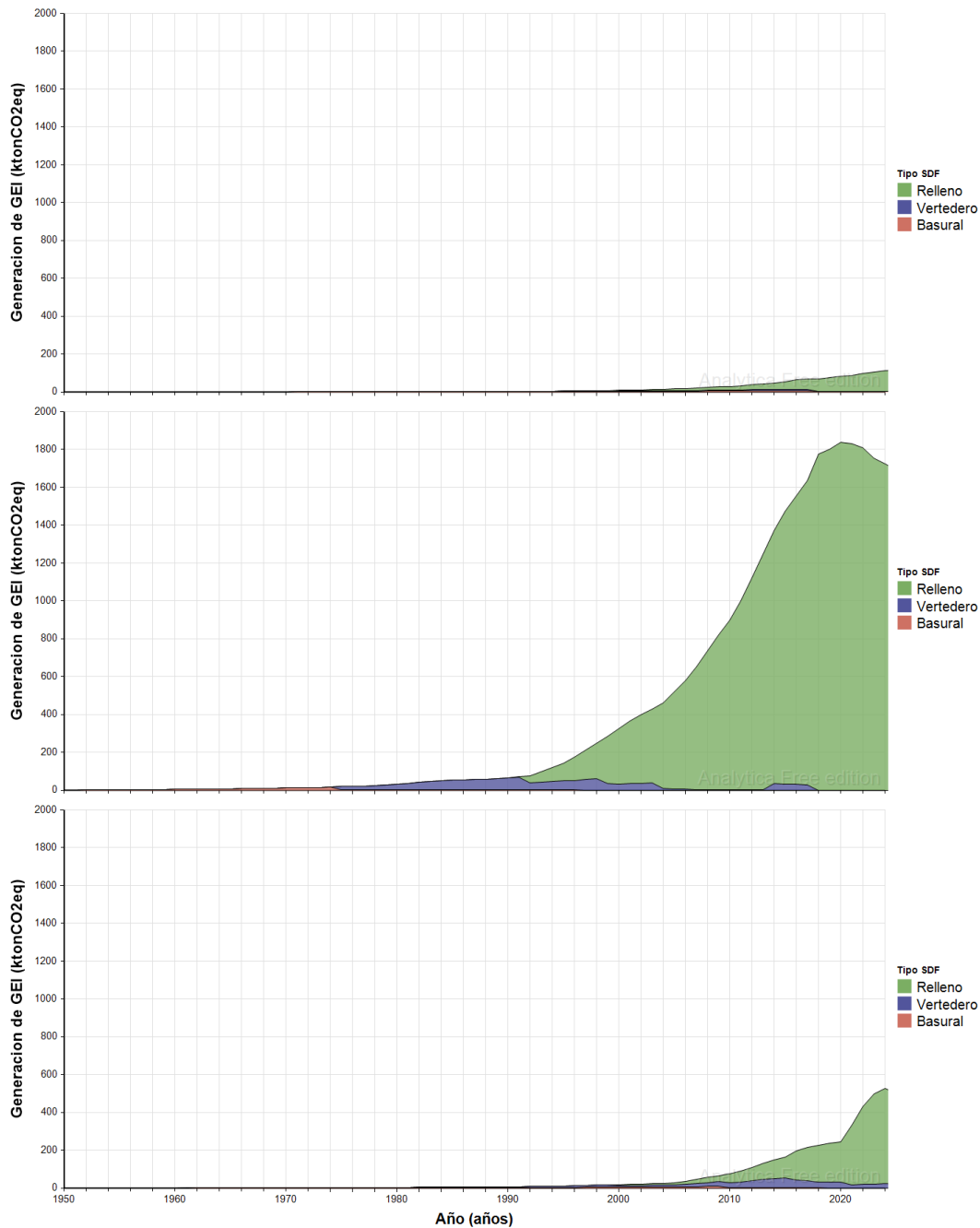


Figura 4-24 Generación de metano total por RSI, según tipo de sitio de disposición final (SDF) y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO₂eq. (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

Luego, la Figura 4-25 ofrece una desagregación de las emisiones por tipo de residuo sólido industrial considerado para el cálculo de emisiones de metano. Se observa que las mayores emisiones son del tipo “otros” dado que poseen una alta cantidad de residuos, seguidos por la pulpa y papel que posee condiciones más favorables para la emisión de metano. Cabe destacar que los residuos “otros” corresponde a una agrupación de RSI basada en la clasificación LER (Lista Europea de Residuos) utilizada por el INGEI para homologar residuos a categorías simplificadas. Esta categoría incluye residuos de diversa naturaleza, tales como metales, plásticos, vidrio, neumáticos fuera de usos, tierras y piedras, residuos eléctricos, químicos y otras no especificadas.

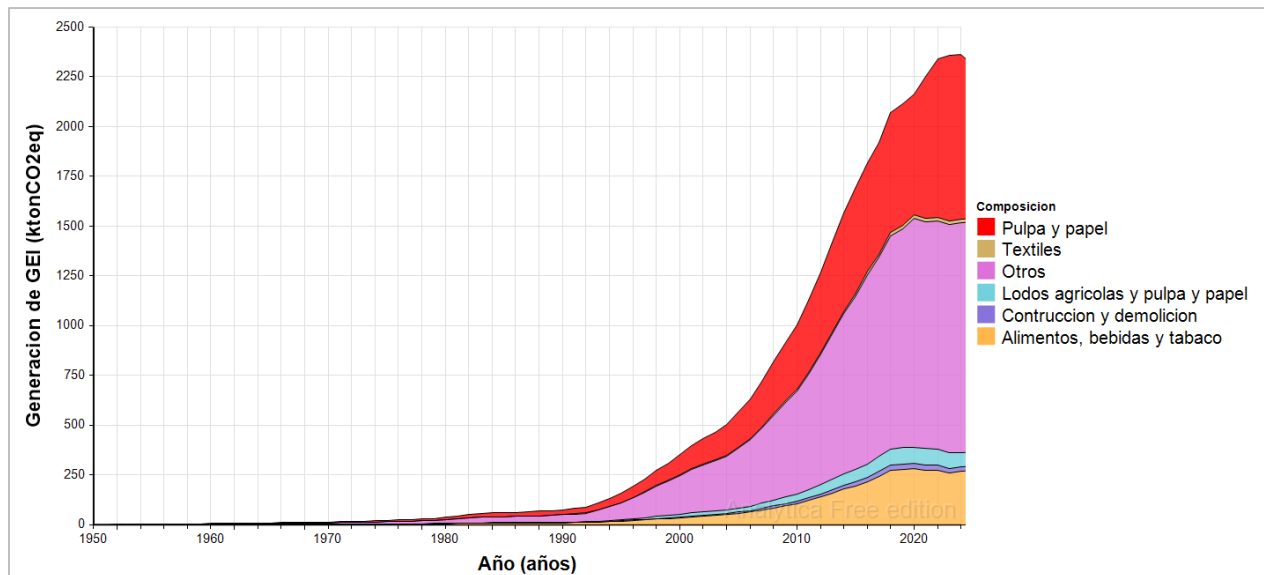


Figura 4-25 Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según la composición de los residuos en Chile, datos apilados, en ktCO₂eq. (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

De manera complementaria, la Figura 4-26 presenta la emisión de GEI por tipo de residuos industriales según la perspectiva territorial de norte a sur en Chile, de manera apilada. Se observa que la mayor cantidad de emisiones es generada por los residuos industriales de tipo otros tanto para la zona norte como la centro, mientras que en la zona centro y sur también existe una predominancia del residuo tipo pulpa y papel.

Mientras que la Figura 4-27 desagrega las emisiones para el período 1950-2024 mediante una perspectiva territorial por región, de manera apilada, se destaca la relevancia de las regiones Metropolitana y del Bio Bío. La zona norte posee una baja emisión dado sus condiciones climáticas no favorables para la generación de CH₄.

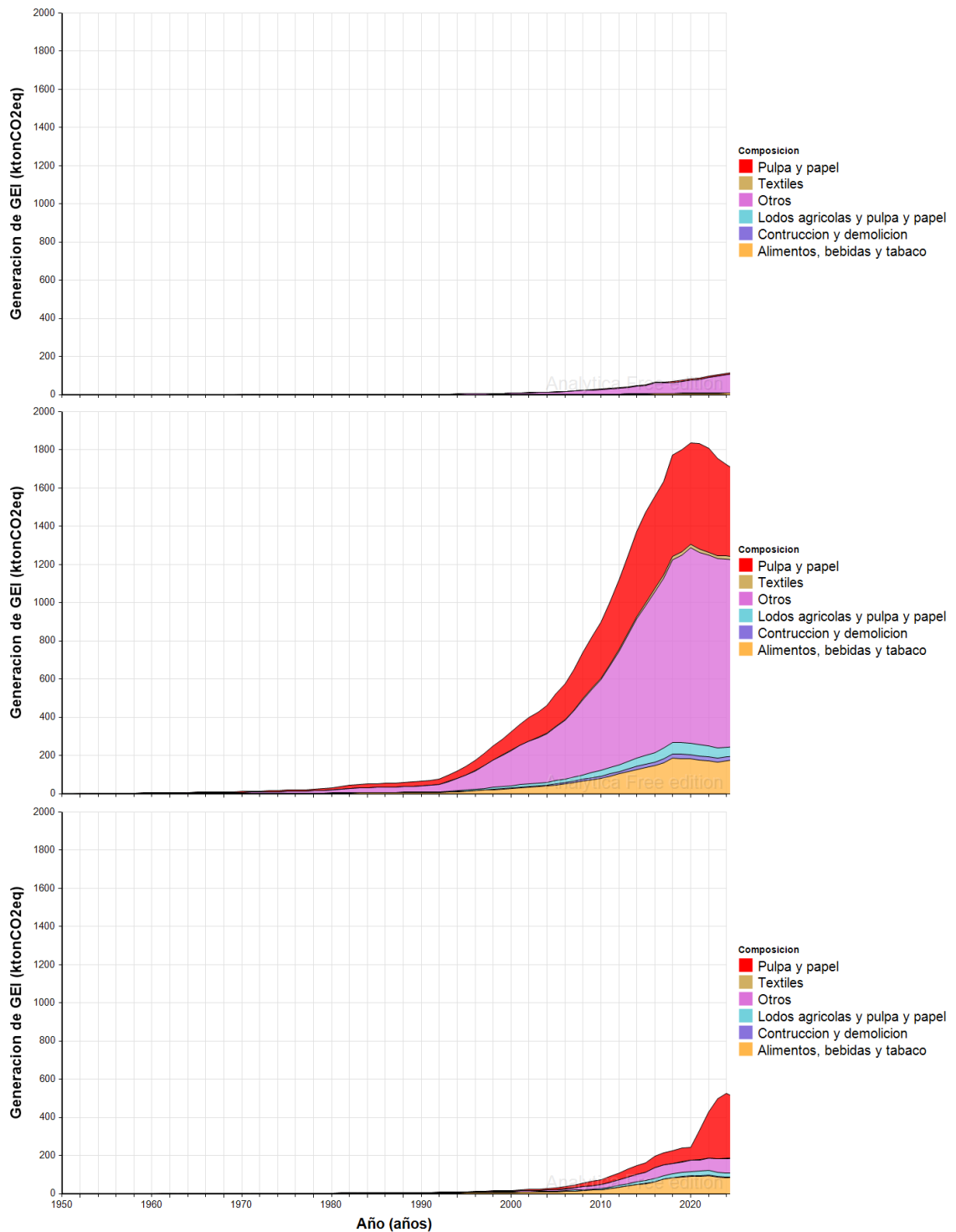


Figura 4-26 Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según composición de residuos y la perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO₂eq. (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

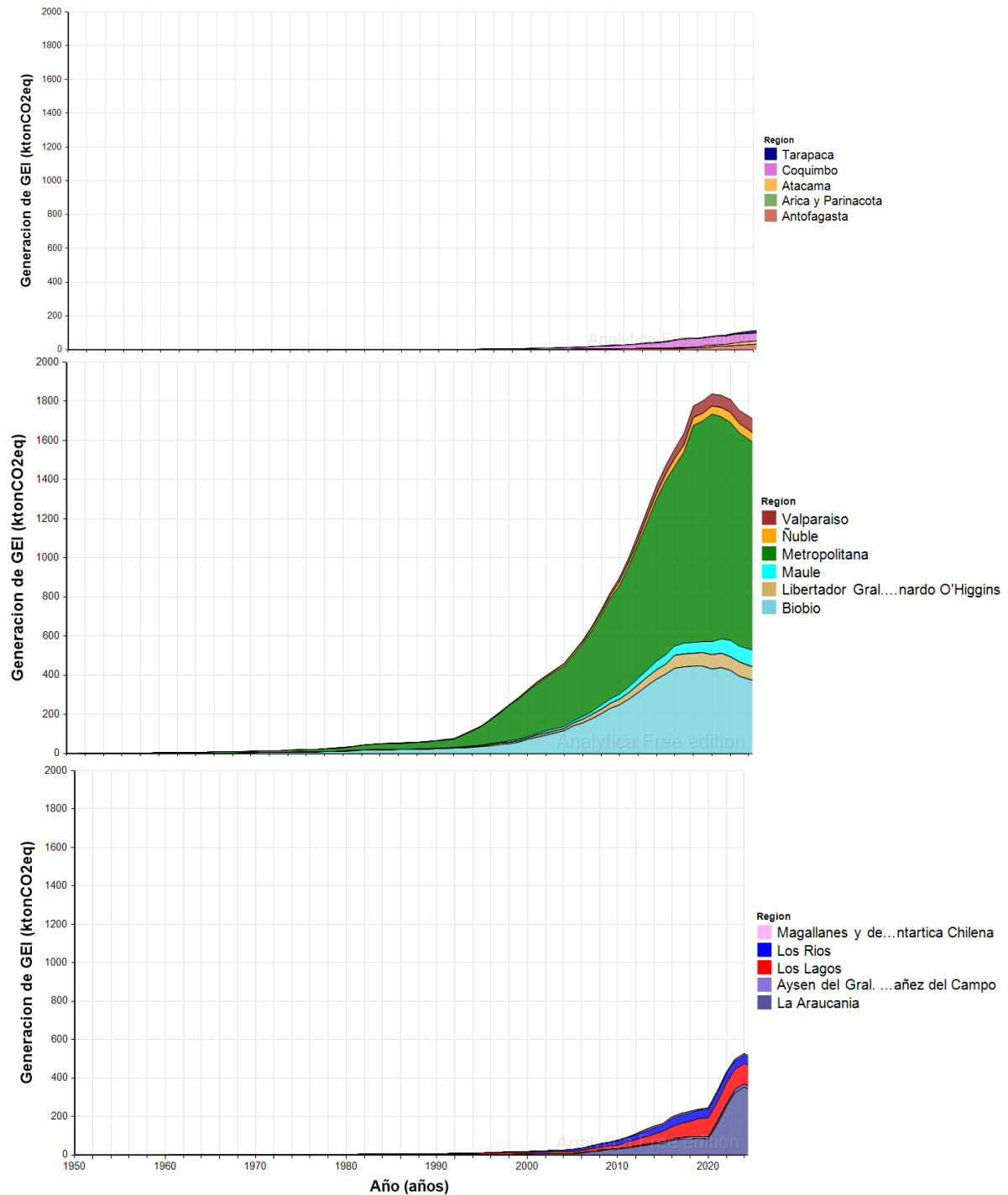


Figura 4-27 Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según región de Chile y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO₂eq. (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

4.3.4 Comparación estimación de emisiones con el reporte del INGEI

A continuación, se presenta la comparación entre la estimación de emisiones del presente estudio con las reportadas en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (en adelante, INGEI) de Chile para el año 2022 (MMA, 2024).

4.3.4.1 Metodología, parámetros y estimación del INGEI

El INGEI 2022 de Chile (MMA, 2024), estima las emisiones de varios sectores, entre ellos, residuos, según las Directrices del IPCC 2006 y su refinamiento en 2019. La metodología empleada corresponde al Nivel 2 para la categoría 5.A. “Disposición de residuos sólidos”, utilizando el modelo de Decaimiento de Primer Orden (*First Order Decay*, FOD) para estimar las emisiones de CH₄ a partir de la descomposición de la fracción de carbono orgánico degradable presente en los residuos.

El INGEI clasifica los sitios de disposición final conforme a las categorías IPCC, tal como se presenta en la Tabla 4-5. Indica que los rellenos sanitarios son considerados sistemas predominantemente anaeróbicos, con potencial de captura de biogás, mientras que vertederos y basurales son caracterizados por condiciones más aeróbicas y, por lo tanto, menores emisiones de metano.

Tabla 4-5 Homologación tipos SDF a nivel nacional según las Directrices del IPCC 2006

Nombre	Normativa de cumplimiento	Homologación
Relleno Sanitario	Cumple con la legislación vigente, DS N°189/2008 del MINSAL	5.A.1 Sitios gestionados
Vertedero y Basural	No cumple con la normativa sanitaria. Eventualmente cumple con algunas condiciones del DS 189, pero en ningún caso se puede considerar como un sitio que controla los riesgos asociados al propio sitio	5.A.2 Sitios no gestionados

Fuente: Elaboración propia en base a (MMA, 2024) con correcciones MINSAL

Respecto a los sitios de disposición, la serie del INGEI se construye con información de MMA (2010-2011), SUBDERE (2012, 2014, 2017) y SINADER (2018-2022), determinando para cada sitio los años de inicio de operación, tipo y características regulatorias.

Para los residuos, el INGEI incluye múltiples fuentes para construir la serie de residuos sólidos domiciliarios entre 1950-2022:

- 1950-2000: Estimaciones por tasas de crecimiento, basadas en What a Waste 2.0 (2018), a partir de la población y el producto interno bruto del país.
- 2001-2011: Series ajustadas provenientes de estudios del MMA y catastros municipales.
- 2012-2013: Interpolación lineal entre 2011 y 2014 por región.
- 2014-2022: Datos validados del SINADER (2014-2022), con revisiones para homogeneizar inconsistencias y estimaciones para el año 2020 debido a la pandemia.

Para la composición de los residuos, se utilizan los valores del estudio SUBDERE (2018) promediados a nivel de macrozona (norte, centro y sur). La composición se mantiene constante para toda la serie temporal entre 1950 a 2022.

Respecto a los parámetros necesarios para el modelo FOD, se obtienen principalmente de las Directrices del IPCC 2006, utilizando valores por defecto para América del Sur cuando no exista información nacional específica. Los parámetros coinciden con los presentados anteriormente en la Tabla 4-4.

Respecto al inventario, las estimaciones se realizan a nivel regional considerando la recuperación del metano y un factor de oxidación. La recuperación de metano incluye descontar la fracción capturada en los rellenos sanitarios con sistemas activos de captación y quema o valorización, utilizando la información proporcionada por las empresas operadoras. El cálculo se considera además un factor de oxidación (OX) de 10%, seleccionado mediante criterio de expertos del sector como el valor más representativo de la capa oxidativa de los rellenos sanitarios en Chile.

4.3.4.2 Comparación metodología, parámetros y estimación INGEI para residuos sólidos domiciliarios (RSD)

En la Tabla 4-6 se presenta la comparación metodológica y de parámetros entre el INGEI y la presente consultoría. En términos metodológicos ambos inventarios emplean el modelo de Decaimiento de Primer Orden (FOD) según las Directrices del IPCC 2006 y su refinamiento en 2019, utilizando los mismos parámetros base para el cálculo de emisiones de metano.

Respecto a los residuos, los residuos regionales dispuestos entre 1950-2022 se obtienen a partir de la información publicada por el propio INGEI 2022 (INGEI, 2024). Sin embargo, el inventario estimado incorpora una desagregación adicional al calcular los residuos a nivel comunal por sitio de disposición final (SDF), mediante el análisis poblacional descrito en la Sección 4.2, lo que genera diferencias en la distribución interna respecto al enfoque regional del INGEI.

Respecto a la composición de residuos, el INGEI emplea el promedio regional de la composición del estudio SUBDERE (2018) de manera constante para toda la serie histórica y el presente inventario estimado utiliza el promedio por comuna del estudio SUBDERE (2018) entre 1950-2022, incorporando para los años 2023-2024 los valores actualizados del estudio de la PUCV (2024). Cabe destacar que el INGEI utiliza el promedio regional por tipo de residuos, mientras que GreenLab-Dictuc utiliza un promedio comunal por tipo de residuos, ambos presentes en el mismo estudio de SUBDERE (2018). Esta actualización introduce variaciones en la fracción orgánica y en los valores asociados al DOC, lo que conlleva diferencias en la estimación del potencial generador de metano para los años recientes.

Por último, respecto a la distribución temporal de los sitios de disposición final (SDF), el INGEI asigna una distribución regional por año y GreenLab-Dictuc una desagregación por SDF por año. En particular, se adopta el supuesto de una evolución secuencial de los SDF, en la cual los

basurales anteceden a los vertederos y estos, a su vez, anteceden a los rellenos sanitarios. Cabe destacar que la distribución se ajusta para alcanzar una coherencia con la distribución del INGEI, pese a lo anterior, aún existe cierta variación entre ambas para algún año y/o región, dado la diferencia en la desagregación de la información. Por ejemplo, algunos años una región, según la distribución del INGEI, no presenta rellenos sanitarios, pero desde la identificación de sitios el Equipo Consultor sí identifica la presencia de al menos un relleno en esa región, por tanto, se ajustan las distribuciones para coincidir con el INGEI presentando leves diferencias en casos como el ejemplificado.

Tabla 4-6 Comparación metodología y parámetros entre INGEI y GreenLab-Dictuc para RSD

Parámetros	INGEI	GreenLab-Dictuc
Residuos sólidos domiciliarios	Residuos regionales desde múltiples fuentes y análisis, 1950-2022	Residuos regionales desde INGEI, luego se obtienen los municipales desde proporción poblacional
Composición de residuos	Promedio regional, constante según SUBDERE (2018) para 1950-2022	Promedio comunal, constante según SUBDERE (2018) para 1950-2022 y constante según PUCV (2024) para 2023-2024
Distribución de los sitios de disposición	Distribución regional según MMA, SUBDERE y SINADER	Distribución por SDF, se ajusta para cumplir distribución INGEI
Metodología estimación de emisiones	Metodología FOD	Metodología FOD
Parámetros estimación de emisiones	Directrices IPCC 2006	Directrices IPCC 2006

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la comparación de ambos inventarios estimados, es importante señalar que, si bien el INGEI 2022 incorpora en su estimación final los efectos de captura de biogás y oxidación, en esta sección se comparan únicamente las emisiones brutas de CH₄ generadas por la descomposición de residuos, es decir, las emisiones previas a cualquier medida de recuperación o abatimiento.

En la Figura 4-28 se presenta la comparación histórica de la generación de GEI entre la estimación elaborada en el presente estudio (Estimación GL) y las estimaciones del INGEI. Se observa que ambas series muestran tendencias crecientes y muy similares en su evolución temporal y magnitud durante todos los años, especialmente a partir de la década de 1990, cuando el incremento anual de residuos, la expansión del número de sitios de disposición y el aumento de la población generaron un crecimiento sostenido de las emisiones.

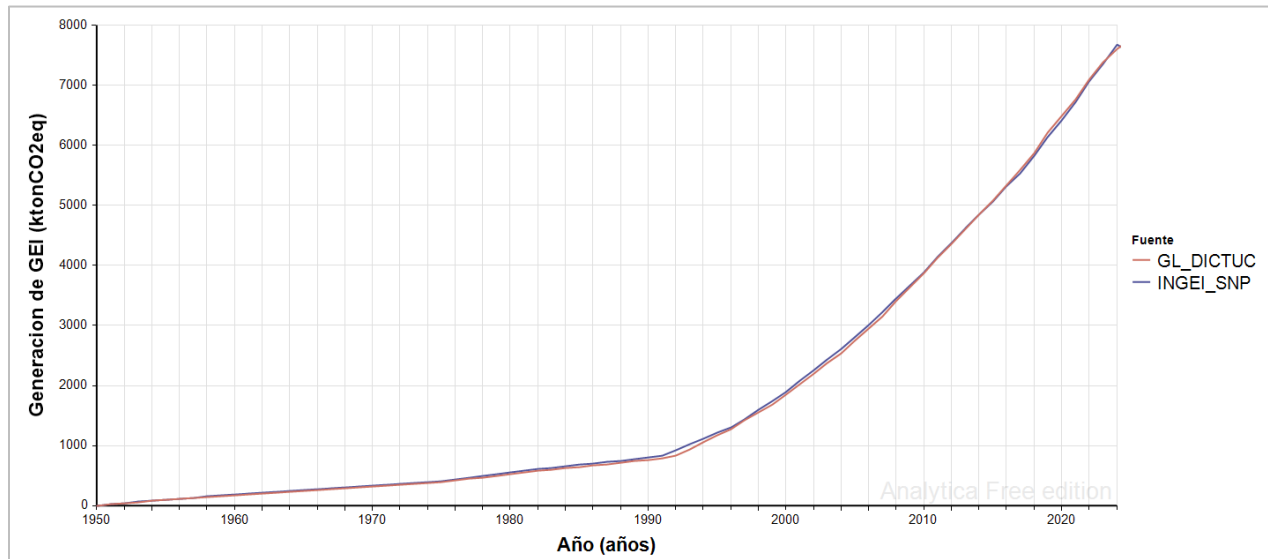


Figura 4-28 Comparación INGEI: Generación de metano total desde sitios de disposición final (SDF) por residuos sólidos municipales en Chile (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-29 se muestra la comparación de la generación por tipo de sitio de disposición entre la estimación propia y la del INGEI para 1950-2024, de manera apilada. Se observa que los rellenos anaeróbicos concentran la mayor parte de las emisiones en ambas estimaciones, siendo constantes con la serie del INGEI. Los vertederos también presentan contribuciones relevantes siendo similares ambas estimaciones hasta 1991, en que la estimación del INGEI se mantiene relativamente constante y la estimación propia disminuye de manera progresiva en el tiempo. Lo anterior se repite para los basurales, los cuales presentan valores similares hasta 1974, posteriormente, la estimación propia disminuye levemente en el tiempo.

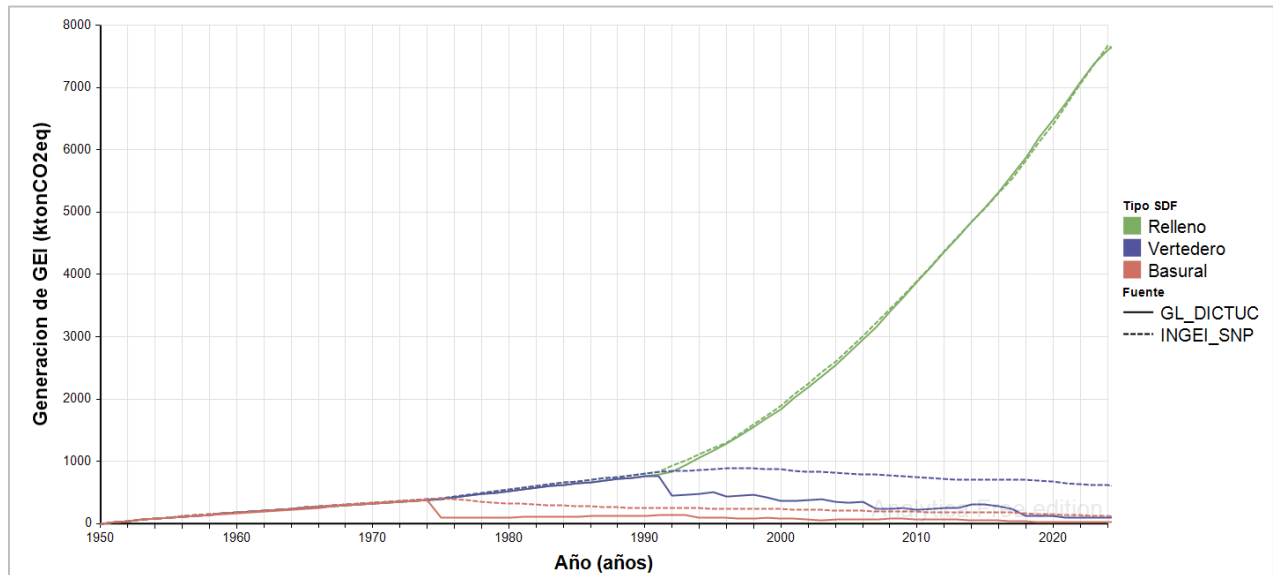


Figura 4-29 Comparación INGEI: Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) en Chile (1950-2024), datos apilados
Fuente: Elaboración propia

De manera complementaria, la Figura 4-30 muestra la comparación de la generación entre la estimación propia y la del INGEI según la perspectiva territorial de norte a sur, respectivamente. Se observa que las estimaciones presentan ciertas diferencias, pero coinciden en magnitud, siendo la zona centro la mayor emisora.

Mientras que en la Figura 4-31 se presenta la distribución temporal de la generación del INGEI por región (de manera apilada) según la perspectiva territorial de norte a sur, respectivamente. Ambas estimaciones muestran una evolución temporal y espacial coincidentes, cuyas diferencias se explican por los supuestos considerados en cada caso. Dado que los datos se presentan apilados, se observa que la Región Metropolitana corresponde a la principal región emisora.

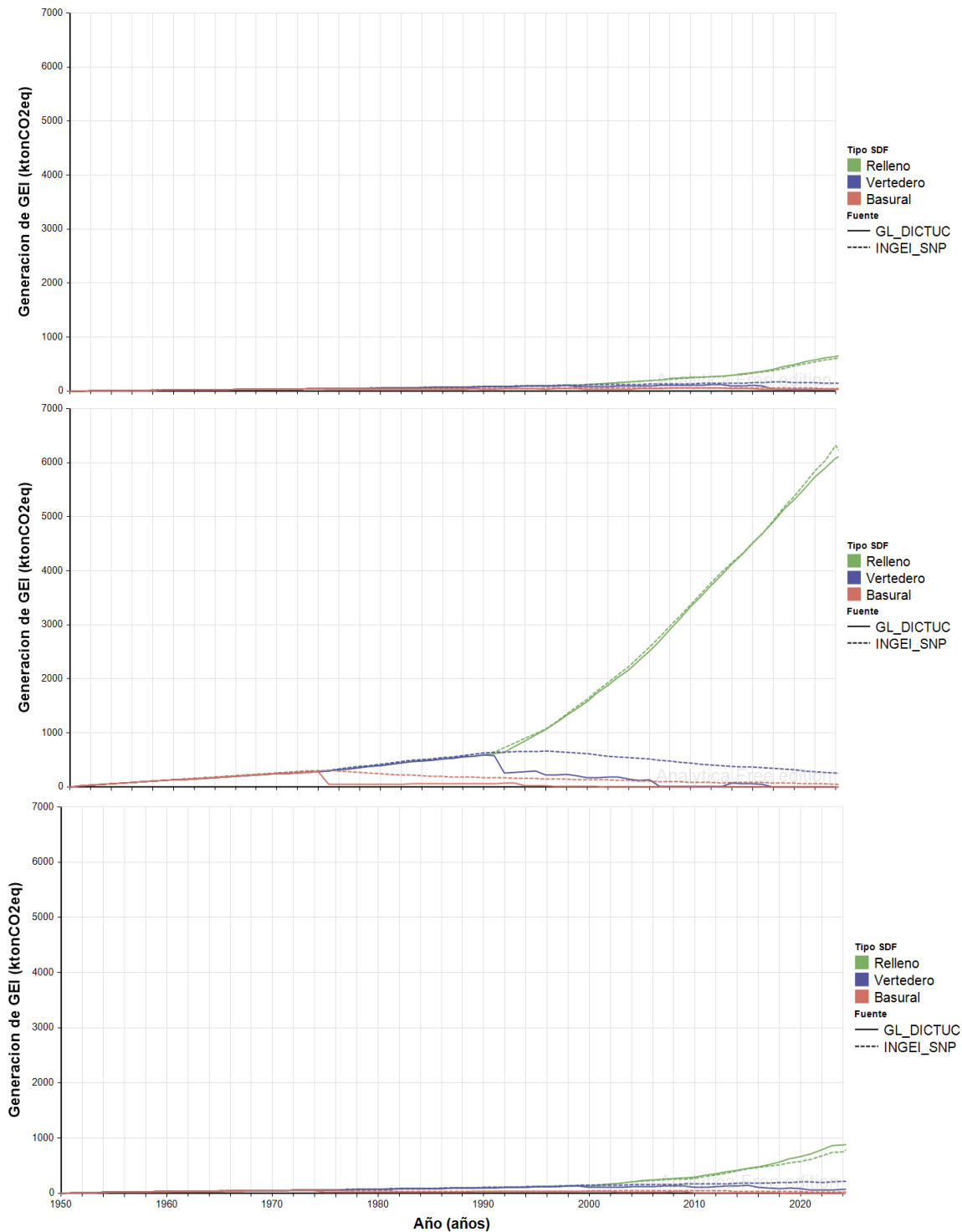


Figura 4-30 Comparación INGEI: Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) y perspectiva territorial (1950-2024), datos apilados
Fuente: Elaboración propia

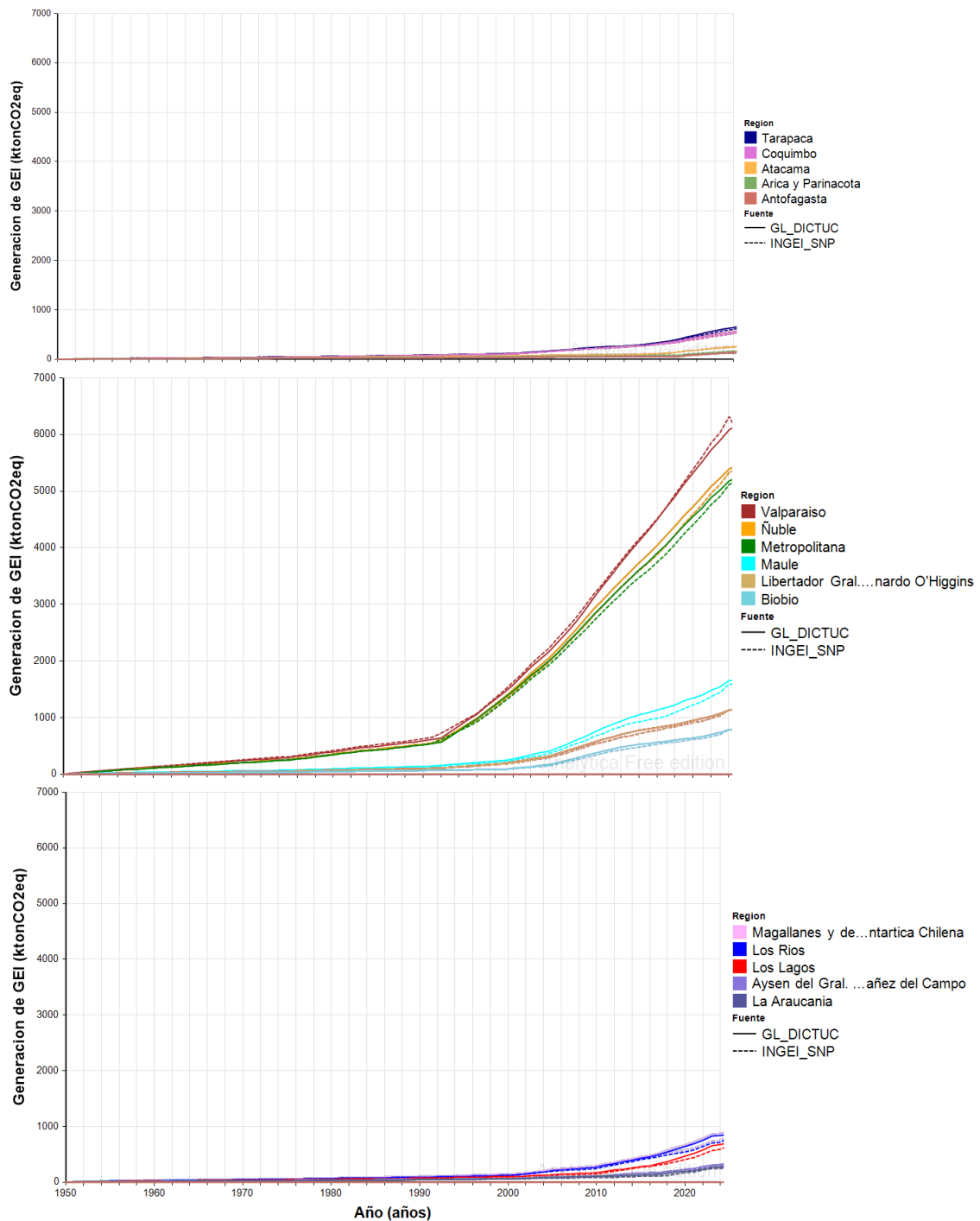


Figura 4-31 Comparación INGEI: Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según región de Chile y perspectiva territorial (1950-2024), datos apilados

Fuente: Elaboración propia

4.3.4.3 Comparación metodología, parámetros y estimación INGEI para residuos sólidos industriales (RSI)

La metodología utilizada para estimar las emisiones de los RSI coincide con la especificada en la Sección 4.3.4.2 para RSD, tanto para la metodología FAO y sus parámetros como la distribución de los sitios de disposición, tal como se presenta en la Tabla 4-7. Mientras que la serie temporal nacional de residuos industriales dispuestos entre 1950-2022 se construye inicialmente a partir de la información publicada por el propio INGEI 2022. Sin embargo, el inventario estimado incorpora una desagregación adicional al calcular la cantidad de residuos a nivel comunal por sitio de disposición, utilizando el análisis de la cantidad de empresas descrito en la Sección 4.2.2.

Tabla 4-7 Comparación metodología y parámetros entre INGEI y GreenLab-Dictuc para RSI

Parámetros	INGEI	GreenLab-Dictuc
Residuos sólidos industriales y Composición de residuos	Residuos por composición regional, desde múltiples fuentes y análisis, 1950-2022	Residuos por composición regional desde INGEI, luego se obtienen los municipales desde análisis cantidad de empresas
Distribución de los sitios de disposición	Distribución regional según MMA, SUBDERE y SINADER	Distribución por SDF, se ajusta para cumplir distribución INGEI
Metodología estimación de emisiones	Metodología FOD	Metodología FOD
Parámetros estimación de emisiones	Directrices IPCC 2006	Directrices IPCC 2006

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la comparación de ambos inventarios estimados, es importante señalar que, si bien el INGEI 2022 incorpora en su estimación final los efectos de captura de biogás y oxidación, en esta sección se comparan únicamente las emisiones brutas de CH₄ generadas por la descomposición de residuos, es decir, las emisiones previas a cualquier medida de recuperación o abatimiento.

En la Figura 4-32 se presenta la comparación histórica de la generación de GEI entre la estimación elaborada en el presente estudio (Estimación GL) y las estimaciones del INGEI. Se observa que ambas series muestran tendencias crecientes y muy similares tanto en su evolución temporal como magnitud en todo el periodo de estudio, salvo desde 1995 en que ambas estimaciones se diferencian levemente.

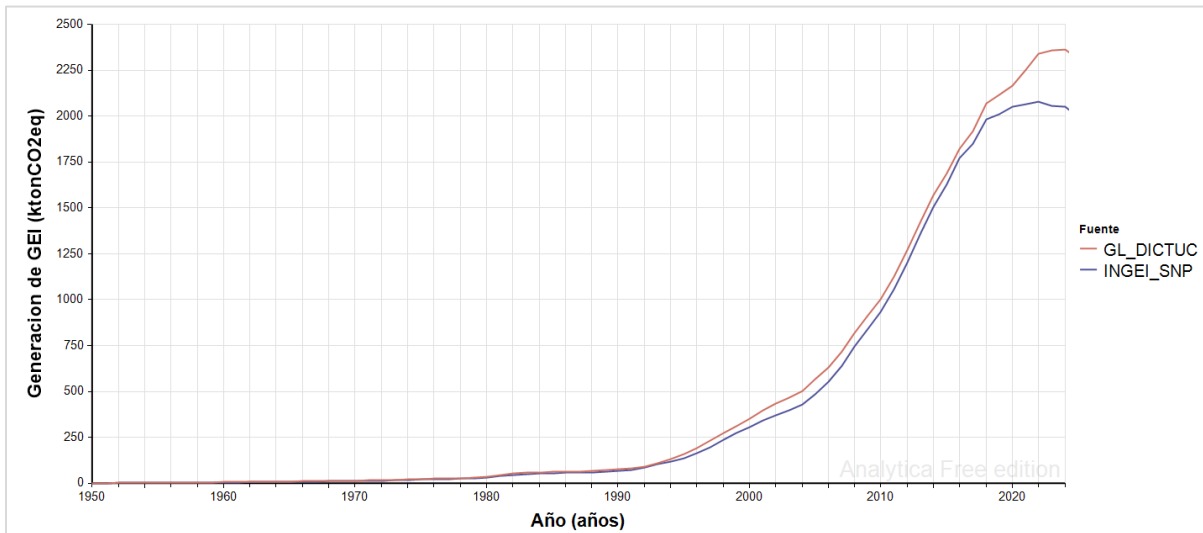


Figura 4-32 Comparación INGEI: Generación de metano total desde sitios de disposición final (SDF) por residuos sólidos industriales en Chile (1950-2024)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-33 se muestra la comparación de la generación por tipo de sitio de disposición entre la estimación propia y la del INGEI. Se observa que los rellenos anaeróbicos concentran la mayor parte de la generación en ambas estimaciones, siendo levemente superiores en la serie estimada desde 1992.

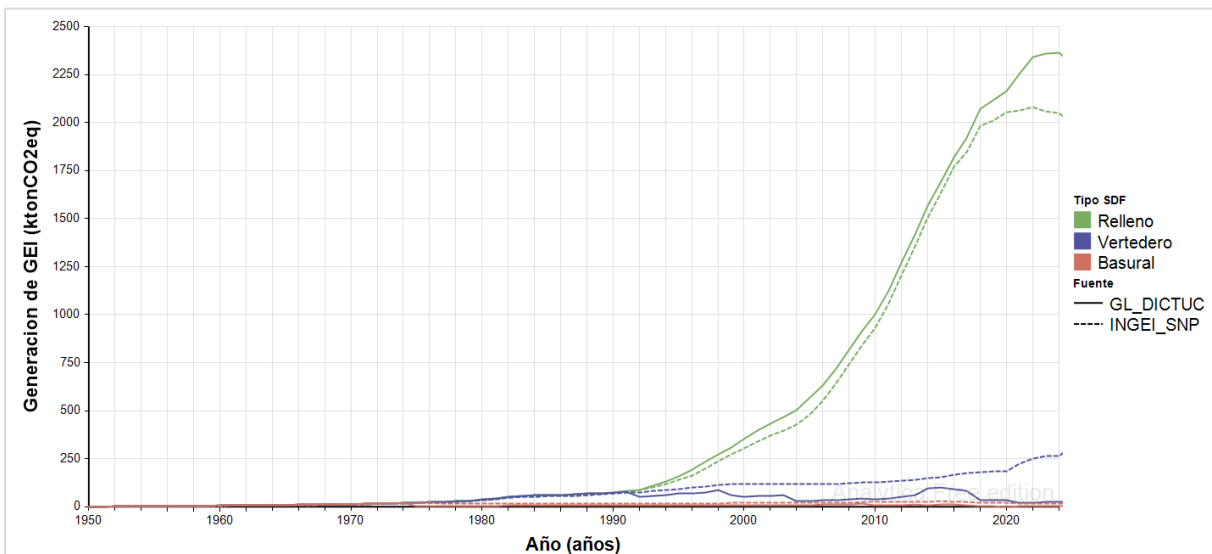


Figura 4-33 Comparación INGEI: Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) en Chile (1950-2024), datos apilados

Fuente: Elaboración propia

De manera complementaria, la Figura 4-34 muestra la comparación de generación entre la estimación propia y la del INGEI según la perspectiva territorial para RSI. Se observa que la zona centro y norte son similares en magnitud al INGEI, la zona sur presenta las principales diferencias.

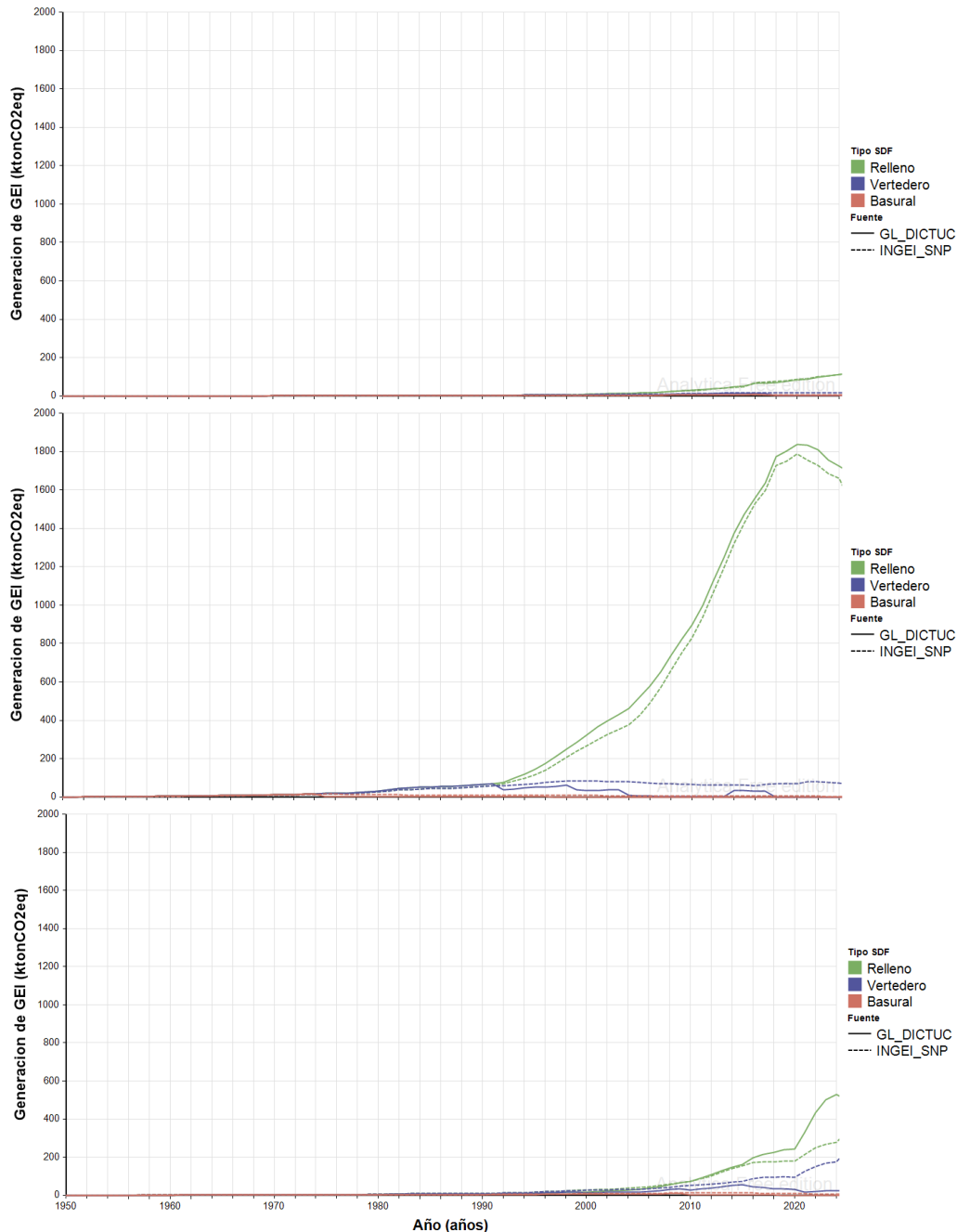


Figura 4-34 Comparación INGEI: Generación de metano por residuos sólidos industriales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) y perspectiva territorial (norte-sur) (1950-2024), datos apilados

Fuente: Elaboración propia

Mientras que en la Figura 4-35 se presenta la distribución temporal de las emisiones del INGEI por región (de manera apilada) según la perspectiva territorial de norte a sur, respectivamente. Ambas estimaciones muestran una evolución temporal y espacial coincidentes para las regiones.

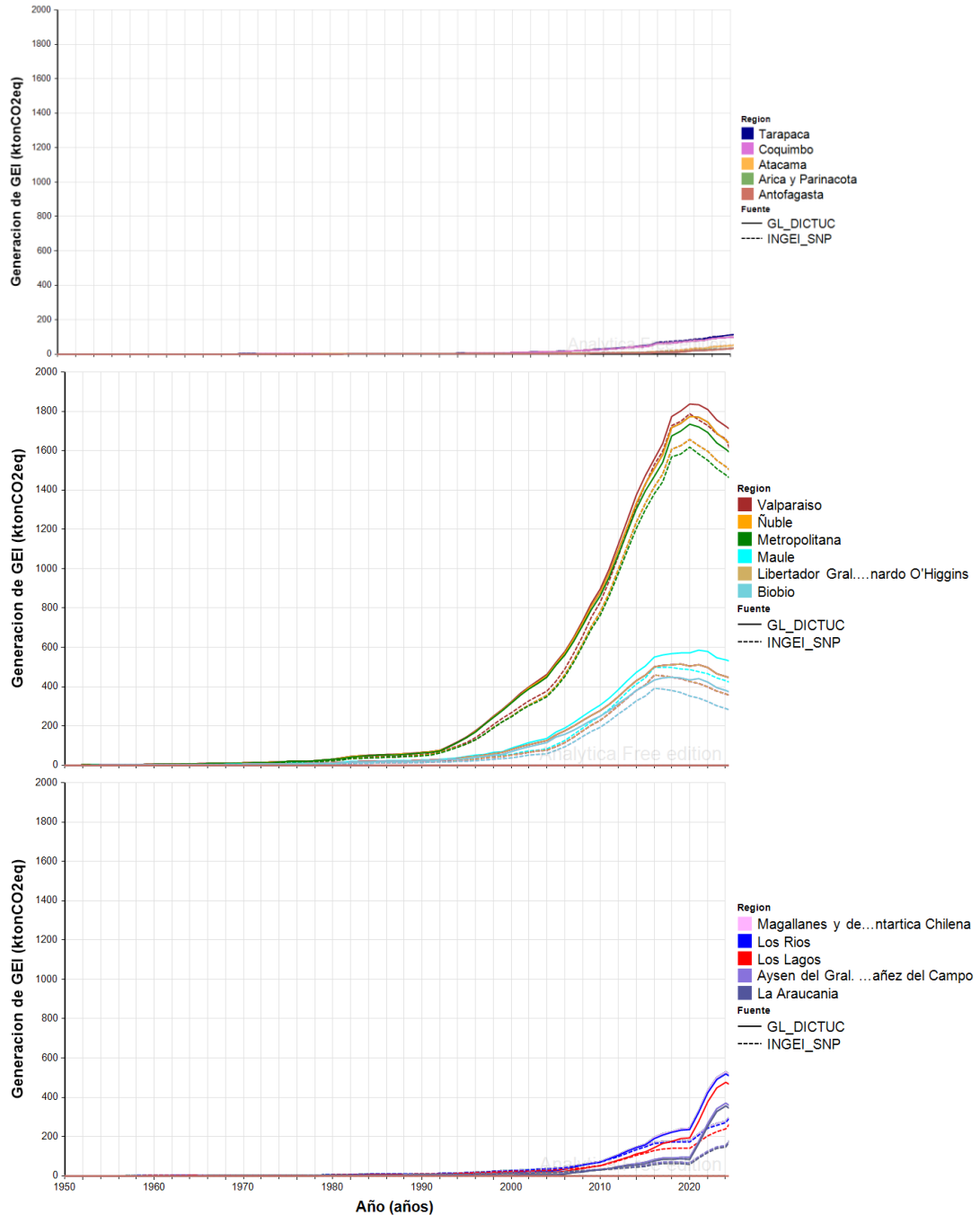


Figura 4-35 Comparación INGEI: Generación de metano por residuos sólidos industriales, según región de Chile y perspectiva territorial (norte-sur) (1950-2024), datos apilados

Fuente: Elaboración propia

4.4 Proyección de emisiones anuales de metano para cada relleno sanitario (2025-2050)

4.4.1 Supuestos y procedimiento de proyección

A continuación, se proyectan las emisiones anuales de CH₄ asociadas a los rellenos sanitarios del país para un horizonte de 25 años, a partir de 2025, para RSD y RSI. Las proyecciones se alinean con los supuestos del Sistema Nacional de Prospectiva del Ministerio del Medio Ambiente (SNP) tal como se presenta en la Figura 4-36, tomando particularmente:

- Que la producción per cápita de residuos (PPC) aumentará anualmente de forma proporcional a las proyecciones anuales del PIB nacional.
- Que la proyección anual del PIB nacional hasta 2050 depende los datos disponibles del Ministerio de Hacienda⁵ e interpolación lineal hasta dicho año, considerando un crecimiento anual proyectado para éste del 0,5% y un crecimiento anual proyectado para 2028 del 2,1%.

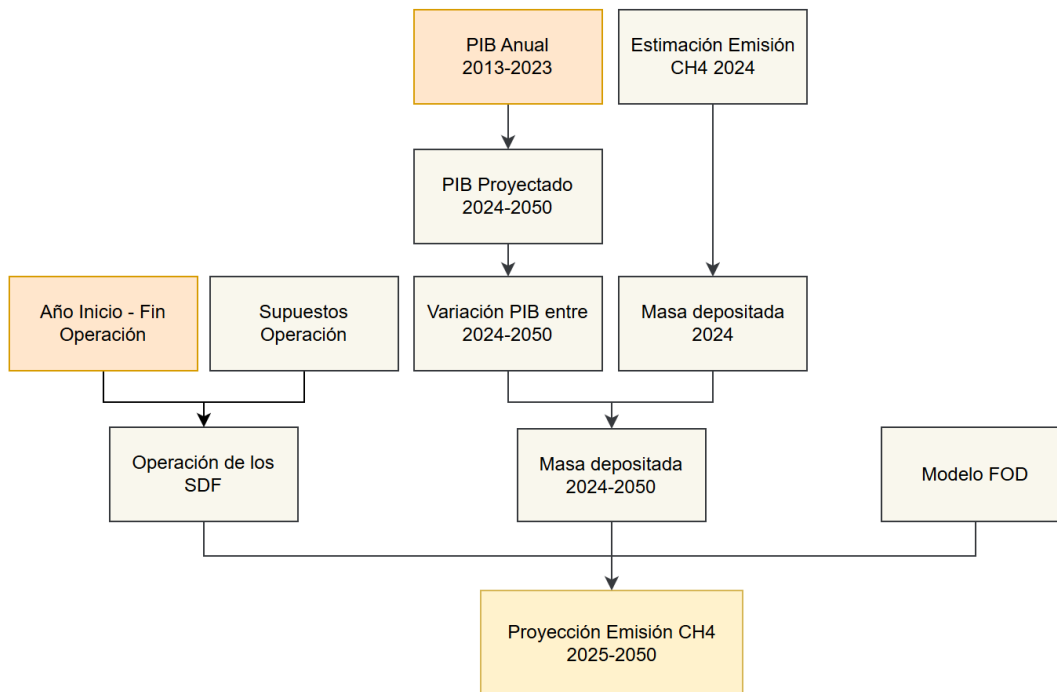


Figura 4-36 Procedimiento para proyectar las emisiones de CH₄

Fuente: Elaboración propia

⁵ Escenario macroeconómico. Disponible en: <https://www.hacienda.cl/areas-de-trabajo/politicas-macroeconomicas/escenario-macroeconomico>

4.4.2 Resultados proyección de emisiones de CH₄

4.4.2.1 Resultados proyección de emisiones para residuos sólidos domiciliarios (RSD)

Los resultados al proyectar las emisiones de CH₄ se encuentran disponibles en el anexo digital "NEMetano_Modelo_Residuos.ana". Cabe destacar que el escenario presentado corresponde al más desfavorable posible, dado que se asume una mantención de la situación actual de los sitios de disposición final en que se ignora el eventual cierre de basurales y vertederos o su adecuación a la normativa sobre disposición actual o futura. Además, las proyecciones no incluyen la reducción de la generación de residuos asociados a la Ley REP y la ENRO.

En un escenario línea base, en que la generación y disposición de residuos sólidos domiciliarios no experimenta cambios (correspondiente al *business as usual*, o BAU), el crecimiento en las emisiones proyectadas es descrito por la Figura 4-37, donde se aprecia un crecimiento casi lineal de las emisiones, conforme a las expectativas de crecimiento de la economía nacional.

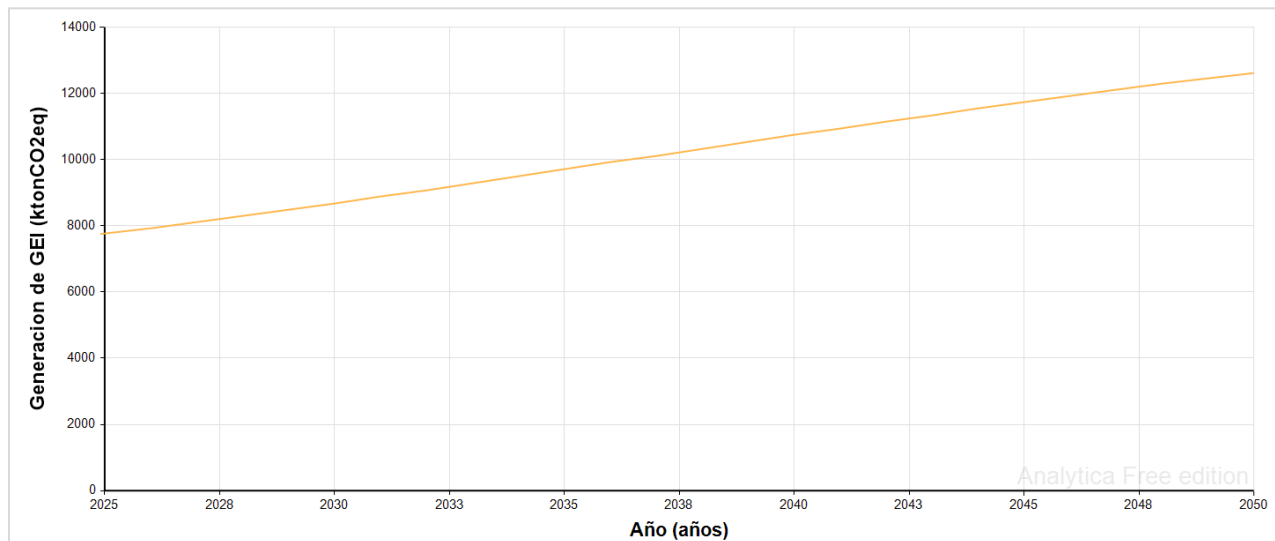


Figura 4-37 Proyección de la generación de metano total por residuos sólidos domiciliarios en Chile (2024-2050)

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la planificación de los SDF que fue sistematizada en la Sección 4.1, se espera, como se visualiza en la Figura 4-38, que la generación de metano provenientes de estas localizaciones se deba principalmente a rellenos sanitarios.

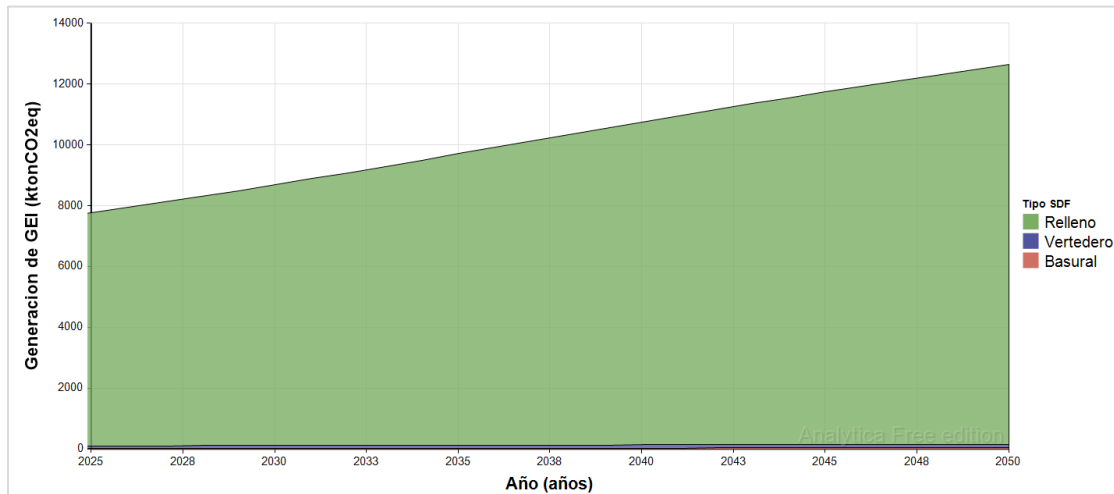


Figura 4-38 Proyección de la generación de metano por residuos sólidos domiciliarios, según tipo de Sitio de Disposición Final, en Chile (2025-2050)

Fuente: Elaboración propia

Además, en la Figura 4-39 se expone cómo la generación aumentará debido principalmente a Residuos Orgánicos y Papel/Cartón, mientras que la contribución de Otros Residuos Sólidos Municipales (RSM) a la generación de metano en los SDF no es significativamente creciente, esta relación se repite a distintas escalas en las zonas territoriales de Chile debido a los supuestos.

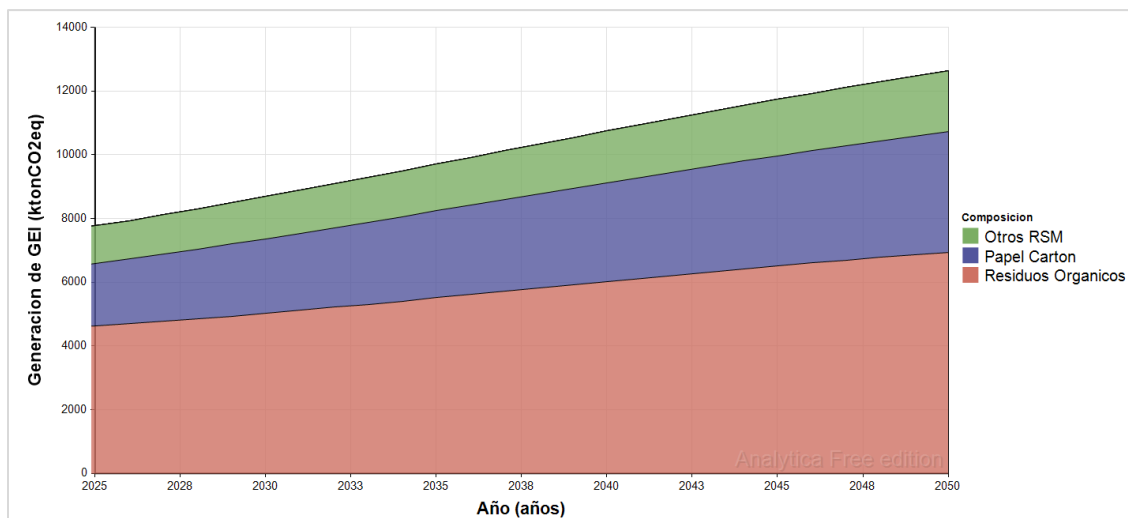


Figura 4-39 Proyección de generación de metano por residuos sólidos domiciliarios, según composición de residuo en Chile, dalos apilados (2025-2050)

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, respecto a la desagregación de la generación de metano por región de Chile presentada en la Figura 4-40 de manera apilada, es posible identificar, respectivamente, a las Regiones Metropolitana de Santiago, Bío Bío, Maule, Valparaíso y O'Higgins como las más

relevantes en cuanto a emisión de metano desde SDF. Sin perjuicio de lo anterior, es evidente que son los SDF en la Región Metropolitana de Santiago los que serán más relevantes al momento de elaborar y proponer los escenarios de norma de emisión.

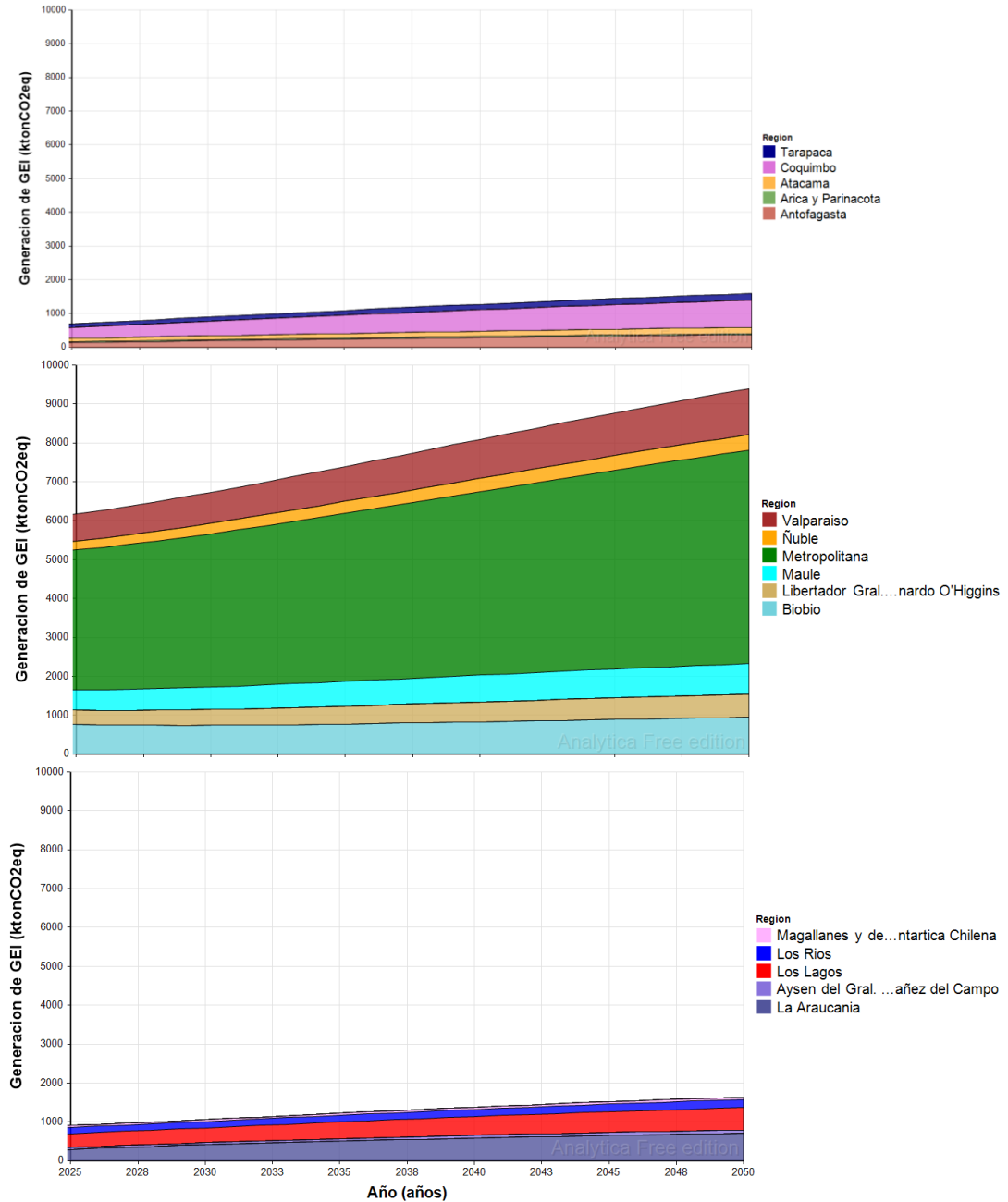


Figura 4-40 Proyección de generación de metano por residuos sólidos domiciliarios, según región y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO₂eq. (2025-2050)

Fuente: Elaboración propia

4.4.2.2 Resultados proyección de emisiones para residuos sólidos industriales (RSI)

Los resultados al proyectar la generación de CH₄ se encuentran disponibles en el anexo digital "NEMetano_Modelo_Residuos.ana". Al igual que para los residuos domiciliarios, cabe destacar que el escenario presentado corresponde al más desfavorable posible al asumir una mantención de la situación actual de los sitios de disposición final ignorando eventuales modificación en la normativa sobre disposición actual o futura. Además, las proyecciones no incluyen la reducción de la generación de residuos asociados a la Ley REP y la ENRO.

En un escenario línea base, en que la generación y disposición de residuos sólidos industriales no experimenta cambios (correspondiente al *business as usual*, o BAU), la tendencia se describe por la Figura 4-41, donde se aprecia un leve decrecimiento de la generación, conforme a las expectativas de crecimiento de la economía nacional.

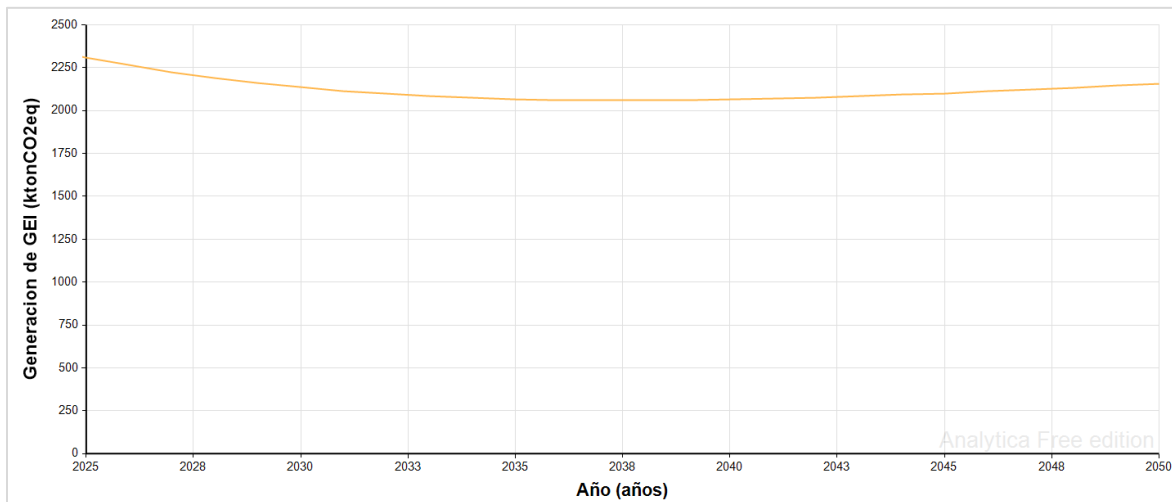


Figura 4-41 Proyección de generación de metano total por residuos sólidos industriales en Chile (2024-2050)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-42 se presenta la generación según tipo de sitio, se observa que las emisiones de metano provienen principalmente de rellenos sanitarios, siendo consistente con los supuestos temporales en que el orden de distribución de SDF corresponde a basural, vertedero y relleno, siendo los rellenos los principales existentes en la proyección generada.

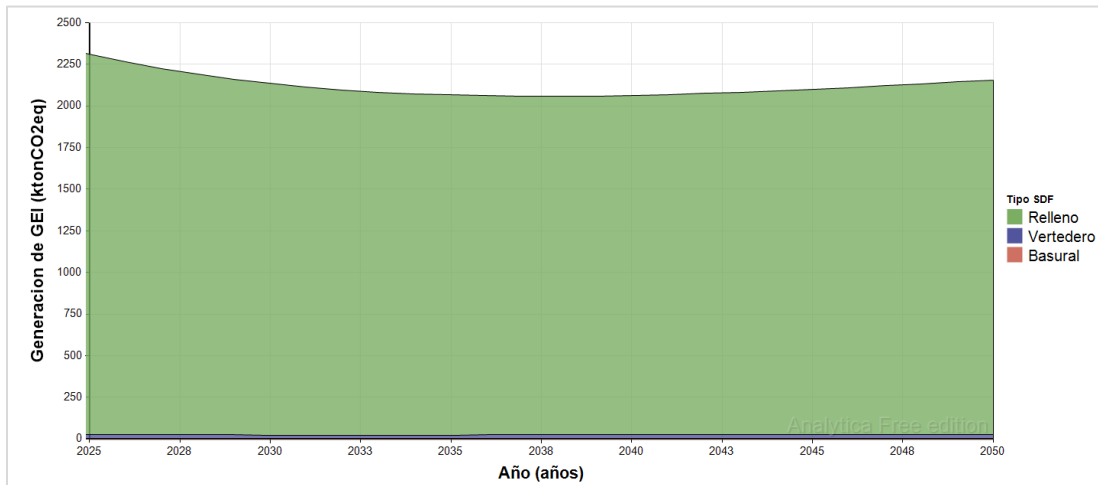


Figura 4-42 Proyección de generación de metano por residuos sólidos industriales, según tipo de Sitio de Disposición Final en Chile, datos apilados, en ktCO₂eq. (2025-2050)

Fuente: Elaboración propia

Además, en la Figura 4-43 se muestra la desagregación de la generación por tipo de residuo sólido industrial, de manera apiladas, en que se observa que las mayores emisiones son del tipo otros, seguidos por los alimentos y la pulpa-papel. Cabe destacar que los residuos “otros” agrupan RSI como metales, plásticos, vidrio, tierras, piedras, residuos eléctricos, químicos, entre otros, según la clasificación LER (Lista Europea de Residuos) utilizada para homologar a residuos simplificados.

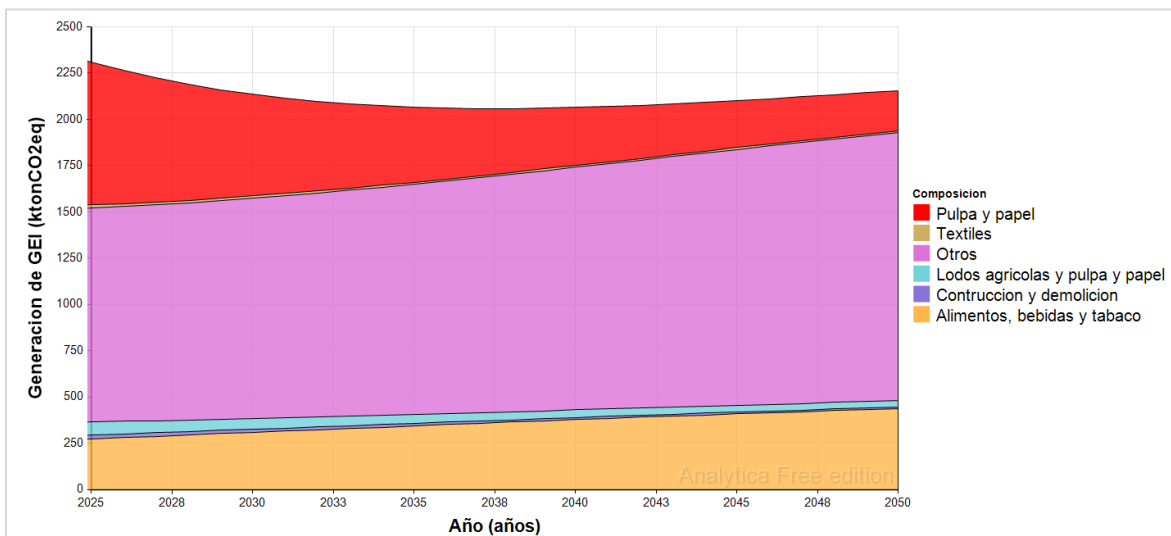


Figura 4-43 Proyección de emisiones de metano por residuos sólidos industriales, según composición de residuo, en Chile, datos apilados, en ktCO₂eq. (2025-2050)

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, respecto a la desagregación de la generación de CH₄ por región de Chile presentada en la Figura 4-44, es posible identificar, respectivamente, a las Regiones Metropolitana, Bio bío y Maule como las más relevantes en cuanto a emisión de metano.

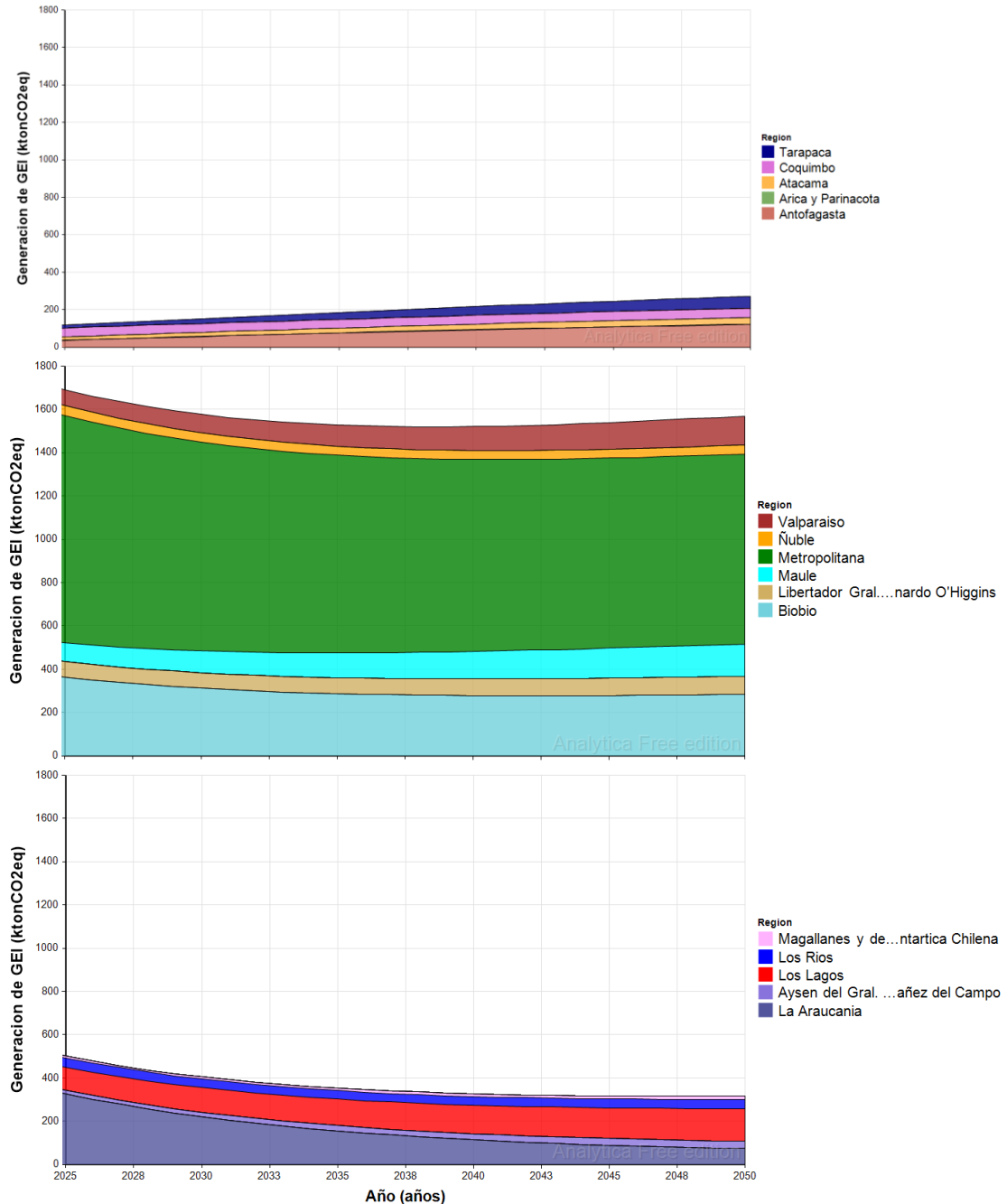


Figura 4-44 Proyección de generación de metano por residuos sólidos industriales, según región y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO₂eq. (2025-2050)

Fuente: Elaboración propia

4.4.3 Comparación proyección de emisiones de CH₄ con SNP

A continuación, se presenta la comparación entre la proyección de emisiones del Sistema Nacional de Prospectiva (en adelante SNP). Para lo cual se comienza con una revisión de la metodología, parámetros y proyección del SNP (Sección 4.4.3.1) y luego se comparan ambas estimaciones, RSD y RSI (Sección 4.4.3.2 y Sección 4.4.3.3).

4.4.3.1 Metodología, parámetros y proyección del SNP

El Sistema Nacional de Prospectiva (SNP) corresponde a una estructura técnico-institucional destinada a generar información pública para apoyar la toma de decisiones en materia de mitigación de GEI. Su funcionamiento se encuentra establecido en la Ley Marco de Cambio Climático y en la Estrategia Climática de Largo Plazo ECLP. Entre sus objetivos destacan⁶:

- Contener y/o elaborar las proyecciones actualizadas de emisiones de GEI a nivel nacional y sectorial.
- Coordinar, estandarizar y garantizar la calidad, transparencia y participación de los actores relevantes en los procesos de actualización de proyecciones nacionales de GEI.
- Apoyar metodológicamente la evaluación de medidas y análisis de proyecciones de los sectores que cuentan con compromisos asociados a mitigación del cambio climático.
- Promover el desarrollo de capacidades técnicas de análisis de mitigación y prospectiva dentro de las instituciones vinculadas al SNP.

Para efectos del presente informe, la información del SNP corresponde a una referencia oficial para comparar las emisiones proyectadas del sector residuos en el periodo 2025-2050. Para la extracción de datos del SNP, se utiliza el modelo sectorial de residuos correspondiente a la versión desarrollada en el *software* Analytica por el SNP y enviada por la Contraparte Técnica el día 3 de noviembre de 2025. Dicho modelo contiene los supuestos, parámetros, tasas de crecimientos y proyecciones oficiales para la categoría de disposición de residuos sólidos.

Respecto a los tipos de SDF, el SNP para 1950-2022 utiliza la información del INGEI, la cual luego proyecta mediante un modelo propio de análisis. Mientras que, para los residuos, el SNP utiliza la información histórica de residuos sólidos domiciliarios e industriales construidas por el INGEI entre 1950-2022 y obtiene la generación per cápita entre 2023-2060 al proyectar según el PIB per cápita utilizando la fórmula del banco mundial (What a Waste 2.0).

Para la composición de los residuos, el SNP al igual que el INGEI utiliza los valores del estudio SUBDERE (2018) para los años 1950-2022, luego para la proyección entre 2022-2050 se realiza un ajuste lineal en que en Excel se calculan los polinomios de potencia 2 que interceptan por los puntos 2040 y 2050. Mientras que para 2050-2060 se indica que, a partir de los datos de What a Waste 2.0 se utiliza el promedio ponderado por población de las distribuciones de países que

⁶ <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/sistema-nacional-de-prospectiva-snpchile/introduccion-al-sistema/>

tendrán $\pm 10\%$ mismo PIB per cápita de Chile y $\pm 10\%$ mismo nivel de ruralidad, según una proyección al 2040 y 2050.

Respecto a la metodología para la proyección de emisiones, el SNP utiliza tanto el modelo como los parámetros del modelo de Decaimiento de Primer Orden (First Order Decay, FOD). Los parámetros se obtienen desde las Directrices del IPCC 2006, estos parámetros coinciden con los presentados anteriormente en la Tabla 4-4.

Respecto a la proyección, el modelo del SNP considera varios escenarios de reducción, entre ellos el inventario base utilizado para comparar. Además, las proyecciones se realizan a nivel regional y consideran tanto la recuperación del metano como la aplicación de un factor de oxidación. La recuperación de metano incluye descontar la fracción capturada en los rellenos sanitarios con sistemas de captación, quema o valorización, para ello, se proyectan los datos históricos de captura asumiendo un incremento en la captura. Mientras que para el factor de oxidación se considera un 10%, al igual que lo indicado en el INGEI. Cabe destacar que en la comparación posterior se comparan los escenarios base sin considerar la captura/quema ni medidas de abatimiento.

4.4.3.2 Comparación metodología, parámetros y proyección del SNP para residuos sólidos domiciliarios (RSD)

En la Tabla 4-8 se presenta la comparación metodológica entre el SNP y la presente consultoría. Ambas proyecciones emplean el modelo de Decaimiento de Primer Orden (FOD) según las Directrices del IPCC 2006 y su refinamiento en 2019, además, utilizan los mismos parámetros base para la proyección.

Los residuos bases del INGEI se proyectan por PIB per cápita en ambos casos, sin embargo, el SNP lo obtiene desde la fórmula del banco mundial y el Equipo Consultor desde la proyección del PIB 2013-2023, lo cual explicaría diferencias entre ambos inventarios al cambiar la cantidad de residuos. De la misma manera, la composición presenta diferencias dado que el SNP realiza un ajuste lineal desde los datos del INGEI 2022 y el Equipo Consultor considera la masa depositada por tipo de composición base para 2024 desde la estimación de emisiones, y luego su proyección con el PIB per cápita. Esta variable puede generar diferencias entre ambas proyecciones.

Por último, la distribución temporal de los sitios de disposición final varía, dado que el SNP asigna una distribución regional por año desde un modelo propio y el Equipo Consultor ajusta la distribución según la información del INGEI-SNP. Cabe destacar que pese al ajuste de la distribución aún existe cierta variación entre ambas para algún año y/o región debido al nivel de desagregación de la información, SNP con distribución regional y GreenLab-Dictuc por SDF. Por ejemplo, algunos años una región, según la distribución del SNP, no presenta vertederos, pero desde la identificación de sitios el Equipo Consultor sí identifica la presencia de al menos un vertedero operativo en la región, por tanto, se ajustan las distribuciones para coincidir con el SNP presentando leves diferencias en casos como el ejemplificado.

Tabla 4-8 Comparación metodología y parámetros entre SNP y GreenLab-Dictuc

Parámetros	SNP	GreenLab-Dictuc
Residuos sólidos domiciliarios	Residuos regionales desde INGEI para 1950-2022, luego se obtiene hasta 2060 con proyección PIB per cápita usando la fórmula del banco mundial (What a Waste 2.0)	Residuos comunales por composición desde estimación 2024, luego se obtienen hasta 2050 con proyección PIB per cápita regional
Composición de residuos	Composición SUBDERE (2018) para 1950-2022, luego para 2022-2050 se realiza un ajuste lineal	Residuos municipales por composición desde estimación 2024, luego se obtienen hasta 2050 con proyección PIB per cápita
Distribución de los sitios de disposición	Distribución regional desde proyección modelo propio	Distribución por SDF, se ajusta para cumplir la distribución del SNP
Metodología proyección	Metodología FOD	Metodología FOD
Parámetros proyección	Directrices IPCC 2006	Directrices IPCC 2006

Fuente: Elaboración propia

Respecto a la comparación de ambas proyecciones estimadas, es importante señalar que, si bien el SNP incorpora los efectos de captura y oxidación, en esta sección se comparan únicamente la proyección de emisiones de CH₄ generadas por la descomposición de residuos, es decir, tanto para el escenario base como para el escenario de captura/quema de metano se tiene la misma generación inicial y posteriormente se aplican las medidas de recuperación o abatimiento.

En la Figura 4-45 se presenta la comparación histórica de las proyecciones de GEI entre la proyectada en el presente estudio (Estimación GL) y la proyección del SNP. Se observa que ambas series son muy similares en evolución y magnitud siguiendo una tendencia creciente constante.

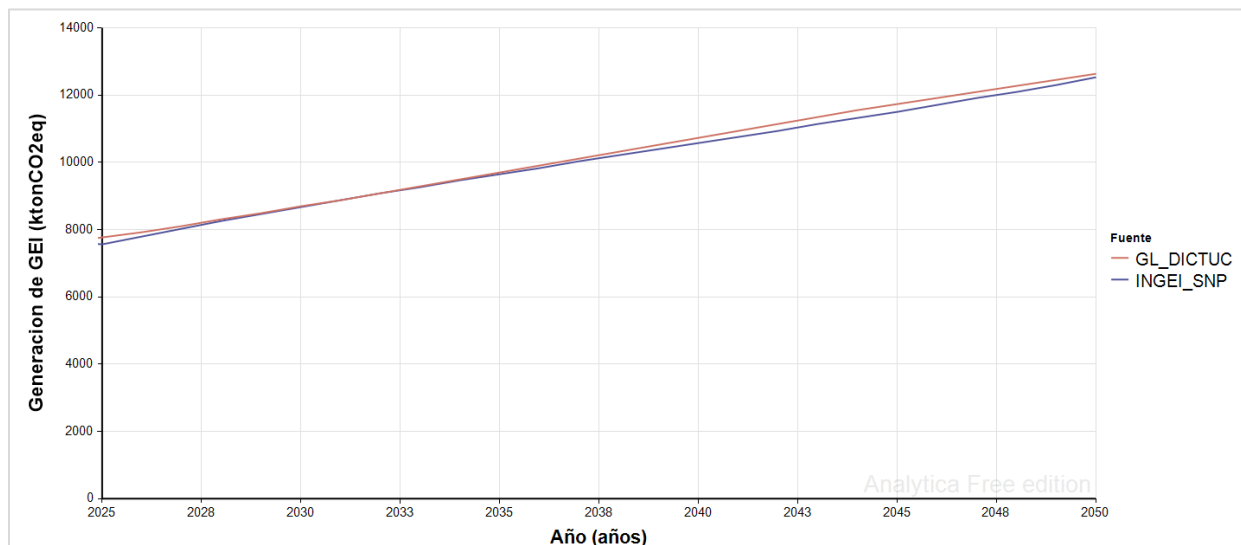


Figura 4-45 Comparación SNP: Generación de metano total desde sitios de disposición final (SDF) por residuos sólidos municipales en Chile (2025-2050)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-46 se muestra la comparación en la proyección de la generación por tipo de sitio de disposición entre la estimación propia y la del SNP, de manera apilada. Se observa que los rellenos anaeróbicos concentran la mayor parte de las emisiones en ambas estimaciones, siendo muy similares entre sí. Los vertederos presentan contribuciones relevantes constantes en la estimación para el SNP, mientras que en la proyección propia los valores son menores. Respecto a los basurales, en ambas proyecciones la emisión es insignificante.

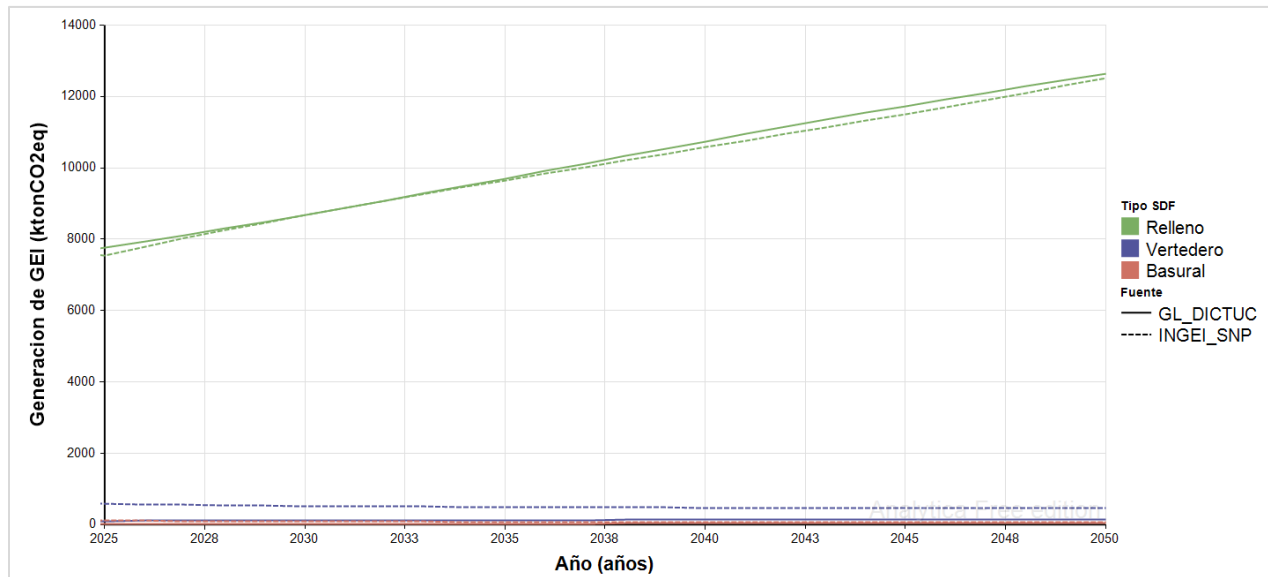


Figura 4-46 Comparación SNP: Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) en Chile (2025-2050), datos apilados

Fuente: Elaboración propia

De manera complementaria, la Figura 4-47 muestra la comparación de generación entre la estimación propia y la del INGEI según la perspectiva territorial de Chile (norte-sur). Se observa que la zona norte y la sur poseen las mayores diferencias entre ambas estimaciones, siendo la zona norte la que posee mayor diferencia entre ambas para rellenos sanitarios.

Mientras que la Figura 4-48 se presenta la distribución temporal de la generación del SNP por región según la perspectiva territorial chilena (norte-sur), de manera apilada. Se observa que las regiones presentan valores similares entre ambas estimaciones, además, se destaca la generación de la región Metropolitana. Las diferencias entre ambas estimaciones se deben principalmente a la desagregación de la distribución de SDF, desde regional del SNP y por SDF en la estimación propia.

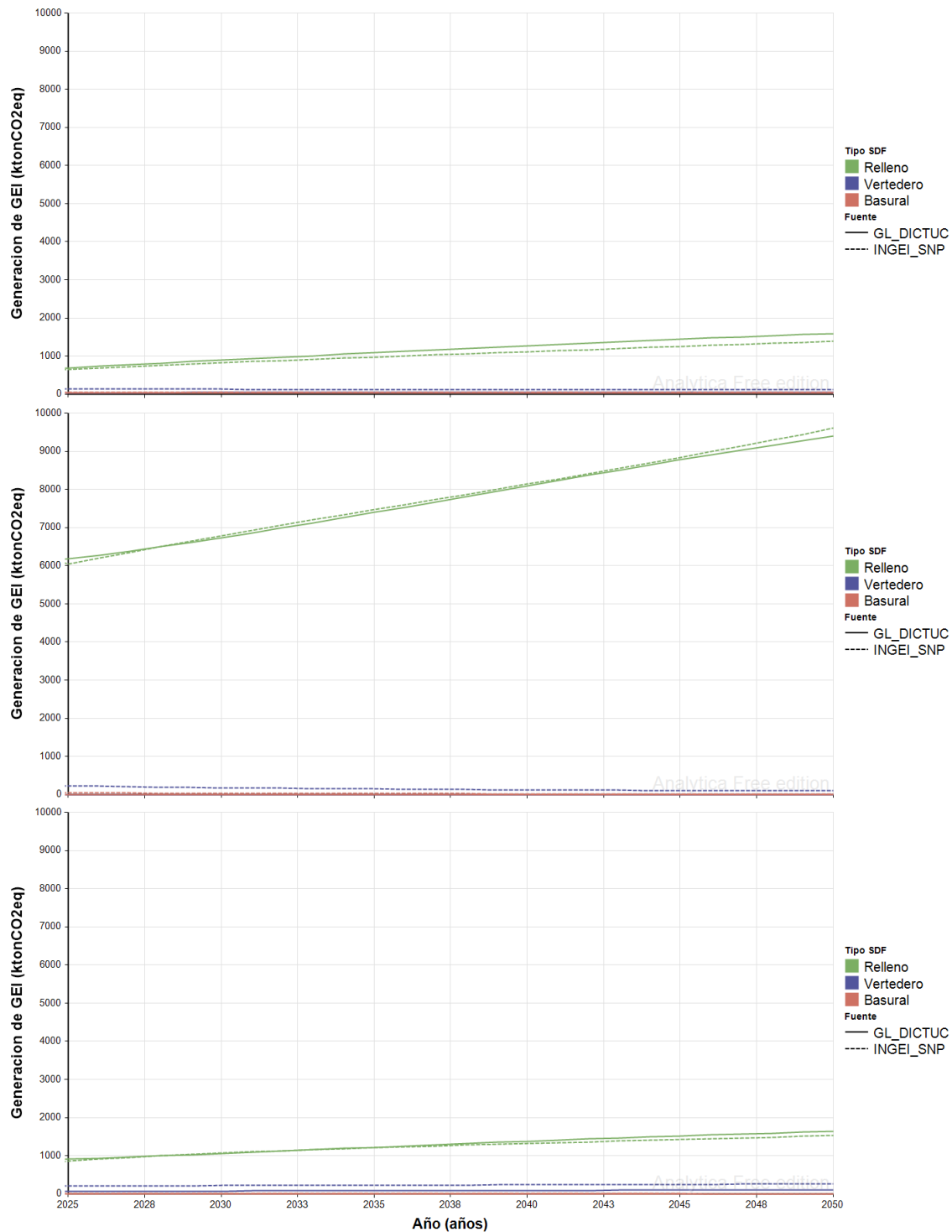


Figura 4-47 Comparación SNP: Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO₂eq. (2025-2050)

Fuente: Elaboración propia

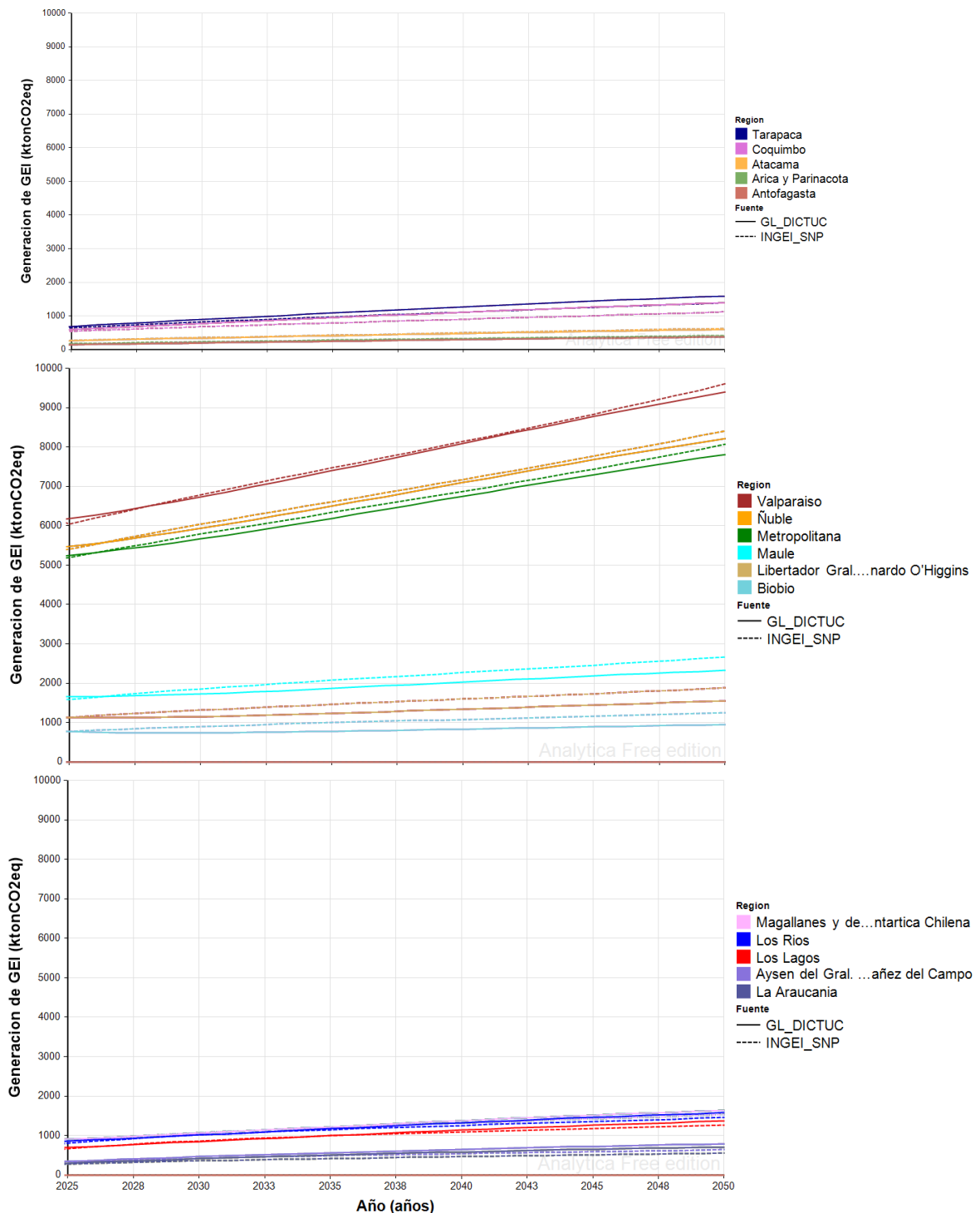


Figura 4-48 Comparación SNP: Generación de metano total por residuos sólidos municipales, según región de Chile y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO₂eq. (2025-2050)

Fuente: Elaboración propia

4.4.3.3 Comparación metodología, parámetros y proyección del SNP para residuos sólidos industriales (RSI)

Anteriormente, en la Tabla 4-8 se presenta la comparación metodológica entre el SNP y la presente consultoría tanto para RSD como para RSI. La metodología utilizada para estimar las emisiones coincide con la especificada en la Sección 4.3.4.2 para RSD, en el uso de la metodología FAO, el modelo de Decaimiento de Primer Orden (FOD) y sus parámetros.

Los residuos por composición se obtienen desde la proyección del PIB per cápita en ambos casos, sin embargo, el SNP lo obtiene desde la fórmula del banco mundial y el Equipo Consultor desde la proyección del PIB 2013-2023, lo cual presenta diferencias en la cantidad de residuos. Por último, la distribución temporal de los sitios de disposición final varía, dado que el SNP asigna una distribución regional por año desde un modelo propio y el Equipo Consultor ajusta la distribución según la información del INGEI-SNP. Cabe destacar que pese al ajuste de la distribución aún existe cierta variación entre ambas para algún año y/o región debido al nivel de desagregación de la información, SNP con distribución regional y GreenLab-Dictuc por SDF, tal como se explica en la Sección 4.4.3.2.

Además, es importante señalar que, si bien el SNP incorpora los efectos de captura y oxidación en la estimación, en esta sección se comparan únicamente la proyección de emisiones de CH₄ generadas por la descomposición de residuos, es decir, el escenario base.

En la Figura 4-49 se presenta la comparación histórica de las proyecciones de GEI entre la proyectada por el Equipo Consultor (Estimación GL) y la proyección del SNP para RSI. Se observa una similitud en magnitud, más no en forma ni tendencia, dado que en la estimación GreenLab-Dictuc existe una tendencia decreciente en la generación en comparación al SNP constante.

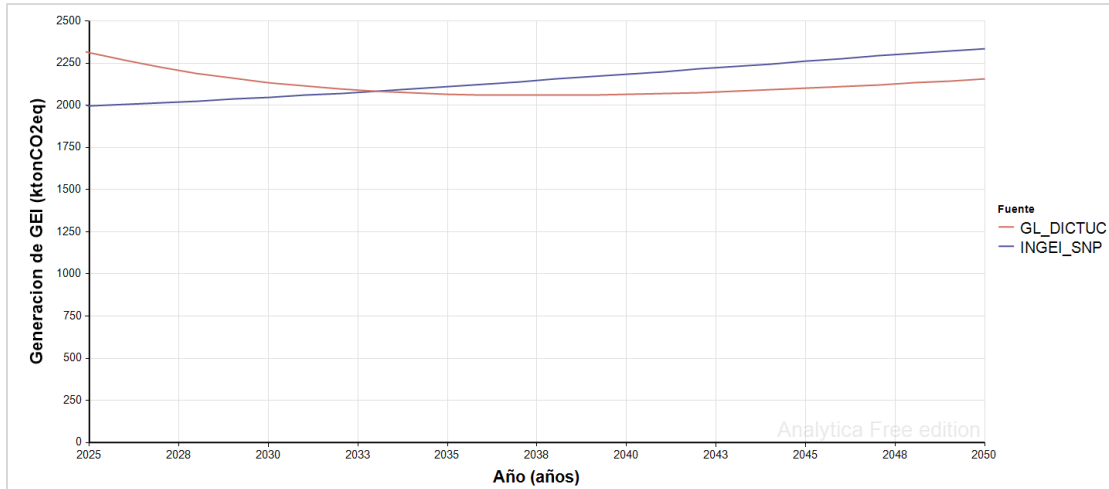


Figura 4-49 Comparación SNP: Generación de metano total desde sitios de disposición final (SDF) por residuos sólidos industriales en Chile (2025-2050)

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-50 se muestra la comparación en la proyección de la generación por tipo de sitio de disposición entre la estimación propia y la del SNP. Se observa que los rellenos sanitarios concentran la mayor parte de la generación en ambas estimaciones. Los vertederos presentan la mayor diferencia entre ambas estimaciones con valores más altos para el SNP, principalmente por el supuesto temporal ordenado entre basural, vertedero y relleno.

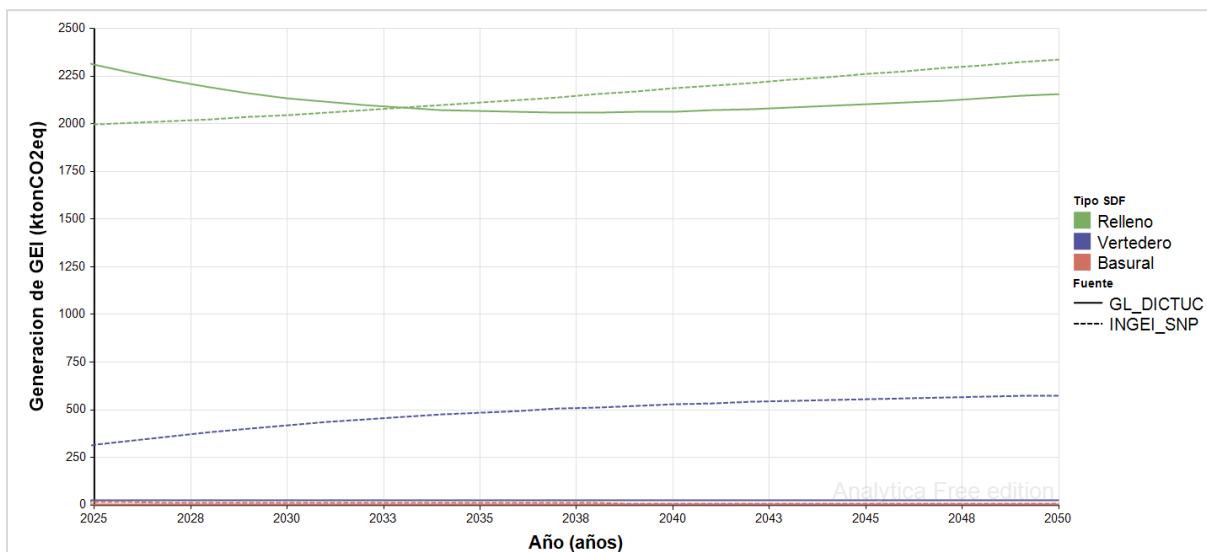


Figura 4-50 Comparación SNP: Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) en Chile (2025-2050), datos apilados

Fuente: Elaboración propia

De manera complementaria, la Figura 4-51 muestra la comparación de generación entre la estimación propia y la del SNP según la perspectiva territorial (norte-sur). Se observa que la estimación propia es mayor para la zona norte y centro. Mientras que la zona sur presenta las mayores diferencias, para GreenLab-Dictuc se observa una mayor generación en los rellenos que en los vertederos como en SNP, además existe una tendencia decreciente en la estimación de GreenLab-Dictuc para rellenos en comparación a los vertederos que crecen. Las diferencias entre ambas estimaciones se deben principalmente a la desagregación de la distribución de SDF, desde regional del SNP y por SDF en la estimación propia.

Mientras que la Figura 4-52 se presenta la distribución temporal de la generación del SNP por región según la perspectiva territorial de Chile (norte-sur), de manera apilada. Se destaca la generación de la región Metropolitana dado su alto valor, mientras que las otras regiones respetan una relación coherente entre ambas estimaciones.

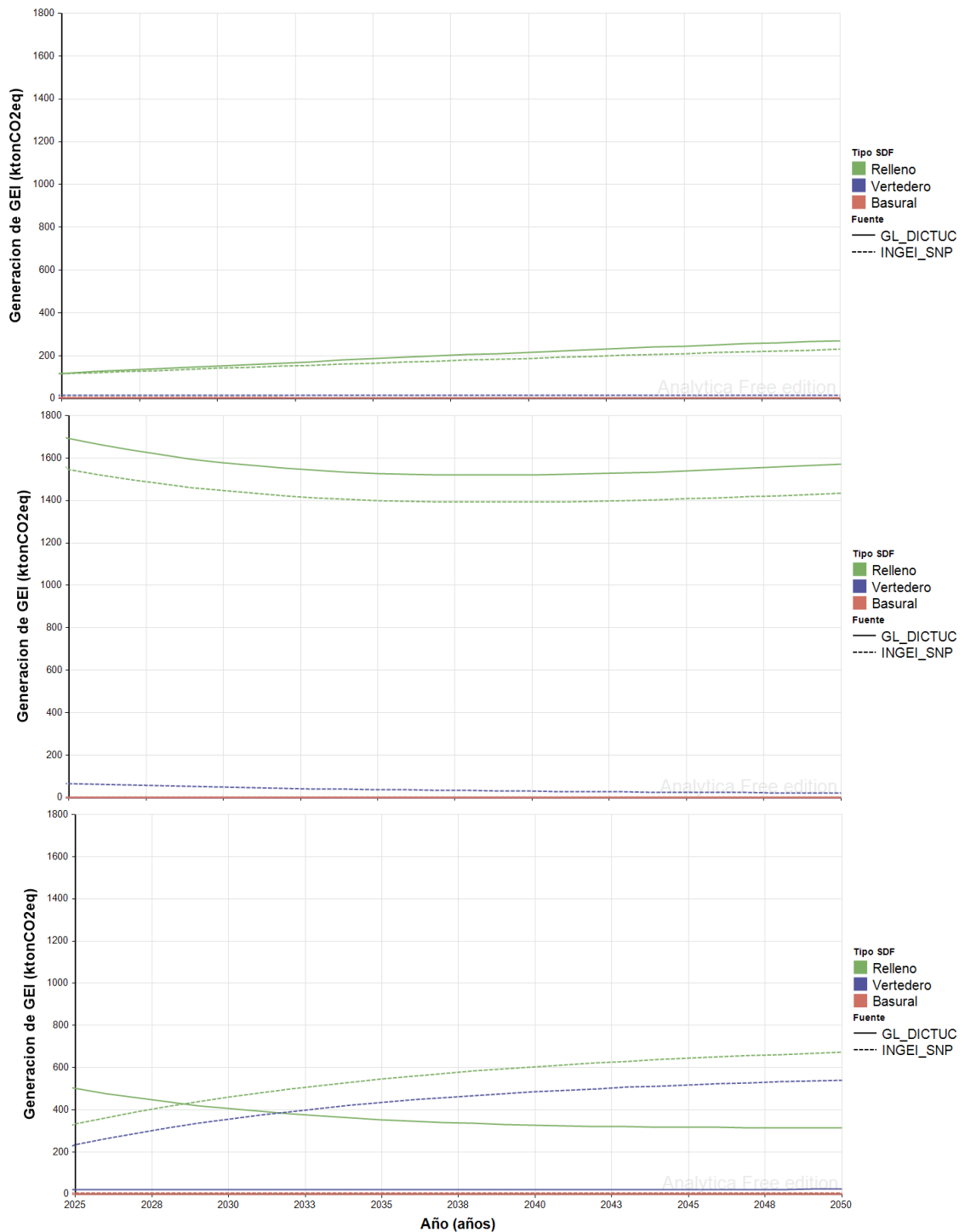


Figura 4-51 Comparación SNP: Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según tipo de sitio de disposición final (SDF) y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO₂eq. (2025-2050)

Fuente: Elaboración propia

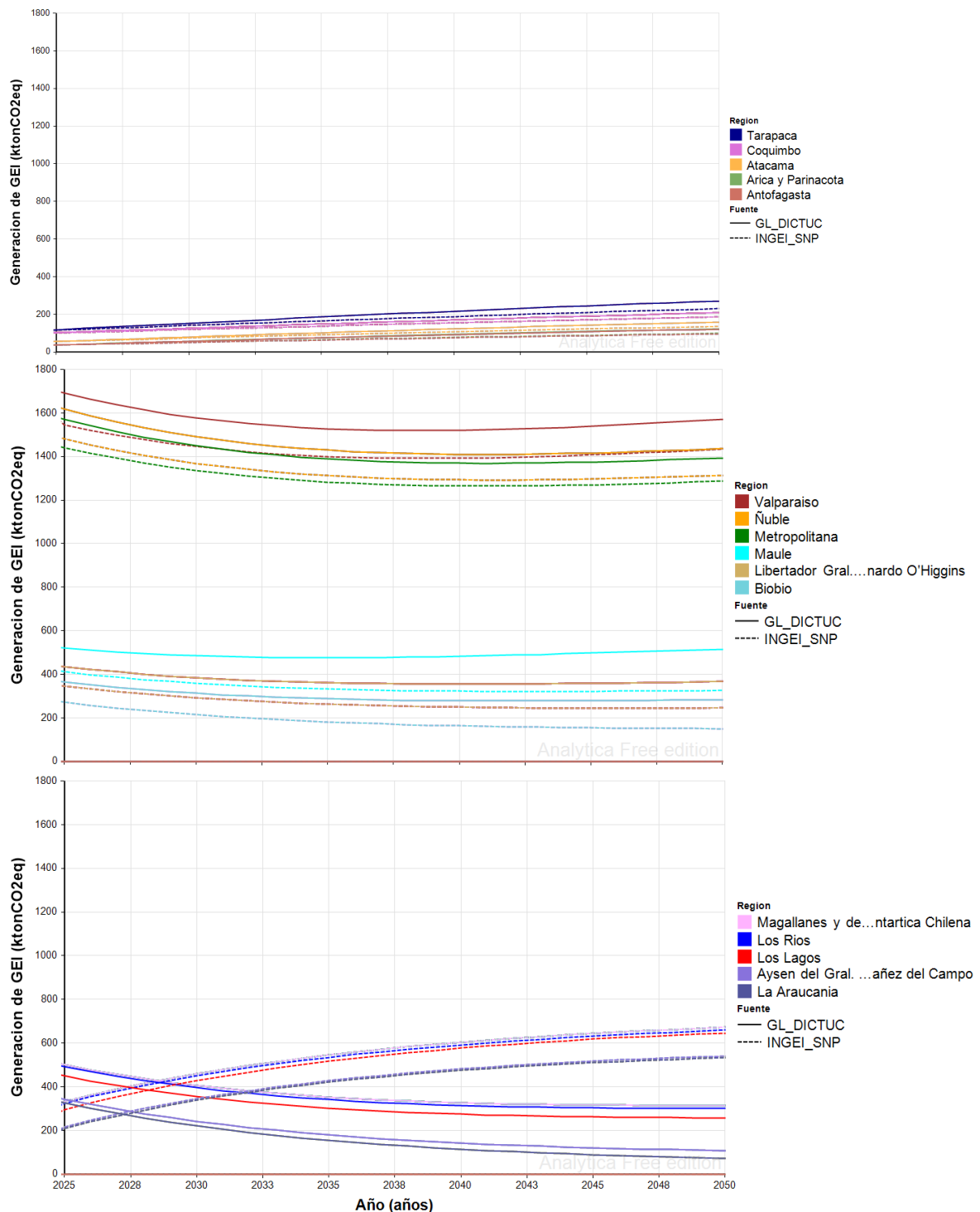


Figura 4-52 Comparación SNP: Generación de metano total por residuos sólidos industriales, según región de Chile y perspectiva territorial (norte-sur), datos apilados, en ktCO₂eq. (2025-2050)

Fuente: Elaboración propia

5. Prácticas de operación y Soluciones tecnológicas aplicables que permiten la reducción de emisiones de metano en los rellenos sanitarios del país

5.1 Técnicas y/o Medidas de control de emisiones de metano disponibles para implementarse en las fuentes emisoras actuales y futuras

5.1.1 Identificación y caracterización de técnicas o medidas de control

Se identifican y caracterizan tecnologías aplicables a sitios de disposición final para la reducción de emisiones de metano a la atmósfera. Para esto se recopiló información de diversos estudios basados en revistas científicas como Science Direct, guías de medidas y tecnologías para la reducción de gases de efecto invernadero como el documento “*Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from municipal solid waste landfills*” (EPA, 2011) y el informe para el Plan de Mitigación de ImplementaSur del año 2024 “Evaluación general de alternativas para la mitigación de emisiones de metano de rellenos sanitarios” (ImplementaSur, 2024). Respecto al potencial de reducción asignado para los dispositivos de control, estos están supeditados al nivel de captura, lo que a su vez depende del tipo de cobertura que presente, y se le añade si esta puede contar o no con biocobertura. Estas combinaciones están en el anexo digital como “NEMetano-Costos_Mecanismos” y el resumen en la Tabla 5-2.

Las medidas para la reducción de emisiones de metano en rellenos sanitarios se organizan en tres grupos funcionales, en base al rol que cumplen dentro del sistema de gestión del biogás o gas de relleno (LFG).

- Mejoras en la eficiencia de captura del LFG (*LFG Collection Efficiency Improvement*)
- Dispositivos de Control LFG (*LFG Control Devices*)
- Incremento de bio-oxidación del CH₄ en superficie (*Increase of CH₄ Oxidation*)

5.1.1.1 Mejoras en la eficiencia de captura del LFG

Incluye las acciones orientadas a optimizar la eficiencia de recolección del gas, tales como el diseño del relleno (pozos, tuberías verticales, horizontales, mixtas, condiciones climáticas, variables de seguimiento), monitoreos rigurosos de los pozos y de la superficie, como también la identificación de fugas. A continuación, se mencionarán las variables que influyen en la eficiencia de recolección. Existen dos tipos de modalidades de sistemas de recolección:

- **Sistema de captura pasiva:** Este mecanismo opera mediante la presión natural que se genera entre los residuos y la atmósfera. El gas se transporta con una menor eficiencia que el sistema activo, cuenta con un costo menor de implementación, y se recomienda para rellenos con bajas tasas de generación de CH₄ y que utilice métodos de oxidación biológica para la reducción del gas.

- **Sistema de captura activa:** Este método es más eficiente que el sistema de captura pasiva, pues, opera creando un vacío o presión negativa en los pozos, acelerando la extracción del gas. El sistema puede incluir bombas de vacío, sopladores mecánicos y compresores.

La mejora de la eficiencia de los sistemas activos se basa en el diseño y mantenimiento del sistema de recolección como también en el material de la cubierta de las celdas del relleno. Estas coberturas además de controlar olores, plagas, permiten aumentar la proporción de metano efectivamente capturado frente al total generado, ya que operan conteniendo el gas en la celda evitando su dispersión a la atmósfera. Es ideal que el material del mecanismo que impermeabiliza el sitio de disposición final sea de alta densidad molecular aumentando la resistencia a la difusión del gas y pueda ser dirigido a sistemas de captación para su recolección. En la Tabla 5-1 se muestran las diferentes coberturas y su eficiencia para la captura del gas.

Tabla 5-1 Eficiencia de captura de gas respecto diferentes materiales de cobertura

Tipo de cobertura	Descripción	Eficiencia de captura de gas	Costos Cobertura (USD/m ²)
Celda en operación (sin cobertura)	N/A	35%	N/A
Cobertura diaria	Se aplica al finalizar cada jornada de operación sobre los residuos. Se denomina intermedia cuando aplica a celdas llenas previo a la cobertura final, utiliza materiales simples y de bajo costo, como tierra u otros suelos disponibles en el sitio. Se compacta en capas de 15 cm.	65%	3 - 5
Cobertura final de arcilla	Es parte del sistema definitivo de cierre de la celda. Su función es crear una barrera de baja permeabilidad, minimizar la emisión de biogás a la superficie conteniendo una mayor cantidad de gas, aumentando la eficiencia en sistemas de recolección.	85%	
Cobertura final de geomembrana	Consiste en la instalación de una lámina sintética impermeable (High Density Polyethylene (HDPE)), diseñada para reducir al mínimo la infiltración y las emisiones, mejorar la captación de biogás. Se puede utilizar en combinación con capas de arcilla o suelos compactados para aumentar la eficiencia.	90%	1,5 - 2

Fuente: Elaboración propia en base a (EPA, 2011) e (ImplementaSur, 2024)

Se puede analizar que la eficiencia de un sistema de captura de gas aumenta de manera importante (157% del valor sin cobertura) operando en conjunto con sistemas de cobertura de alta densidad como la geomembrana.

5.1.1.2 Recirculación de lixiviados para la aceleración de generación de metano

La medida de recirculación de lixiviados se aplica para aumentar la degradación anaerobia de los residuos y la generación de biogás, el contenido de humectación es fundamental para la actividad de los microorganismos y la producción de metano. Esta estrategia se denomina como “*Bioreactor landfill*” (Reinhart Debra & Townsend Timothy, 2002; Townsend Timothy, 1998). Estudios piloto han mostrado que rellenos con circulación pueden alcanzar tasas de generación de metano 2 a 10 veces mayores que rellenos secos equivalentes durante los primeros años. En condiciones óptimas se puede lograr que gran parte de la descomposición que usualmente tomaría entre 20 a 30 años ocurra en quizás entre 5 a 10 años. Por ejemplo, el proyecto experimental del Relleno de Nueva York/Fresh Kills en los 90 recirculó lixiviados y observó que en 3 años la generación de metano acumulada alcanzó valores que un modelo clásico proyectaba a 10+ años (Kinman et al., 1987).

Reintroducir los lixiviados podría mantener la humedad óptima, distribuir nutrientes y microorganismos, homogenizando la biodegradación; Análogamente el lixiviado contiene ácidos volátiles y productos intermedios de la fermentación, su recirculación re-inocula esas sustancias en zonas menos degradadas, acelerando la metanogénesis en la celda.

La recirculación se puede realizar de las siguientes maneras:

- **Red de pozos de biogás:** Método en el cual se adaptan pozos para doble propósito, inyectando lixiviado en la base del pozo a través de tuberías coaxial para que se infiltre radialmente.
- **Trincheras o pozos de infiltración:** Este método requiere de zanjas someras sobre la celda, se rellenan con grava y se vierten allí los lixiviados bombeados desde el estanque, permitiendo su percolación controlada a través de residuos circundantes.

Aparte de lixiviados propios, se han evaluado otras formas de humectación, como agua limpia u efluentes orgánicos (lodos de depuradora diluidos, residuos líquidos agroindustriales). Estas opciones además de aportar humedad, aporta nutrientes o substratos, estimulando la metanogénesis, teniendo en consideración la filtración o tratamiento de estos líquidos para no introducir sustancias tóxicas que inhiban el microbiota (metales pesados, compuestos recalcitrantes).

Un sistema de lixiviados requiere de un monitoreo centrado en la cantidad de líquido añadido y en la elevación de nivel freático dentro de los residuos, ya que un mal manejo de este sistema puede elevar el volumen del lixiviado al punto de aumentar la presión de poros en la basura y tener riesgos geotécnicos (casos de deslizamientos interno, derrumbes en taludes). Según la reglamentación experimental “RD&D rule”, el relleno sanitario debe tener un sistema de recolección de lixiviados diseñado y construido para mantener una profundidad de lixiviados (presión hidrostática) sobre el revestimiento (*liner*) de menos de 30 centímetros (cm) (EPA, 2004, 2018).

- **Biorreactor híbrido:** A partir del estudio “*Enhanced landfill process based on leachate recirculation and micro-aeration*” se analiza la mejora del proceso de recirculación de lixiviados mediante microaireación. Se concluye que este proceso permite convertir más del 60% del carbono orgánico degradable a estado gaseoso en un periodo relativamente corto. La recirculación aporta la humedad adecuada, mientras que la microaireación crea un microambiente con oxígeno que favorece la nitrificación y la desnitrificación, mejorando la condición de acumulación de nitrógeno amoniacal que inhibe la degradación, y demostrando un aumento de la producción de biogás en menor tiempo (G. Zhang et al., 2023).

En el estudio se realiza un análisis económico comparando costos de la implementación de un relleno sanitario anaeróbico convencional frente a un relleno sanitario que aplica dos tecnologías combinadas, la recirculación de lixiviados y la microaireación, este estudio se realiza en un relleno sanitario real en Tianjin, China, utilizando como unidad funcional 1 tonelada de residuos domésticos dispuestos. Los costos se presentan originalmente en yuanes (CNY), estos fueron actualizados para una mejor visualización de los datos utilizando la variación del Índice de Precios al Consumidor de China entre 2015 y 2024 mediante la plataforma FRED (Federal Reserve Economic Data). Posteriormente, los valores ajustados se convirtieron a dólares estadounidenses (USD) empleando el tipo de cambio CNY-USD informado por el portal financiero Pound Sterling Live, extraída de su sección oficial de contacto.

Los costos son los siguientes:

- **Costo total ($C_t = C_o + C_d + C_c$):**
 - Proceso mejorado: 9,6 USD/t (44% menor).
 - Proceso tradicional: 17,3 USD/t.
- **Costo operacional (C_o):**
 - Proceso mejorado: 3,2 USD/t (59% menor).
 - Proceso tradicional: 7,7 USD/t.
- **Costo disposición de residuos (C_d):** Incluye el consumo y los gastos generados por el tratamiento final de los contaminantes producidos por el relleno.
 - Proceso mejorado: 5,3 USD/t (37% menor).
 - Proceso tradicional: 8,4 USD/t.
- **Costo de construcción (C_c):**
 - Proceso mejorado: 1,2 USD/ t (9% mayor).
 - Proceso tradicional: 1,1 USD/t.

En base a los costos determinados en la evaluación económica, un relleno sanitario que combina las dos tecnologías (proceso mejorado) respecto a uno tradicional muestra

menores costos de construcción y operacionales (9,6 USD/t en comparación a 17,3 USD/t), no así costos de disposición de residuos, el cual es superado por un costo muy bajo (5,3 USD/t en comparación a 8,4 USD/t). Sin embargo, el costo total sigue siendo menor a la aplicación de rellenos sanitarios tradicionales. Para efectos de costos CAPEX y OPEX, consideramos costos de construcción y operacionales.

- CAPEX: 1,2 USD/t.

5.1.1.3 Dispositivos de control del biogás

Una vez recolectado el biogás, en un sistema de captura de extracción activa, este puede ser útil de distintas formas por su capacidad de combustión, debido a su composición rica en metano lo convierte en una fuente sustituta de los combustibles fósiles. Sin embargo, su capacidad de combustión tiene relevancia cuando el contenido de metano del biogás es superior al 45%, ya que en este punto es inflamable. La composición del biogás está directamente relacionada con el material residual dispuesto en los rellenos sanitarios, pero en valores estándar el contenido de metano ronda por los 45-60% v/v en manera cruda (BAAQMD, 2008), directamente de la extracción contando con un contenido energético de 6 - 6,5 kWh/m³ en promedio (MINENERGIA et al., 2011).

En este apartado se reúnen las tecnologías destinadas al tratamiento, manejo o valorización del gas capturado, como las antorchas (flares), los sistemas de compresión y combustión, y los equipos de cogeneración.

- **Antorchas:** Las antorchas son de los equipos más utilizados para el manejo del biogás, ya que operan con una simple combustión u oxidación química, obteniéndose como resultado agua, dióxido de carbono (CO₂) y otros gases. Este proceso por simple que se vea es sumamente importante por el potencial de forzante climático altísimo que presenta el metano (28 veces mayor que el CO₂⁷), que se emana de forma natural del relleno sanitario. Al quemarlo se reduce de manera importante su impacto climático. En cuanto al potencial de reducción y su CAPEX se presentan a continuación:
 - Potencial de reducción: 84,15-91,5%.
 - CAPEX: 116.355 USD/ha⁸.
- **Motor:** En cuanto a la destrucción y valorización energética del biogás, los motores a combustión interna son de las tecnologías y más comúnmente utilizadas en proyectos relacionados al uso del biogás y su transformación energía eléctrica, porque es medianamente de bajo costos, alta eficiencia y la alta variedad de tamaños de motores se pueden adaptar a distintas escalas de rellenos sanitarios (EPA, 2024). A continuación, se presentan su potencial de reducción y su CAPEX:
 - Potencial de reducción: 82,88-90,44%.
 - CAPEX: 3.335 USD/kW potencia instalada.

⁷ Según el GWP-100 del AR5 y en línea con el usado en el INGEI.

⁸ Es el valor por superficie con extracción activa de captura lo que contemple pozos y ventiladores.

- **Turbina:** Esta tecnología es de uso de biogás y transformación a energía eléctrica, y se suelen utilizar en sitios de disposición final de gran emplazamiento con gran potencial de generación energética, idealmente sitios que tengan un flujo de biogás sobre los 1.300 cfm (2.210 m³/h) o que tengan la capacidad mínima de generar 3 MW de energía eléctrica. Las turbinas de ciclo simple suelen presentar eficiencias de generación eléctrica del 20-28%. Las combinaciones con ciclo combinado que recupera el calor residual, pueden alcanzar eficiencias energéticas del orden del 40% (EPA, 2024). El potencial de reducción y su CAPEX se presenta a continuación:
 - Potencial de reducción: 82,88-90,44%.
 - CAPEX: 2.747 USD/kW potencia instalada.
- **Microturbina:** Las microturbinas son tecnologías poco aplicadas en sitios grandes debido a que sus costos, en comparación con los motores de combustión interna, son más altos respecto a precio respecto a su potencial energético, es decir presentan más costos/kW de potencia instalada. Sin embargo, estos equipos presentan las siguientes particularidades: 1) Puedan usar biogás con baja pureza de metano (~35% de metano en biogás), 2) Produce bajas emisiones de óxido de nitrógeno y 3) Se pueden agregar y remover microturbinas dependiendo de las cantidades de flujo que puedan cambiar cambiantes. Estas características le otorgan la capacidad de adaptabilidad a distintas cantidades y tamaños de sitios (EPA, 2024). El potencial de reducción y su CAPEX se presentan a continuación:
 - Potencial de reducción: 82,88-90,44%.
 - CAPEX: 10.791 USD/kW potencia instalada.
- **Cogeneración o Combined Heat and Power (CHP):** es una tecnología que permite aprovechar simultáneamente energía eléctrica y térmica generada a partir de la combustión del biogás. La cogeneración, en este informe, se evalúa en 2 formas de producción de energía eléctrica, que el biogás alimente un motor de combustión a gas o que el biogás sirva de combustible para un sistema termoeléctrico, y el calor residual es utilizado para calentar ambientes, agua o algún insumo que requiere calor. En cuanto al potencial de reducción y su CAPEX se presentan a continuación:
 - Potencial de reducción:
 - CHP + Motor: 83,30-90,89%.
 - CHP + Turbina: 83,30-90,89%.
 - CHP + Microturbina: 83,30-90,89%.
 - CAPEX:
 - CHP + Motor: 4.513 USD/kW de potencia instalada.
- **Uso directo (Inyección por flujo continuo o compresión y transporte):** Esta forma de valorización del biogás busca purificarlo y acondicionarlo su uso directo, para hacer uso

de su valor energético térmico. El biogás crudo, aunque posee una fracción significativa de metano (45-60%), contiene también una proporción importante de dióxido de carbono (40-60%) (BAAQMD, 2008) y pequeñas concentraciones de compuestos traza como sulfuros, lo que reduce su poder calorífico y hace poco eficiente su nivel comercial como combustible. Por ello, el primer paso consiste en tratar el gas para maximizar la concentración de metano, mediante sistemas de desulfuración y procesos de separación de CO₂ basados en adsorción física, química o reacciones de lavado. El tratamiento incluye además la eliminación de la humedad. Una vez purificado, el biogás se puede transportar por cañerías para su uso inmediato o se comprime para su uso como gas natural, permitiendo su almacenamiento y transporte en camiones de distribución. Cabe mencionar que el sistema de tratamiento también se puede ocupar en otros procesos de uso energético en el mismo sitio para hacer más eficiente su aprovechamiento, consecuente a un aumento de inversión. En cuanto al potencial de reducción y su CAPEX se presentan a continuación:

- Potencial de reducción: N/I.
- CAPEX: 402.308 USD/ (m³/h de biogás capturado).

5.1.1.4 Incremento de bio-oxidación del CH₄ en superficie

Comprende las medidas que utilizan procesos de oxidación biológica para tratar el metano residual que no es capturado por el sistema como también en el caso en donde no existe un sistema de recolección, por la disminución de la generación de metano. Entre ellas se encuentran las biocubiertas y los biofiltros, que promueven la actividad microbiana capaz de convertir el CH₄ en CO₂, disminuyendo de forma significativa las emisiones difusas.

- **Biocubiertas:** Se trata de una solución orientada a reducir las emisiones de metano en sitios de disposición final mediante el aumento de la oxidación biológica que ocurre en la cobertura superior del relleno. Este incremento se logra porque las biocoberturas están compuestas por una mezcla de material biológicamente activo, principalmente compost que alberga microorganismos metanótrofos, junto con materiales porosos como suelos arenosos, grava o material pedregoso que facilitan la difusión del biogás a través de la capa y facilitar condiciones de crecimiento bacteriano. Estas tecnologías pueden complementarse con un sistema de captura, operando de manera simultánea para oxidar el metano que no es recolectado por los pozos. Cuando ambos sistemas funcionan en conjunto, es posible alcanzar reducciones superiores al 80% de las emisiones. En cuanto al potencial de reducción y su CAPEX se presentan a continuación:
 - Potencial de reducción: > 32%. Esto quiere decir que, si se agrega una biocobertura sobre la cobertura final, se reduciría la emisión de metano al aire en un 32% adicional.
 - CAPEX: 232.711 USD/ha⁹.

⁹ El valor del CAPEX es de material de cobertura por superficie cubierta con esta.

- **Biofiltros:** A partir del estudio *“Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from municipal solid waste landfills”* (EPA, 2011) se obtiene que esta tecnología es similar a las biocoberturas, pero se aplica de manera más focalizada, ya que el objetivo es dirigir el biogás hacia un biofiltro para que atraviese el medio biológico donde ocurre la oxidación del metano. El sistema se conforma, en primera instancia, por un material poroso que favorece la difusión del gas y proporciona condiciones para el desarrollo de bacterias metanotróficas, combinado con una cobertura biológicamente activa que potencia la degradación. El biofiltro se instala en la salida de un conducto de biogás y también puede conectarse a un pozo en sistemas de captura pasivos. Esta tecnología es especialmente adecuada para sitios pequeños o sectores específicos del relleno donde existe una concentración localizada de emisiones de metano; sin embargo, también puede implementarse en instalaciones que cuentan con pozos de extracción como complemento a los sistemas de captura convencionales. En cuanto al potencial de reducción y su CAPEX se presentan a continuación:
 - Potencial de reducción: > 19%. Esto quiere decir que, si se agrega un biofiltro sobre la cobertura final, se reduciría la emisión de metano al aire en un 19% adicional.
 - CAPEX: 5,49 USD/(m³/h) ¹⁰.

5.1.2 Evaluación de las medidas

Se realiza la siguiente evaluación con el fin de proponer alternativas más costo-efectiva y técnicamente adecuadas para diversas capacidades y necesidades de rellenos sanitarios, comparando medidas de gestión y control de emisiones de metano. La evaluación se estructura primeramente sobre los siguientes criterios:

- Condiciones de implementación del relleno.
- Costos y potencial de reducción de CH₄: En donde se señalan valores de cada tecnología, CAPEX, OPEX, MRV y abatimiento, en conjunto a su potencial de reducción del gas metano.

Respecto de cada propuesta, se identifican las condiciones de implementación según las características del relleno sanitario (Tabla 5-2): si la medida es aplicable a sitios activos, cerrados o a ambos; si requiere o no un sistema de recolección de biogás; y, en el caso de las tecnologías que permiten su valorización, la capacidad mínima de generación necesaria para su operación.

¹⁰ Valores promedios calculados anualmente para 2009 y 2025 desde indicadores diarios [Banco Central](#). Valores desde estudio *“Economic assessment of the design, construction and operation of open-bed biofilters for waste gas treatment”* (Prado et al., 2009).

Tabla 5-2 Condiciones de implementación de medidas de control

Medida		Condiciones de implementación
Mejora de eficiencias de captura de gas		
Quema		-Operativo -Contar con un sistema de captura de gas
Biorreactor		-Operativo -Cerrado (es más costoso, implica un beneficio tardío) -Tuberías y tecnología apta para lixiviados (no aplica estructura de captura de gas)
Cogeneración	CHP Motor	-Operativo -Contar con un sistema de captura de gas -Capacidad de generación de 800kW o más
	CHP Turbina	-Operativo -Contar con un sistema de captura gas -Capacidad de generación mínima de 3MW
	CHP Microturbina	-Operativo -Contar con un sistema de captura de gas -Capacidad de generación baja menor a 1MW
Compresión y tratamiento del Gas-Usa directo		-Operativo -Contar con un sistema de captura de gas -Uso del gas en distancias acotadas para usos del mismo sitio (traslado de alto costo)
Biofiltro		-Operativo -Cerrado -Contar con sistemas de captura de gas pasivo o inexistentes
Biocobertura		-Operativo -Cerrado -Todo tipo de relleno

Fuente: Elaboración propia en base a (EPA, 2011)

Cabe mencionar la relevancia del clima al momento de aplicar métodos de reducción de metano, si bien no es una condición única determinante, es fundamental, ya que la temperatura como la humedad son variables determinantes en la generación de metano en rellenos sanitarios. El estudio de (Zhao Haokai, 2019) analiza la generación y emisión de metano en rellenos sanitarios combinando teoría, modelación y datos reales, con especial énfasis en cómo el clima (clasificación Köppen-Geiger: tropical A, árido B, templado C y nevado D) influye en la degradación anaerobia. El trabajo calcula la máxima generación teórica de CH₄ por tonelada de RSU (residuos sólidos urbanos), evalúa la fracción realmente degradada y deriva parámetros como la tasa de generación k, la generación y emisión de metano. Sus resultados muestran que el clima es determinante: los valores de k y de generación por tonelada siguen el patrón C > A > D > B (mayor en templado y menor en árido), mientras que las mediciones reales confirman que C y D presentan las mayores tasas y B la menor, destacando que la disponibilidad de agua más que la temperatura, controla la actividad metanogénica.

El estudio evidencia también que los modelos IPCC FOD tienden a sobreestimar la generación frente a los datos medidos y que la eficiencia de captura se mantiene en torno al 70%, reduciendo, pero no eliminando las emisiones. Finalmente, al reconstruir una serie global 1970-

2017, aparte de concluir que los rellenos son principales fuentes de metano y que se debe fortalecer los sistemas de captura y aprovechamiento, se destaca la importancia de ajustar parámetros por clima. De acuerdo con este análisis se propone que para medidas que sugieran la necesidad de mayor generación de metano, como lo son las de valorización, el clima más favorable es templado.

Por otra parte, se identifican el potencial de reducción de emisiones de metano, los costos de inversión, operación y mantención de cada medida, así como su costo de abatimiento expresado en USD/tCO₂eq, tal como se presenta en la Tabla 5-3. Cabe mencionar que, en el caso del costo de abatimiento, todas las tecnologías, con excepción de la quema, se presentan sin considerar la inversión asociada a un sistema de captura de biogás; de incluirla, el costo de abatimiento aumentaría en aproximadamente 7 a 14 dólares por tonelada métrica de CO₂e reducida.

Los costos provenientes de (EPA, 2011) fueron actualizados a valores de 2024 utilizando el promedio del Índice de Precios al Consumidor de Estados Unidos entre 2011 y 2024. Asimismo, las unidades originales como el caudal expresado en “scfm”, la superficie en “acre” y la distancia de transporte del gas para la medida de uso directo en “millas” se convirtieron a sus equivalentes en el Sistema Internacional, es decir, a m³/h (en condiciones estándar), hectáreas (ha) y kilómetros, respectivamente, con el fin de mantener coherencia metodológica y facilitar la interpretación de los resultados.

Tabla 5-3 Resumen costos y potencial de reducción de medidas de control de metano en rellenos sanitarios

Ruta tecnológica	CAPEX actual	OPEX actual	Unidad ^(a)	Costo de abatimiento (USD/tCO ₂ eq)	Potencial de reducción (%)
Dstrucción en antorcha	116.355	19.877	USD/ha	11,8 - 47,1	84,15 - 91,5%
Biorreactor	1,20	3,20	USD/t	N/A	N/A
Motor	3.335	353	USD/kW	23,5 - 31,4	82,88 - 90,44%
Turbina	2.747	255	USD/kW	23,5 - 35,3	82,88 - 90,44%
Microturbina	10.791	746	USD/kW	3,9 - 25,5	82,88 - 90,44%
Cogeneración: CHP Motor	4.513	355	USD/kW	13,7 - 111,8	83,3 - 90,89%
Uso directo: inyección por flujo continuo	67.268	6.306	USD/(m ³ /h)	N/A	84,15 - 89,1%
Uso directo: Compresión y transporte	402.309	N/A	USD/km	N/A	84,15 - 89,1%
Biocobertura	232.711	N/A	USD/ha	1.461,7	32%
Biofiltro	5,49	6.807	USD/(m ³ /h)	N/A	19%

^(a) Valores actualizados al dólar en 2025

Fuente: Elaboración propia en base a (EPA, 2011) y (S. Zhang et al., 2025)

Finalmente, la evaluación considera cuatro criterios principales:

- Operatividad del relleno: Si se encuentra en estado operativo o cerrado
- Capacidad de generación de metano: Clasificada como alta o baja según:
 - Potencial de aprovechamiento (>200-1000 t/día) en cuanto a cantidad de residuos.

- Condiciones ambientales (precipitación anual > 635 mm)¹¹ y condiciones de estructurales (profundidad del SDF > 15,24 m)¹² (EPA, 2024).
- Presencia o ausencia de un sistema de captura de biogás.
- Selección de medidas aplicables en función de los parámetros anteriores.

Con base en esta información, y utilizando como referencia las recomendaciones de la EPA (2011), se determina la aplicabilidad de cada tecnología previamente analizada según el estado del relleno y su capacidad de generación de metano (t/día), lo que permite identificar las medidas más adecuadas para cada escenario.

En la Tabla 5-4 se resumen los escenarios y condiciones en las que sería oportuno la implementación de cada tecnología, y medidas complementarias que podrían ayudar en mejorar la tecnología por si sola.

Tabla 5-4 Evaluación de medidas tecnológicas para la reducción

Operatividad del relleno	Capacidad de generación CH ₄	¿Cuenta con Sistema de captura de gas?	Medidas a implementar	Medidas complementarias a implementar
Operativo	Alta	No	Sistema de captura de gas + valorización. Biocobertura.	Cobertura diaria y finales (arcilla, geomembrana, otros). Biofiltros. Biocoberturas.
		Sí	Mejora de eficiencias de captura de gas	
			Quema	
			Biorreactor	
			Cogeneración	
	Baja	No	Biocobertura. Biofiltros.	
		Sí	Biofiltros con Sistema de captura pasiva	
Cerrado	Alta	No	Sistema de captura de gas + valorización. Biocobertura.	Cobertura diaria y finales (arcilla, geomembrana, otros). Biofiltros. Biocoberturas.
		Sí	Mejoras de eficiencias de captura de gas	
			Quema	
			Biorreactor	
			Cogeneración	
	Baja	No	Biocobertura. Biofiltros.	
		Sí	Biocobertura. Biofiltros con Sistema de captura pasiva.	

Fuente: Elaboración propia en base a (EPA, 2011) y Experto asesor

A partir de la caracterización de las medidas y de la evaluación de criterios para la reducción de emisiones de metano, se concluye que la tecnología a implementar depende de varios factores: el estado del relleno (activo o cerrado), su capacidad de generación de biogás y si esta es suficiente para ser valorizada energéticamente, la existencia o no de un sistema de captura ya

¹¹ Este dato está extraído de un manual (LFG Energy Project Development Handbook, Landfill Methane Outreach Program, EPA) con un concepto de condiciones óptimas para la elaboración de proyectos energéticos con el biogás.

¹² Ídem.

instalado, y otros aspectos operacionales. A ello se suman las condiciones climáticas del entorno, que en este apartado no fueron consideradas en detalle, pero que resultan relevantes al momento de definir la opción más adecuada para cada sitio (Temperatura, humedad, otros).

En Chile, la prioridad regulatoria sigue siendo principalmente la contención sanitaria (impermeabilización, cobertura diaria, manejo de lixiviados, entre otros). Sin embargo, en los grandes rellenos sanitarios comienza a incorporarse el objetivo de maximizar la captura de metano como co-beneficio. Un ejemplo es el relleno Loma Los Colorados, operado por KDM, donde se han implementado estrategias asociadas a un funcionamiento tipo “biorreactor” para optimizar la generación y aprovechamiento del biogás. Cabe mencionar que en el país aún persisten vertederos ilegales y sitios de disposición no autorizados, donde no existe captura de gas y las emisiones de metano se liberan de manera difusa y sin control. En estos contextos, adquieren especial relevancia las medidas de bajo costo, como biocoberturas y biofiltros, que pueden contribuir a reducir las emisiones aun en ausencia de sistemas formales de captación y valorización del biogás.

5.2 Propuesta de potenciales mecanismos para la correcta fiscalización de la implementación de las técnicas o medidas de control identificadas

5.2.1 Potencial mecanismo de fiscalización y validación de datos

En este apartado se proponen y describen mecanismo de fiscalización y obtención de información para la autoridad correspondiente para la correcta implementación de las medidas caracterizadas. Para esto se extrajo información de la Sección 3.2 “Caracterización de normativas internacionales” sobre normas que están actualmente vigentes en el marco internacional, en cuanto a monitoreo y mecanismo de fiscalización.

Se propone entonces que la fiscalización para la correcta implementación de las tecnologías se base en 2 lineamientos:

1. Fiscalización de instalación “in situ” de la tecnología o tecnologías aplicadas. Con la idea de asegurar una buena instalación.
2. Seguimiento de variables de interés para calificar la correcta y continua aplicación de la tecnología mediante la unidad fiscalizadora. Con la idea de asegurar un buen funcionamiento en el tiempo.

En cuanto al primer lineamiento, se propone que las autoridades encargadas de fiscalizar (SEREMI y SMA) deben fortalecer sus capacidades a través del mejoramiento del conocimiento técnico y del acceso a tecnologías propicias para llevar a cabo revisión, inspección y validación en el sitio durante la implementación de las distintas tecnologías. El objetivo principal de este primer lineamiento es asegurar una instalación adecuada del equipamiento tecnológico, para asegurar su buena capacidad operativa. Además de la instalación de la tecnología, también se validará la

instalación de sistemas de monitoreo y seguimiento, asegurando la aplicación del segundo lineamiento.

En cuanto al segundo lineamiento, su objetivo es que la entidad fiscalizadora (SEREMI y SMA) pueda tener un registro y seguimiento de variables de interés para corroborar la efectiva aplicación de las tecnologías en su misión de reducir las emisiones del sitio de disposición final. De esta forma, se propone que el dueño u operador del sitio de disposición final haga seguimiento de variables importantes y emita reportes a la autoridad.

Considerando la Resolución Exenta 431/2021 MMA¹³ y el hecho de que el relleno sanitario cuente con un sistema de extracción activa de biogás y una antorcha de quema y/o planta de generación eléctrica, resulta fundamental cumplir con la obligación de reportar los datos establecidos en el ítem iii), los cuales incluye los valores horarios de cantidad y composición del biogás captado en la entrada al sistema de manejo, estos deben incluir los siguientes parámetros de seguimiento, esenciales para garantizar la seguridad operacional:

- Monitoreo del flujo del biogás del relleno sanitario recolectado y enviado a valorización, medido de forma continua los parámetros de caudal (toneladas/h), y caudal normalizado (Nm³/h).
- Monitoreo de la composición fraccional (%) de los distintos gases mencionados en la resolución, los que corresponden a metano (CH₄), oxígeno (O₂), dióxido de carbono (CO₂) y monóxido de carbono (CO).

Los monitoreos antes mencionados se pueden realizar en conjunto con un flujómetro y un analizador de gases, idealmente instalados en la misma ubicación relativa al componente de valorización. También estos monitoreos servirán para tener la información respecto a las unidades de metano valorizadas.

Se propone también el monitoreo de algunas variables de importancia, basado en información recopilada de normativas internacionales (revisadas del objetivo específico a) del presente informe) y criterios de Climate Action Reserve para Chile¹⁴:

- Monitoreo de parámetros como la temperatura de ignición, concentración de NO_x, concentración de SO_x de forma continua.
- Monitoreo del equipamiento de recolección y valorización del biogás, el que contempla la revisión mensual a los cabezales de los pozos y revisión trimestral del sistema completo de recolección de biogás, con la finalidad de asegurar un buen funcionamiento del sistema operativo. Estas revisiones deben ser supervisadas y documentadas.

Si bien el foco de este trabajo es analizar el metano por su efecto en el ambiente como GEI, también es de importancia y puede resultar sinérgico con políticas ambientales, monitorear y

¹³ Resolución 431 Exenta/2021 MMA y SMA: Aprueba “Instrucciones carácter específico para la remisión de reportes de datos operacionales y ambientales, para unidades fiscalizables de disposición final de residuos sólidos domiciliarios y asimilables (rellenos sanitarios y vertederos)”

¹⁴ Protocolo de Rellenos Sanitarios en Chile. Climate Action Reserve.

registrar contaminantes resultantes de una combustión (para los sistemas de valorización que consideren la combustión) como lo son los NO_x y los SO_x, por su relevancia en la calidad del aire y por consecuencia su impacto en los grupos humanos.

Para el caso de la implementación de tecnologías de aumento de la oxidación del metano, los parámetros adicionales a medir son:

- Monitoreo de composición del biogás “inlet vs outlet” (%CH₄/CO₂) de la cobertura.
- Monitoreo de humedad en el compost u otra cobertura biológicamente activa.

Respecto la forma y entrega de todos los datos se propone considerar la Resolución exenta N°431 la cual dicta que deben ser remitidos a la Superintendencia del Medio Ambiente vía conexión en línea según los lineamientos técnicos de la Resolución exenta N°252¹⁵. El titular deberá calibrar y hacer mantención periódica mínimo mensual de los sensores de monitoreo en línea. En cuanto a la frecuencia de entrega de la información, los valores de cantidad y calidad de biogás deberán ser capturados cada 1 hora y transmitidos en tiempo real a la SMA, o concentrados cada 24 horas como máximo, vía API (Catastro API).

Además, se recomendaría que la autoridad fiscalizadora tenga las atribuciones de asistir de forma presencial y aleatoria a hacer inspecciones de funcionamiento, con énfasis en la instalación del equipo recolección y de valorización, y las posteriores revisiones del equipamiento.

5.2.2 Monitoreo de variables de seguimiento

En base a documentación proporcionada por ImplementaSur, 2024 y antecedentes propios recopilados, se identifican, caracterizan y evalúan dos tipos de monitoreo para fiscalizar variables de seguimiento, tales como concentración y flujo del biogás en rellenos sanitarios:

- **Monitoreo de concentración:** Determina la proporción de un gas en la mezcla de gases en el aire, las unidades monitoreadas se expresan en ppm o %volumen (para equipos que pueden medir más de un compuesto). Aplica para establecer líneas base, llevar un control sobre aumentos o disminuciones, y poder hacerle seguimiento de forma indirecta, ya que aumentos en la concentración puede suponer fugas del sistema de control.
- **Monitoreo de caudal/flujo:** Cuantifican el volumen o masa de biogás que circula por un conducto o sistema de captación por unidad de tiempo, con unidades como m³/h o kg/h.

A partir de ambos tipos de monitoreo se identificaron, respectivamente, cuatro y dos tecnologías más utilizadas para su aplicación. La Tabla 5-5 presenta una descripción de los parámetros identificados para cada tecnología, mientras que la Tabla 5-6 resume las tecnologías identificadas, especificando los distintos parámetros tales como su aplicabilidad, frecuencia de uso, funciones adicionales y costos asociados según el tipo de monitoreo.

¹⁵ Resolución 252 Exenta/2020 MMA y SMA: APRUEBA "Instructivo técnico para la conexión en línea con los sistemas de información de la superintendencia del medio ambiente".

Tabla 5-5 Descripción de parámetros para tecnologías identificadas

Parámetros	Descripción
Descripción	Caracteriza la tecnología, explicando en qué consiste, cómo opera y que tipo de medición permite realizar
Usos	Indica la aplicación principal de la tecnología dentro del monitoreo, por ejemplo, mediciones en puntos específicos, zonas críticas, grandes superficies o conductos de biogás
Frecuencia de uso	Señala la periodicidad o modalidad de monitoreo que permite la tecnología como medición continua, uso permanente o aplicación en campañas/eventos de monitoreo
Otros usos	Describe aplicaciones adicionales de la tecnología distintas de su uso principal como la medición de otros gases o de variables como presión o temperatura
Observaciones	Reúne consideraciones relevantes para la implementación o interpretación de la tecnología, tales como requerimiento de operador, limitaciones de precisión, cobertura especial o condiciones de instalación
Costo equipo	Costo de adquisición del equipo o dispositivo necesario para implementar la tecnología
Costo evento	Costo asociado a una campaña, evento o servicio puntual de monitoreo utilizando la tecnología
Costo	Costo referencial general de la tecnología cuando la información no se presenta desagregada entre costos de equipo y costo por evento

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-6 Tecnologías de monitoreo de concentraciones y flujo de biogás

Monitoreo de concentración	
Tecnología n°1: Analizador portátil	
Descripción	Es un dispositivo que se puede aplicar mediante mediciones instantáneas en puntos específicos o a través de un sistema integrado que promedia los valores en áreas más amplias. La calidad de los datos depende de la distancia entre los trayectos recorridos y de la densidad de mediciones realizadas. Su principal ventaja es la capacidad de evaluar zonas vulnerables del sitio, como pozos, fisuras o puntos de posible escape de gas.
Usos	Hacer mediciones en terreno, en puntos específicos, puntos críticos
Frecuencia de uso	Medición continua. Apto para eventos de monitoreo por las condiciones del equipo
Otros usos	Medición de otros gases, utilizando la misma base técnica
Observaciones	La medición es continua, pero dada su precisión se recomienda para mediciones puntuales, eventos o campañas de monitoreo. Este equipo requiere de un operador que guíe presencialmente el equipo
Costo equipo	175-2.900 USD
Costo evento	5.800-23.200 USD
Tecnología n°2: Imágenes de tierra a baja altitud (drones)	
Descripción	El uso de imágenes aéreas permite identificar con mayor precisión los focos de emisiones elevadas y es más eficiente que el monitoreo a pie. Sin embargo, requiere mediciones directas en terreno para confirmar las fuentes y magnitud real de las emisiones detectadas.
Usos	Usado para mediciones de concentraciones de metano (de diversas formas)
Frecuencia de uso	Medición continua. Apto para eventos de monitoreo, por las condiciones del equipo
Otros usos	Puede medir otros gases de interés, configurándolo para ello
Observaciones	Facilidad para recorrer grandes superficies. Este equipo requiere de un operador, pero este lo puede controlar a distancia.
Costo evento	5.800-58.000 USD
Tecnología n°3: Sensor fijo (METTLER TOLEDO, n.d.)	
Descripción	Corresponde a dispositivos instalados en torres, trípodes o cabezales de pozos que permiten un monitoreo continuo de la concentración de metano. Esta tecnología facilita la detección temprana de aumentos anómalos; no obstante, su utilidad depende del número de sensores instalados y de su adecuada distribución dentro del sitio.
Usos	Equipo útil par mediciones de puntos que requieren seguimiento constante, puntos críticos o sensibles que requiere de un monitoreo continuo
Frecuencia de uso	Medición continua. Apto para medición perpetua en el tiempo

Otros usos	Medición de otros compuestos de interés, como temperatura y presión Puede medir también otros gases, pero eso depende del cada artefacto y también de su precio
Observaciones	Puede requerir de un operador en cuanto a revisión de la data medida
Costo equipo	1.070-8.500 USD
Tecnología n°4: Imágenes satelitales	
Descripción	Esta no es una tecnología de por sí, es más bien el rescate y procesamiento de imágenes satelitales capturadas por estos mismo. Entonces a través de ciertos satélites que tienen la capacidad de medir algunos compuestos y capturarlos en imágenes, en las cuales se pueden ver las plumas de dispersión o zonas coloreadas en base a indicadores de concentraciones, todo depende de la configuración del satélite y del procesamiento de las imágenes, se pueden medir las concentraciones de metano en la superficie del relleno sanitario. También se puede hacer una estimación de emisión con estas imágenes aplicando modelos de dispersión de forma regresiva, suponiendo condiciones en las que se transportaría el gas
Usos	Puede ser útil para mapear extensiones de SDF con el fin de encontrar fugas, o hacer comparativa a grandes rasgos los distintos SDF a nivel nacional
Frecuencia de uso	Medición continua. Apto para eventos de monitoreo
Otros usos	Puede medir otros gases de interés, dependiendo del satélite utilizado y su procesamiento
Observaciones	La resolución de las imágenes está determinada por el satélite utilizado, y esta puede ser poco precisa para SDF pequeños. Puede ser operado a distancia
Costos	N/I

Monitoreo de flujo	
Tecnología n°5: Cámaras de flujo	
Descripción	Utilizan cúpulas o cámaras cerradas para medir el flujo de metano en puntos seleccionados de la superficie. El nivel de precisión depende directamente de la cantidad de cámaras utilizadas, lo que incrementa significativamente los costos en sitios de gran extensión. Por ello, su aplicación suele ser inviable para operadores, aunque puede ser factible para fiscalizadores o proyectos de gran inversión
Usos	Utilizado para medir el flujo del biogás en superficie del SDF, en puntos críticos o sensibles
Frecuencia de uso	Medición continua. Apto para evento de monitoreo y también para medición perpetua
Otros usos	N/I
Observaciones	Este equipo mide de forma fija en la superficie en la que se instala
Costo evento	58.000-104.300 USD
Tecnología n°6: Caudalímetro de vórtice o vortex (EH, n.d.)	
Descripción	Es un dispositivo que mide el caudal volumétrico o másico de un gas que transita dentro de un conducto de interés utilizando el efecto Von Kármán, el cual mide la corriente de vórtices que se generan dentro del equipo y se transforma en dato de caudal
Usos	Mediciones de caudal del biogás direccionado por algún conducto
Frecuencia de uso	Medición continua. Apto para medición perpetua en el tiempo
Otros usos	Dependiendo del equipo, puede medir otros gases con la misma tecnología
Observaciones	Requiere de un conducto en el cual medir el flujo. Puede requerir de un operador en cuanto a revisión de la data informada.
Costo equipo	224-1.092 USD

Fuente: Elaboración propia en base a (ImplementaSur, 2024)

6. Propuesta de escenarios para una Norma de Emisión de Metano en Rellenos Sanitarios

En la presente sección se proponer escenarios normativos en base a los criterios establecidos en el artículo 14 y 15 de la Ley N° 21.455 con el objeto de dar cumplimiento al numeral 3.4.5 de los términos de referencia y poder evaluar comparativamente su idoneidad regulatoria. El análisis no se centra en la descripción general del instrumento, sino en la forma concreta en que cada criterio orienta la selección, configuración y justificación del escenario normativo más adecuado.

Cada escenario se analiza verificando que cumpla con los contenidos exigidos para una norma de emisión, límite máximo, estándar de referencia, ámbito de aplicación y coherencia con otros instrumentos, y a su vez se compara a la luz de los criterios de costo-efectividad, equidad, responsabilidad e impactos sociales, ambientales y económicos.

Posteriormente, también se incorpora la evaluación del uso de certificados de reducción conforme al artículo 15, examinando su aporte al cumplimiento, sus límites y su coherencia ambiental. Así, el análisis de los escenarios no es sólo técnico, sino estructurado conforme a las exigencias legales que orientan y delimitan la determinación de la norma.

6.1 Instrumentos de gestión ambiental que afectan las emisiones de metano en los rellenos sanitarios

Para la identificación de los instrumentos de gestión ambiental que inciden en las emisiones de metano provenientes de los rellenos sanitarios, se llevó a cabo una revisión de marcos internacionales como también diversas políticas y estrategias declaradas a nivel nacional. En dicha revisión, se consideraron tanto los instrumentos actualmente vigentes como aquellos proyectados a futuro que se encuentran en etapas avanzadas de desarrollo, con el fin de asegurar certeza respecto de su implementación y de minimizar la probabilidad de cambios sustantivos en su contenido.

6.1.1 Levantamiento de instrumentos de gestión ambiental

La información de gestión ambiental y climática recopilada fue sistematizada mediante criterios de jerarquía y funciones. En este sentido, se distinguen instrumentos internacionales que dan pie a los instrumentos normativos nacionales, seguidamente de las estrategias nacionales y planes sectoriales de mitigación y adaptación.

Cada instrumento fue caracterizado a partir de un conjunto de parámetros definidos previamente, entre ellos: descripción general, autoridades responsables de la gestión, administración, y fiscalización, alcance territorial, tipo de actor al que aplica, relación con las emisiones de metano generadas en rellenos sanitarios, objetivos, metas relacionadas, entre

otros más. Esta estructura permitió la identificación de los aspectos más relevantes de cada instrumento y, posteriormente, el análisis de su vinculación con la reducción de emisiones de metano promovida por la norma en estudio. Los instrumentos son los siguientes:

Instrumentos Internacionales en el Marco del Acuerdo de París

- Compromiso climático nacional:
 - Contribución Determinada a Nivel Nacional de Chile (NDC) (Gobierno de Chile, 2020).
- Mecanismos internacionales de mercado de carbono:
 - Artículo 6 del acuerdo de París.

Marco Normativo Nacional

- Marco climático:
 - Ley N°21.455/2022, Ley Marco de Cambio Climático (MMA, 2022).
 - Decreto Supremo N°48/2024 del Ministerio de Salud, que aprueba el Plan Sectorial de Mitigación al Cambio Climático del Sector Salud (MINSAL, 2024), publicado en el Diario Oficial el 9 de enero de 2026.
 - Decreto Supremo N°12/2025, aprueba reglamento para la elaboración de normas de emisión para gases de efecto invernadero y forzantes climáticos de visa corta
- Marco normativo Impuesto Verde:
 - Ley 20.780/2014, (Ministerio de Hacienda, 2014) con su modificación con la ley 21.210/2020 (Ministerio de Hacienda, 2020).
 - Decreto Supremo 4/2023 del Ministerio del Medio Ambiente, (MMA, 2023).
- Marco normativo sector residuos:
 - Ley N°20.920/2016, que establece el Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje (MMA, 2016).
 - Decreto Supremo N°12/2021, que establece metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas de envases y embalajes (MMA, 2021).
 - Decreto Supremo N°189/2008 del MINSAL, que aprueba el Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios (MINSAL, 2008).
 - Modificación de Decreto Supremo N°189/2008 del MINSAL, que aprueba el Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios.
 - Proyecto de Ley que establece la valorización de los residuos orgánicos y regula su gestión (Boletín en tramitación en el Congreso Nacional)¹⁶.

Instrumentos Estratégicos Nacionales:

- Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile (ECLP) (Gobierno de Chile, 2021a).
- Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos (ENRO) (MMA, 2020).

¹⁶ Disponible en:

<https://www.camara.cl/legislacion/ProyectosDeLey/veto.aspx?prmlID=16745&prmbOLETIN=16182-12>

- Estrategia Nacional de Gestión de Residuos Sólidos (Gobierno de Chile, 2025).
- Hoja de Ruta para un Chile Circular al 2040 (Gobierno de Chile, 2021b).

6.1.1.1 Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile, en el marco del Acuerdo de París

Instrumento internacional asumido por Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en el cual se establecen los compromisos voluntarios que el país adopta para enfrentar el cambio climático. Su objetivo es definir y transparentar las distintas contribuciones a nivel nacional destinadas al cumplimiento del Acuerdo de París.

La NDC identifica como principales fuentes de metano en Chile el manejo de residuos sólidos y las actividades agropecuarias, es por ello que se impulsa a nivel regional la “Declaración sobre la reducción de metano y la gestión de residuos”, y se compromete a abordar este gas de manera específica.

El instrumento establece compromisos cuantitativos y regulatorios directos para emisiones de metano:

- Revertir tendencia creciente de emisiones de metano a nivel nacional y reducción un 10% de las emisiones de metano al año 2035.
- Proyecto de Ley Boletín N°16.182-12 de valorización de residuos orgánicos y fortalecimiento de la gestión de los residuos a nivel territorial.
- Desarrollo de Estrategia Nacional para prevenir pérdida y desperdicios de alimentos.
- Planificación y gobernanza para el manejo diferenciado de residuos orgánicos domiciliarios.

6.1.1.2 Artículo 6 del Acuerdo de París

En el artículo 6 del acuerdo de París se permite y promueve la cooperación internacional de esfuerzos de mitigación con acuerdo bilateral entre las partes. este artículo tiene 2 componentes que se relacionan con las emisiones de metano en los rellenos sanitarios:

- **Artículo 6.2:** permite que los países intercambien reducciones de emisiones de manera bilateral. En este esquema, un país anfitrión puede transferir unidades de reducción, denominadas Resultados de Mitigación Transferidos Internacionalmente (ITMOs, por sus siglas en inglés), a otro país, a cambio de apoyo financiero. Esto permite al país comprador avanzar en el cumplimiento de su Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC).
- **Artículo 6.4:** establece un mecanismo (Paris Agreement Crediting Mechanism) internacional que permite generar créditos de carbono a partir de actividades que reduzcan emisiones de GEI, las cuales pueden producirse por financiamiento internacional. Estas reducciones deben ser medibles, verificables y adicionales, y que puedan ser compradas por otros países para cumplir con sus contribuciones

6.1.1.3 Ley N°21.455/2022, Ley Marco de Cambio Climático

Esta ley constituye el principal y más amplio marco legislativo en materia de cambio climático del país, cuyo objetivo es enfrentar los efectos adversos de la variabilidad y el cambio climático a través de tres ejes:

- Mitigación.
- Adaptación.
- Cumplimiento de Compromisos Internacionales.

Establece metas tales como:

- Neutralidad de emisiones: en donde la meta es alcanzar y mantener la neutralidad de emisiones GEI a más tardar el año 2050.
- Presupuesto de emisiones: donde se establecen presupuestos nacionales y sectoriales de emisiones, que definen la cantidad máxima de GEI del país y de cada sector emisor.
- Seguridad hídrica: en donde se establece como meta el acceso al agua en cantidad y calidad adecuada.

La estructura de Ley impacta en la gestión de emisiones de metano; se crea el Sistema Nacional de Inventarios, en donde se busca velar por la coherencia, trazabilidad de las emisiones reportadas y asegurar la calidad de su estimación, específicamente incluye el sector de residuos, lo que obliga a contabilizar y monitorear las emisiones provenientes de la descomposición orgánica.

Asimismo, el artículo 14 de esta ley establece y regula los mecanismos para la elaboración de normas de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y/o forzantes climáticos de vida corta, con el objetivo de dar cumplimiento a la Estrategia Climática de Largo Plazo y a la NDC. Dichas normas deberán fijar límites de emisión en términos de cantidades máximas para establecimientos, fuentes individuales o agrupaciones de estas.

En la misma línea, el artículo 15 regula los certificados de reducción de emisiones, los cuales se generan a partir de proyectos que, previa verificación, acrediten reducciones efectivas de emisiones. Estos certificados se configuran como un instrumento complementario para facilitar el cumplimiento de la normativa vigente.

La autoridad encargada de la integridad de la política climática gestión es la MMA, y en conjunto con otras instituciones se da manejo y gestión a obligaciones que surgen de esta ley, como autoridades sectoriales para implementar planes sectoriales de mitigación y adaptación; El consejo de ministros para la sustentabilidad y el cambio climático, quien debe pronunciarse sobre todos los instrumentos de gestión antes de su aprobación, entre otros más. Respecto la fiscalización, la ley establece un sistema de fiscalización dual, entre la SMA para la fiscalización de cumplimiento de normas de emisión, y la contraloría general de la República, quien debe auditar el cumplimiento de los planes sectoriales.

La Ley aplica a una amplia gama de actores, sea órganos de administración del Estado (ministerios, municipios), establecimientos y fuentes emisoras que sean sujetos a las normas de emisión, gobiernos regionales, municipalidades y al sector financiero.

6.1.1.4 Decreto Supremo N°48/2024 del MINSAL, que aprueba el Plan Sectorial de Mitigación al Cambio Climático del Sector Salud

Es el instrumento que surge por orden del Art. N°8 de la Ley N°20.455 Marco de Cambio Climático, es de carácter obligatorio y establece que cada sector correspondiente a ciertos ministerios, deben realizar un plan de mitigación ante el cambio climático.

El siguiente plan organiza los esfuerzos del Ministerio de Salud con apoyo del MMA, para reducir las emisiones de GEI en las áreas bajo su competencia. Sigue los lineamientos para el cumplimiento de los presupuestos sectoriales establecidos en la ECLP, teniendo como objetivo principal cumplir con el presupuesto de emisiones designado al sector, el cual es de 51,2 MtCO₂eq para el periodo 2020-2030, y propone las siguientes medidas:

- **Medida N°1:** Valorización de residuos orgánicos (compostaje domiciliario, compostaje en establecimientos educacionales, compostaje a gran escala).
- **Medida N°2:** Instalación de sistemas de captura y valorización/quema de biogás en rellenos sanitarios preexistentes y nuevos.
- **Medida N°3:** Reciclaje de papel y cartón.
- **Medida N°4:** Reducción del desperdicio de alimentos.
- **Medida N°5:** Huella de Carbono y Programa de Eficiencia Energética en Hospitales.

Conforme a la Medida N°2 del Plan Sectorial de Mitigación (PSM) del sector Salud, el instrumento se vincula de manera directa con la reducción de emisiones de metano mediante la implementación de sistemas de captura, valorización o quema de biogás en rellenos sanitarios y sitios de disposición final de residuos sólidos domiciliarios (RSD). En este marco, la medida contempla, por una parte, la incorporación de proyectos de reducción de emisiones de metano en sitios de disposición final operativos y cerrados al momento de creación del PSM (Medida 2.4) y, por otra, la creación de un sistema de reporte de operación de rellenos sanitarios conforme al artículo 52 del DS N°189 (Medida 2.8), fortaleciendo así el monitoreo y control de las emisiones.

De forma complementaria, el instrumento también contribuye indirectamente a la disminución de emisiones a través de otras medidas del PSM (Medidas N°1, N°3 y N°4), orientadas a reducir la cantidad de residuos que llegan a disposición final, lo que incide estructuralmente en la generación de metano.

En términos de mitigación esperada, la Medida N°2 proyecta una reducción acumulada de 44.900 kt CO₂-eq para el período 2020-2050, distribuida de la siguiente manera:

- **2020-2030:** 5.650 kt CO₂eq.
- **2031-2040:** 19.250 kt CO₂eq.
- **2041-2050:** 20.000 kt CO₂eq.

Asimismo, presenta un costo de abatimiento estimado de 7,25 USD por tonelada de CO₂eq, lo que la posiciona como una medida costo-efectiva dentro del conjunto de acciones de mitigación del sector.

6.1.1.5 Decreto Supremo N°12 Aprueba reglamento para la elaboración de normas de emisión para gases de efecto invernadero y forzantes climáticos de vida corta

Este decreto es el reglamento que establece las bases para la elaboración de normas de emisión de gases de efecto invernadero y forzantes climáticos, siguiendo lo dictado en el artículo 14 de la Ley Marco de Cambio Climático y además regula lo mencionado en el artículo 15 de la misma ley sobre la cantidad máxima de certificados que pueden ser usados para dar cumplimiento a la normativa para un determinado periodo de tiempo y en relación con la generación de excedentes en el contexto del cumplimiento normativo.

6.1.1.6 Ley 20.780/2014, Ministerio de Hacienda (Impuesto Verde) con su modificación respecto la ley 21.210/2020 del Ministerio de Hacienda

El Impuesto Verde es un instrumento incorporado mediante la Ley N°20.780 (Reforma Tributaria), específicamente en su Art. N°8, el cual fue modificado por la Ley N°21.210/2020, donde se establecen las bases de su aplicación.

Corresponde a un instrumento económico que grava las emisiones de fuentes fijas, aplicándose a aquellos establecimientos cuyas emisiones, consideradas individualmente o en su conjunto, sean iguales o superiores a 100 toneladas anuales de material particulado (MP) o a 25.000 toneladas anuales de dióxido de carbono (CO₂). Este impuesto se determina para cada establecimiento y recae sobre las emisiones provenientes de procesos de combustión, ya sea total o parcial.

En la ley también se detalla que las fuentes afectas al impuesto son gravadas en función de sus emisiones de material particulado (MP), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de carbono (CO₂), siempre que dichas emisiones provengan de procesos de combustión.

Cabe señalar que, en el contexto de un relleno sanitario, si este supera las 25 mil toneladas anuales de CO₂ independientemente del tipo de combustión será sujeto al Impuesto Verde, sin embargo, una vez realizando el proceso de cálculo del impuesto, las emisiones de CO₂ de origen biogénico serán descontadas. Por otro lado también, un relleno sanitario es sujeto de agravio en el caso de superar los umbrales contando con fuentes fijas como generación de energía, motogeneradores, turbinas, calderas, y antorchas.

6.1.1.7 D.S. 4/2023, Ministerio de Medio Ambiente (Proyectos de reducción de emisiones)

Este decreto regula el sistema mediante el cual se gestionan proyectos que generan reducciones o absorciones de emisiones debidamente certificadas y validadas por entidades externas. En el marco de la Ley 20.780, que establece la tributación para fuentes emisoras fijas que cumplen ciertos umbrales de emisión, estos certificados pueden ser utilizados para compensar emisiones gravadas, permitiendo reducir o evitar total o parcialmente el pago del impuesto correspondiente. En este contexto, el D.S. 4/2023, *“Aprueba reglamento de proyectos de reducción de emisiones de contaminantes para compensar emisiones gravadas conforme a lo dispuesto en el artículo 8° de la Ley N° 20.780”*, establece los procedimientos de evaluación, verificación y certificación de dichas reducciones, habilitando su uso dentro del Sistema de Compensación de Emisiones.

Este instrumento se relaciona indirectamente con la reducción de emisiones de metano en rellenos sanitarios, debido a que el Sistema de Compensación de Emisiones del Impuesto Verde contabiliza las reducciones en términos de CO₂eq. En este contexto, los proyectos desarrollados en rellenos sanitarios que capturan y tratan el biogás pueden generar certificados de reducción de emisiones cuando evitan la liberación de metano (CH₄) a la atmósfera, considerando su alto potencial de calentamiento global. En estos casos, la reducción no se explica por la gestión del contenido de CO₂ en el biogás, el cual es de origen biogénico, sino por la captura, oxidación, destrucción o valorización energética del metano. A través de estos procesos, el CH₄ se transforma en CO₂, lo que permite disminuir el impacto climático neto expresado en CO₂eq. Por esta razón, este tipo de proyectos puede generar certificados transables o utilizables.

6.1.1.8 Ley N°20.920/2016, que establece el Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje (Ley REP)

La siguiente ley establece un marco legal para la gestión integral de los residuos y tiene como principal herramienta de acción la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), un mecanismo que responsabiliza a los productores de productos prioritarios la organización y financiamiento de la gestión de los residuos resultantes de sus productos comercializados en el país, todo esto relacionado a un porcentaje de gestión obligatoria que aumenta cada año. La autoridad responsable de la gestión es el Ministerio del Medio Ambiente y, por otra parte, la fiscalización por la Superintendencia del Medio Ambiente.

Uno de los productos prioritarios que influye a la variabilidad de emisiones de metano en rellenos sanitarios es Envases y embalajes, siendo los materiales de papel y cartón una de sus categorías. Esta ley da pie al Decreto Supremo N°12, instrumento que establece metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas de envases y embalajes, el cual se caracterizará a continuación.

6.1.1.9 D.S. N°12/MMA, que establece metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas de envases y embalajes

El Decreto N°12 es el instrumento jurídico derivado de la Ley N°20.920 que establece las metas de recolección y valorización y otras obligaciones asociadas al producto envases y embalajes. Su objetivo es prevenir la generación de estos residuos y fomentar su reutilización o valorización, buscando transitar desde la economía lineal a la economía circular, en donde desviar estos materiales reduce la carga orgánica y el volumen de los residuos en los rellenos sanitarios, por ende, la generación de metano y otros gases derivados de la descomposición y acumulación de estos.

Las metas para residuos domiciliarios y no domiciliarios son propuestas respecto el total de estos productos introducidos por ellos al mercado nacional y el cumplimiento de estas tiene una entrada en vigor diferida de 30 meses contados desde la publicación del decreto, el cual fue publicado en marzo del año 2021.

Las metas obligatorias de recolección y valorización de residuos domiciliarios de envases y embalajes, incluyendo cartones para líquidos, papeles y cartones son:

- **Papeles y cartones:** Aumento progresivo desde un 5% en el primer año hasta un 70% en el duodécimo año.
- **Cartones para líquidos:** Aumento progresivo desde un 5% en el primer año hasta un 60% en el duodécimo año.

Por otro lado, las metas obligatorias de recolección y valorización de residuos no domiciliarios de envases y embalajes, incluyendo papeles y cartones son:

- **Papeles y cartones:** Aumento progresivo desde un 48% en el primer año hasta un 85% en el noveno año.

Para lograr las metas se implementan una serie de medidas tales como:

- Sistemas de gestión en cuanto a financiamiento y recolección.
- Recolección selectiva con una meta de cubierta de un 80% de viviendas del país para el duodécimo año; instalaciones de recepción.
- Ecodiseño, en donde las tarifas son premiadas por incorporar material reciclado o material más sencillo de valorizar.

La autoridad encargada de la elaboración y administración del decreto es el MMA, y en cuanto a la fiscalización de metas a la SMA. Quienes se exceptúan a estas obligaciones son las microempresas y aquellos productores que introduzcan menos de 300 kilogramos de envases al año.

6.1.1.10 Decreto Supremo N°189/2008 del MINSAL, que aprueba el Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios

Es un cuerpo legal fundamental para la gestión de residuos en Chile, que busca establecer condiciones básicas sanitarias y de seguridad en los rellenos sanitarios. Sus principales objetivos es garantizar la seguridad, evitar posibles contingencias, tener estándares básicos en cuanto a diseño, construcción, operación y cierre. Con esto evitar filtraciones de lixiviados a napas, incendios en las celdas, daño estructural y otros. Todo proyecto de este tipo debe contar con aprobación técnica aprobado por la autoridad sanitaria, zonas de protección respecto las viviendas aledañas, aislamiento e impermeabilización, coberturas diarias, entre otras obligaciones.

El reglamento aborda el metano a través de la gestión del biogás, en donde se exige que los rellenos sanitarios con una altura mayor a 6 m cuenten con un sistema de manejo de biogás, en donde su extracción debe ser la mayor posible, debiendo contemplar la utilización de este, y si no es posible, someterlo a procesos en donde no se generen mezclas explosivas.

La autoridad encargada de la gestión y administración es el MINSAL, a través de Secretarías Regionales, y respecto a la fiscalización, esta corresponde a Secretarías Regionales Ministeriales de Salud. Este decreto aplica para toda persona natural o jurídica que desarrolle la actividad de disposición final de residuos sólidos domiciliarios, por cuenta propia o de terceros.

6.1.1.11 Modificación del Decreto Supremo N°189/2008 del MINSAL, que aprueba el Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios

La siguiente modificación del Decreto Supremo N°189, representa una transición desde un enfoque de seguridad operativa hacia uno de gestión climática y control de emisiones. Su objetivo incluye una modernización de los estándares de seguridad y salud, y modificaciones técnicas sobre el sistema de manejo del biogás, con un enfoque hacia la extracción, oxidación, control de migración.

La propuesta introduce metas y medidas tales como:

- **Eficiencia de oxidación:** exige que la valorización energética del biogás tenga una eficiencia de destrucción de metano de al menos 98%, mientras que las antorchas un 99%.
- **Sistemas de cobertura:** exige coberturas intermedias (si no dispondrán de residuos en dos meses) y provisional (al alcanzar altura final).
- **Seguridad térmica:** establece controles automáticos de oxígeno en el sistema de extracción.
- **Estabilidad geotécnica:** todo relleno, exceptuando a manuales y menores de 6 m, deben garantizar factores de seguridad.

La autoridad responsable de la administración es el MINSAL, respecto la fiscalización continúa siendo la SEREMI de Salud, sin perjuicio de las competencias que corresponden a los organismos ambientales como el SEA y SMA. El decreto modificado aplica a rellenos existentes, en la medida que exige a los sitios de disposición final que se encontraban en operación al entrar en vigencia del reglamento presentar un programa de adecuación ante la autoridad sanitaria.

6.1.1.12 Proyecto de Ley Boletín N°16.182-12 de Valorización de Residuos Orgánicos y Fortalecimiento de la Gestión de los Residuos a Nivel Territorial (Boletín en tramitación en el Congreso Nacional)

Propuesta legislativa que busca mejorar la gestión de residuos orgánicos del país, impulsando su valorización y fortaleciendo la gestión territorial de los residuos sólidos municipales. En cuanto a sus metas y obligaciones se propone:

- Separación en origen y manejo diferenciado de los residuos orgánicos por parte de la municipalidad o gobierno regional.
- Financiamiento del servicio de aseo municipal.
- Formalización de Secretarías Ejecutivas Regionales de residuos y economía circular.
- Implementación gradual.

Este instrumento tendría una relación directa en la reducción de emisiones de metano en rellenos sanitarios, pues incide directamente en el volumen de material orgánico que llegará a este. El proyecto propone modificaciones a la Ley N°20.920 (Ley REP) y está alineado a la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos (ENRO), lo cual disminuye la cantidad de metano generado reduciendo desde su origen la emisión.

6.1.1.13 Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile (ECLP)

La Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile es un instrumento de planificación climática requerido por el Acuerdo de París, que define la hoja de ruta que se debe seguir para lograr la carbono-neutralidad y la resiliencia climática a más tardar al año 2050.

En materia de metano, la ECLP dispone la reducción progresiva de este gas en los sectores emisores relevantes, principalmente energía, agricultura y residuos, mediante la implementación de políticas nacionales y sectoriales específicas. Asimismo, incorpora criterios de monitoreo, reporte y verificación (MRV) para asegurar el seguimiento y cumplimiento de las medidas adoptadas, en coherencia con la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) y los compromisos internacionales asumidos por el país.

Además, establece presupuestos nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero para períodos quinquenales, los cuales abarcan la totalidad de los GEI, incluido el metano, asegurando así la consistencia entre la planificación de largo plazo y las metas intermedias definidas en la NDC.

6.1.1.14 Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos (ENRO)

Es un instrumento vigente del Ministerio del Medio Ambiente en colaboración con la Oficina de Economía Circular publicado el año 2020, que tiene como objetivo promover y aumentar la valorización de los residuos orgánicos en origen a nivel nacional mediante la implementación de distintas tecnologías en el territorio, como lo es el compostaje y el vermicompostaje. Esta estrategia contempla las siguientes metas:

- **Meta al 2040:**
 - Valorización del 66% de residuos orgánicos.
- **Meta intermedia al 2030:**
 - Valorización del 30% de residuos orgánicos municipales.
 - 500.000 familias que utilicen composteras y/o vermicomposteras en sus viviendas.
 - 5.000 establecimientos educacionales con composteras y/o vermicomposteras.
 - 500 barrios del programa “Quiero mi Barrio” con composteras y/o vermicomposteras.
 - 50% de las instituciones públicas separen en origen y valoricen los residuos orgánicos.
 - 100% de los parques urbanos administrados por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) valoricen los residuos orgánicos, preferentemente en sus instalaciones.

Respecto a costos, se encuentran los costos operacionales, asociados a la recepción, transporte, manejo y tratamiento de los residuos. En segundo lugar, se consideran los costos de inversión o CAPEX, vinculados a la infraestructura requerida para implementar cada alternativa. Finalmente, se analizan los costos de abatimiento, que permiten comparar las opciones en función del costo necesario para reducir una tonelada de CO₂ equivalente.

Respecto a costos operacionales, la tarifa de recepción de residuos en una planta de compostaje se estima aproximadamente tres veces más alta que la de un relleno sanitario, debido a los mayores requerimientos asociados a la diferenciación, categorización y manejo de los residuos. En términos referenciales, se consideran valores cercanos a 10.000 CLP/t para disposición en relleno sanitario y 43.000 CLP/t para tratamiento en una planta de compostaje (Molina, 2020).

En relación con los costos de inversión, el CAPEX de una planta de compostaje, según rangos nacionales e internacionales, se puede asociar a un valor aproximado de \$100.000 a \$500.000 CLP por t/año de capacidad instalada de procesamiento de residuo (EO, 2025; ReFED, n.d.).

Finalmente, en cuanto a los costos de abatimiento, una investigación desarrollada en California sobre el potencial de la infraestructura de gestión de residuos orgánicos para el secuestro de carbono en pastizales, basada en un modelo de optimización geoespacial y tecnoeconómica, estimó un valor aproximado de 190.000 CLP/tCO₂e para el compostaje. Este valor considera

costos asociados a la recolección, transporte hacia valorización, procesamiento y aplicación del compost en pastizales (Hall et al., 2022).

Por otra parte, el costo de abatimiento de la captura de biogás en rellenos sanitarios suele ser menor que el de las plantas de compostaje, con rangos internacionales cercanos a 18.000 CLP/tCO₂e (EPA, n.d.). Esta diferencia se atribuye a que la captura de biogás se incorpora sobre una infraestructura de disposición final ya existente o consolidada, mientras que el compostaje requiere infraestructura especializada, recolección diferenciada, transporte adicional y un mercado o destino para los productos valorizados, como compost, humus u otros derivados.

Respecto a la vinculación del instrumento con la norma de metano, la ENRO se vincula directamente con la reducción de emisiones, ya que incide sobre la fracción orgánica que finalmente será dispuesta en rellenos sanitarios y, por ende, sobre los procesos de metanogénesis asociados. En ese sentido, la ENRO actúa como un incentivo para el cumplimiento de la norma, dado que la disminución de residuos orgánicos dispuestos en rellenos sanitarios conlleva una reducción en la generación de metano.

De esta forma, la ENRO y la nueva norma comparten un mismo objetivo, el cual es disminuir las emisiones GEI y avanzar hacia la carbono neutralidad. Si bien una implementación acelerada y altamente eficaz de la ENRO podría reducir de manera importante la disponibilidad de residuos orgánicos en rellenos sanitarios, afectando potencialmente la generación de metano, la producción de biogás y, eventualmente, la obtención de ingresos asociados a créditos de carbono, ello no implica una contradicción entre ambos instrumentos. Por el contrario, ambos instrumentos son complementarios, dado que la ENRO contribuye desde la prevención y valorización en origen, facilitando el cumplimiento de los límites de emisión establecidos por la norma.

En este marco, la implementación de la ENRO debe entenderse como un elemento que fortalece la aplicación de la norma, al incidir sobre una de sus principales variables la disponibilidad de materia orgánica en los rellenos sanitarios. Siendo un antecedente que debe ser incorporado en su evaluación y actualización periódica. Dado que la norma de emisión debe revisarse cada cinco años, los límites de emisión proyectados dentro de un conjunto de variables, entre ellas la disponibilidad de materia orgánica, podrán ajustarse en función de la evolución de la valorización de residuos orgánicos. Esto refuerza la necesidad de mantener coherencia entre ambos instrumentos y de considerar su interacción en función de dicha evolución.

6.1.1.15 Estrategia Nacional de Gestión de Residuos Sólidos

Este instrumento surge con el objetivo de promover la gestión integral de los residuos sólidos, en concordancia con los desafíos que implica el cumplimiento de la Ley REP, buscando además consolidar la gestión de residuos como una política de Estado. En lo esencial, el instrumento establece lineamientos, pautas y acciones orientadas al diseño e implementación de sistemas de gestión integral de residuos sólidos en el territorio a nivel regional. Si bien no define metas

específicas de valorización, sí fija directrices para el cumplimiento de lo dispuesto en la Ley REP y en la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos (ENRO).

6.1.1.16 Hoja de Ruta para un Chile Circular al 2040

Es un instrumento que plantea y promueve la transición del país a un modelo de economía circular, cambiando de forma profunda los modelos de producción y consumo. Se sustenta en la idea de dejar atrás el modelo lineal de extracción-producción-consumo-botar, ya que para modificar esta linealidad se plantea que desde la etapa de diseño de los productos tengan una formulación con la idea de que al ser usados entren en una economía circular en la que se aproveche durante su mayor tiempo posible y que posteriormente este producto se utilice de insumo para otros procesos productivos, y no desechado.

Esta hoja ruta plantea las siguientes metas para 2030 y para 2040:

- Generación de empleos: 100.000 y 180.000 nuevos empleos verdes, respectivamente a los años.
- Generación de residuos sólidos domiciliarios municipales por habitante: disminución del 10% y 25%, respectivamente a los años.
- Generación total de residuos por PIB: disminución del 15% y 30%, respectivamente a los años.
- Productividad material: aumento de 30% y 60%, respectivamente a los años.
- Tasa general de reciclaje: aumento 40% y 75%, respectivamente a los años.
- Tasa de reciclaje de residuos sólidos municipales: aumento del 30% y 65%, respectivamente a los años.
- Recuperación de sitios afectados por la disposición ilegal: recuperación del 50% y 90%, respectivamente a los años.

Así algunas de las metas tienen relación indirecta en la reducción de metano, ya que plantean la reducción de residuos dispuesto en los rellenos sanitarios.

6.2 Evaluación de la incorporación de la generación y uso de certificados de excedentes

Para evaluar las ventajas de incorporar el uso de certificados y/o generación de excedentes primeramente se hace una revisión y evaluación de los instrumentos que actualmente, y el futuro de norma de emisión, se inscriben en un sistema de uso de los certificados y/o generación de excedentes de emisiones, haciendo la distinción mayor de los instrumentos de mercado de carbono con alcance nacional y los instrumentos de mercado con alcance internacional.

La revisión primeramente contempla una breve descripción de los alcances de los instrumentos y luego la recopilación de información sobre el efecto de estos sistemas, en cuanto a lo económico respecto a la inversión que es capaz de movilizar estos sistemas y en cuanto a efecto

tecnológico y ambientales respecto la implementación de nuevas tecnologías limpias que reducen efectivamente los contaminantes e innova en los procesos con estas tecnologías.

6.2.1 Instrumentos de mercado con alcance nacional

6.2.1.1 Sistema de Compensación de Emisiones relacionado al Impuesto Verde

Uno de estos instrumentos de mercado de carbono con alcance nacional es el Impuesto Verde, el cual como se menciona anteriormente ingresa al sistema tributario a través del Art. N°8 de la Ley 20.780/2014, y grava anualmente las emisiones a la atmósfera de MP, NO_x, SO₂ y CO₂, producidas por establecimientos cuyas fuentes emitan ≥ 100 t/año de MP o ≥ 25.000 t/año de CO₂.

Este marco tributario cuenta con un Sistema de Compensación de Emisiones asociado al Impuesto Verde, mecanismo que permite que los establecimientos afectos al pago de este impuesto puedan compensar, parcial o totalmente, sus emisiones gravadas mediante certificados de reducción o absorción de emisiones. Estos certificados provienen de proyectos que reducen o absorben emisiones, los cuales deben cumplir criterios de adicionalidad y contar con reducciones verificadas por entidades independientes reconocidas por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA). En este contexto, el instrumento que regula los proyectos de reducción de emisiones en el marco del Impuesto Verde es el Decreto N°4/2023 del Ministerio del Medio Ambiente.

El Sistema de Compensación de Emisiones permite la participación tanto de titulares afectos al Impuesto Verde como de titulares de proyectos que no se encuentran directamente afectos a dicho impuesto. En el primer caso, los establecimientos regulados pueden utilizar certificados para compensar sus emisiones gravadas; en el segundo, los titulares no afectos pueden ingresar proyectos de reducción o absorción de emisiones al sistema, cuantificar sus reducciones bajo estándares reconocidos, como VERRA, Gold Standard u otros, y generar certificados transables en el mercado. De esta manera, el sistema establece una relación complementaria entre quienes tienen la obligación tributaria de compensar o pagar por sus emisiones y quienes desarrollan proyectos capaces de generar reducciones certificadas. Los rellenos sanitarios pueden ser afectos o no al Impuesto Verde.

Si un relleno sanitario cuenta con medidas de valorización que implican la utilización de biogás, como antorchas, motores o sistemas de generación energética, y sus fuentes emisoras superan los umbrales establecidos, este puede quedar afectado al Impuesto Verde. En dicho caso, el relleno sanitario podría participar en el Sistema de Compensación de Emisiones tanto como establecimiento regulado, utilizando certificados para compensar total o parcialmente sus emisiones gravadas, como también, eventualmente, como titular de proyectos de reducción de emisiones. Por otra parte, si el relleno sanitario no se encuentra afecto al Impuesto Verde, igualmente podría participar en el sistema como titular de un proyecto de reducción, generando

certificados asociados a la captura, destrucción o valorización del metano, los cuales pueden ser transados y utilizados por contribuyentes afectos al impuesto para compensar sus emisiones.

6.2.1.2 Sistema de compensación relativa a las normas de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y/o Forzantes Climáticos de Vida Corta (FCVC)

Las normas de emisión establecen un marco normativo y regulatorio para aquellas fuentes emisoras, establecimiento o agrupación de estas, de GEI y se mandata la creación de esta en el artículo 14 de la ley 21.455/2022. Estas normas establecen cantidades límites de emisión de GEI medido en toneladas de CO₂e y los regulados están obligados a cumplir con este límite establecido, y es la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) la encargada de fiscalizar el cumplimiento de esta norma. El reglamento para la elaboración de las normas de emisión de GEI están descritas en el decreto 12/2024 en el cual se establecen los procedimientos.

En el artículo 15 de la ley 21.455/2022 se menciona que se podrán utilizar certificados que acrediten reducción o absorción de emisiones de GEI y/ FCVC mediante la implementación de proyectos en Chile. Si bien aún se encuentra vigente el reglamento que regula este sistema de compensación, existe la obligación legal de su creación.

6.2.2 Instrumentos de mercado con alcance internacional

6.2.2.1 Sistema de mercado del Protocolo de Kyoto

En el marco regulatorio internacional, y específicamente en los instrumentos de cooperación climática entre los países, destaca el sistema de comercio de emisiones (*Emission Trading*), el cual permite la transferencia de unidades de reducción o permisos de emisión entre países como mecanismo para el cumplimiento de sus compromisos climáticos.

En este contexto, el instrumento más relevante ha sido el Mecanismo de Desarrollo Limpio (*Clean Development Mechanism*, CDM), establecido bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) como un mecanismo formal de cooperación internacional.

El MDL fue concebido como un mecanismo de acreditación de reducción que permite a los países implementar proyectos de reducción o captura de emisiones de gases de efecto invernadero, certificar dichas reducciones ante la entidad internacional (Climate Change, United Nation) y generar créditos transferibles. Estos créditos pueden ser adquiridos por otros países para contribuir al cumplimiento de sus compromisos internacionales de mitigación, promoviendo al mismo tiempo la transferencia de tecnología y el desarrollo sostenible en los países anfitriones de los proyectos. Este mecanismo ya cumplido su segundo periodo de compromiso hasta el 2020, los proyectos ya no se inscriben en este sistema ahora pasan a ser acreditados por el PACM, y a la vez se hace una transferencia en transición de proyectos del MDL a este sistema del acuerdo de París.

6.2.2.2 Sistema de mercado de carbono del Acuerdo de París

En el acuerdo de París, específicamente en el artículo 6 se establece un mecanismo de cooperación internacional y desbloquear el apoyo financiero a los países en desarrollo.

En este marco de Acuerdo de París, específicamente en el artículo 6.2, el cual establece un marco de cooperación internacional que sienta las bases para el uso de Resultados de Mitigación Transferidos Internacionalmente (ITMOs en inglés) con el objetivo principal de la cooperación entre los países para dar cumplimiento de sus correspondientes compromisos en las NDC, es decir, es un mecanismo que permite que los países parte del Acuerdo de París voluntariamente cooperan formulando un flujo financiero destinado al financiamiento de proyectos de mitigación (MMA).

En el artículo 6.4 se desarrolla el Mecanismo de Acreditación del Acuerdo de París (PACM en inglés), que busca dar continuidad y actualizar los instrumentos de transferencia internacional de reducciones de emisiones bajo una nueva arquitectura climática, con el objetivo de que los países den cumplimiento a sus Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (NDC en inglés). Incluso como se menciona con anterioridad los proyectos del MDL están en transición a este sistema.

6.2.3 Análisis sobre el uso de alternativas de certificación de reducciones

Al revisar la experiencia del Sistema de Compensación de Emisiones asociadas al Impuesto Verde, se observa que, si bien este mecanismo se encuentra vigente desde 2023, ya ha presentado resultados relevantes en términos de reducción y compensación de emisiones.

Durante su primer año de funcionamiento, se compensaron aproximadamente 260.000 tCO₂, mientras que en 2024 se evidenció un aumento significativo y alentador, alcanzando 4,4 MtCO₂ compensadas. Asimismo, el sistema registró una recaudación superior a 22 millones de dólares, recursos que serán redirigidos al financiamiento de acciones climáticas, de acuerdo con el balance informado por el Ministerio del Medio Ambiente y la Superintendencia del Medio Ambiente¹⁷. Esto ha posibilitado la acreditación de reducción de emisiones de la implementación y certificación de 10 proyectos de 8 empresas distintas, englobados principalmente en el sector de residuos con 2 proyectos relacionado los que abarcan el 62,83% de los certificados generados (2.800.111 de certificados) y el energético con 8 proyectos relacionados al sector generando el restante 37.17% (1.656.678 certificados). Como se puede observar el sector residuos tiene una alta capacidad de generación de créditos considerando que los certificados se miden en CO₂e y cercano al 50% del biogás contiene metano con un potencial de calentamiento global a 100 años del orden de 28.

¹⁷ Noticia oficial disponible en: <https://portal.sma.gob.cl/index.php/sistema-de-compensacion-de-emisiones-reduce-44-millones-de-toneladas-de-co2/>

Además, según el portal oficial de compensaciones¹⁸, se menciona que el actual Impuesto Verde podría movilizar en torno a US\$ 100 millones anuales, canalizando recursos hacia acciones de mitigación dentro del país y renovando la industria nacional implementando tecnologías con beneficio ambiental.

Ahora considerando el comercio de emisiones a nivel global, según el banco mundial los sistemas de comercio de emisiones con alcance nacional han aumentado un 25% en el periodo 2019-2020 pasando de 391 - 488 MtCO₂e acreditación de reducciones (Banco Mundial).

En cuanto al mecanismo de MDL, este registró hasta el 2020 un total de 7.826 proyectos de reducción de emisiones y ha generado hasta la fecha un total cercano a 2,4 mil millones de certificados (2,4 tCO₂e)¹⁹. Si bien este mecanismo ha perdido relevancia en cuanto a cantidad de proyectos registrados en los últimos años (Bortoletto et al. (2023)), ha logrado en 2020 un volumen de 7,3 MtCO₂e en acreditación de reducción, obteniendo un aumento del 3% a nivel global en relación al año 2019 (Banco Mundial).

En los últimos años, esta modalidad ha adquirido una relevancia significativa en el mercado global, registrando un incremento cercano al 30% en los créditos transados, pasando de 616 a 803 MtCO₂e acreditados en reducciones durante el período 2019-2020 (Banco Mundial).

En cuanto a los instrumentos del artículo 6 del acuerdo de París se observa que está en sus comienzos, ya que la totalidad de proyectos registrados por el artículo 6 (18 registrados) son proveniente de sistema MDL, de la totalidad de un cercano de 1.500 proyectos con requerimiento de registro. Sin embargo, hay 1.120 proyectos propuestos nuevos para registrarse directamente por el PACM hasta la fecha. Actualmente hay 42 solicitudes de transición del MDL al PACM y 17 proyectos nuevos para ser registrados directamente por el PACM, todo relacionado a Chile.

Asimismo, instrumentos como los ITMOs pueden articularse de manera coherente con proyectos de mitigación derivados de instrumentos regulatorios sectoriales o planes de mitigación nacionales. Esta integración permite que reducciones generadas en el marco de políticas públicas internas puedan proyectarse hacia mecanismos internacionales de cooperación climática, fortaleciendo su viabilidad financiera y ampliando su impacto.

Por último, la modalidad de mecanismos independientes ha experimentado una expansión significativa en sectores industriales que no se encuentran sujetos a obligaciones regulatorias directas. Su relevancia radica precisamente en que amplía el perímetro de la acción climática, incorporando a actores no regulados a la dinámica de mitigación y extendiendo los esfuerzos de reducción más allá del ámbito estrictamente normativo.

¹⁸ Portal oficial de compensaciones del MMA disponible en: <https://portalcompensaciones.mma.gob.cl/preguntas-frecuentes/>

¹⁹ Obtenido desde: <https://cdm.unfccc.int/>

Por otro lado, retomando lo señalado anteriormente, los rellenos sanitarios pueden vincularse tanto con el Impuesto Verde como con el Sistema de Compensación de Emisiones, dependiendo de sus características operacionales y de las fuentes emisoras que posean. Esta situación se relaciona con la marcada diferencia de tamaño y capacidad tecnológica existente entre los rellenos sanitarios del país. Actualmente, en base a los antecedentes recopilados por la consultoría (considerando los 40 rellenos sanitarios a nivel nacional) cuatro rellenos clasificados en la categoría de grandes extraen activamente biogás, y solo tres valorizan energéticamente, mientras que el resto de los rellenos solo ventila el biogás. De lo anterior, solo dos rellenos generan certificados de reducción y los transan en el mercado de carbono nacional. Como se mencionó anteriormente, estos dos rellenos sanitarios (Loma Los Colorados y Santa Marta) generaron el 62,83% de la totalidad de certificados en el año 2024, por lo que si el sistema de compensación se instala solo para el sector residuos, habría una competencia muy desigual y estos dos rellenos sanitarios (u otro dentro de estos grandes) serían los que manejen toda la venta de certificados. Sería una competencia más equilibrada si se genera un comercio combinado con las distintas normas de GEI.

Por toda la revisión de la experiencia a recopilada de los distintos instrumentos revisados, se observan 3 ventajas principalmente:

- La movilización de dinero en el sistema respecto a la compra y venta de certificados
- El fomento de uso de tecnologías limpias
- Reducción efectiva de emisiones

6.3 Evaluación de la forma de aplicación de la norma y posibles agrupaciones

Para analizar los diferentes mecanismos de aplicación de la futura norma, el Equipo Consultor consideró como referencia los antecedentes generados durante las actividades anteriores y las experiencias internacionales recopiladas mediante entrevistas a representantes de los Ministerios del Medio Ambiente del Gobierno Federal de Canadá, del Gobierno de Nueva Zelanda y de Australia. En base a esto, se identificaron las características útiles para generar conjuntos y subconjuntos de rellenos sanitarios. Las agrupaciones posibles, en base a los datos disponibles de la caracterización de los rellenos sanitarios, son presentados en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1 Agrupaciones posibles de rellenos sanitarios

Agrupación/categorización	Etiquetas
Zona climática	Desértica / Templado seco / Templado lluvioso
Nivel de actividad	Pequeño / Mediano / Grande
Macrozona territorial	Norte Grande / Norte Chico / Centro / Sur / Austral
Contribución de emisiones	20% que concentra el 80% de las emisiones (Ley de Pareto)
Sistema de manejo de biogás	Activo / Pasivo
Estado del sitio	Operativo / Cerrado

Fuente: Elaboración propia

Considerando que la generación de metano depende, en primer lugar, de la masa de residuos acumulada en el sitio (sin obviar, por supuesto, la dependencia en el tipo de residuos dispuesto y su contenido de carbono orgánico descomponible), en segundo lugar, de la precipitación anual que recibe un relleno sanitario (que configura las condiciones de humedad de los residuos) y, por último, de la captura de biogás de la infraestructura inherente de proyectos existentes y futuros, el Equipo Consultor determinó, de mutuo acuerdo con la Contraparte Técnica, evaluar la aplicabilidad de la norma bajo 3 esquemas:

- Por establecimiento, sin agrupaciones.
- Por nivel de actividad, resultando 3 agrupaciones posibles.
- Por nivel de actividad y zona climática, resultando 9 agrupaciones posibles.

Los establecimientos considerados en el primer esquema corresponden únicamente a los rellenos identificados, debido a que el alcance de la norma excluye a normar basurales y vertederos. Además, es posible incluir aquellos sitios futuros, los cuales comienzan a recibir los residuos de aquellos rellenos que finalizan su vida útil.

Los niveles de actividad, para el segundo y tercer esquema, se definen desde la información recopilada en la Hoja de Ruta de Instrumentos de Precio y Mercados de Carbono 2025 (MMA, 2025), en el cual se clasifican los rellenos sanitarios según el volumen de toneladas de residuos recibidas, tal como se presenta en la Tabla 6-2. Luego, con la información recopilada desde el Diagnóstico y Catastro Nacional de Residuos Sólidos Domiciliarios (SUBDERE, 2024) se obtiene la cantidad de residuos recibidos en 2023 en cada sitio, para así relacionar cada sitio con una clasificación según su tamaño.

Tabla 6-2 Clasificación de rellenos sanitarios según volumen de residuos recibidas

Tamaño	Umbral (miles de ton RSD)	Participación RSD a nivel nacional	Participación en emisiones CH ₄
Grande	Mayor a 350	58%	64%
Mediano	Entre 120 y 350	35%	27%
Pequeño	Menor a 120	7%	9%

Fuente: Elaboración propia en base a (MMA, 2025)

La zona climática, del tercer esquema, se define mediante la información de las regiones en que se ubican los rellenos, tal como se muestra en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3 Zona territorial y climática por región

Región Sitio	Zona Territorial	Macrozona	Zona Climática
Arica y Parinacota	Norte	Norte Grande	Desértico árido
Tarapacá	Norte	Norte Grande	Desértico árido
Antofagasta	Norte	Norte Grande	Desértico árido
Atacama	Norte	Norte Chico	Semiárido
Coquimbo	Norte	Norte Chico	Semiárido
Valparaíso	Central	Central	Mediterráneo
Metropolitana	Central	Central	Mediterráneo
Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	Central	Central	Mediterráneo
Maule	Central	Central	Mediterráneo
Ñuble	Central	Central	Mediterráneo
Biobío	Central	Central	Mediterráneo
Araucanía	Sur	Sur	Templado oceánico
Los Ríos	Sur	Sur	Templado oceánico
Los Lagos	Sur	Sur	Templado oceánico
Aysén del Gral. Carlos Ibáñez del Campo	Sur	Austral	Frio oceánico
Magallanes y de la Antártica Chilena	Sur	Austral	Frio oceánico

 Fuente: Elaboración propia en base a Regiones de Chile²⁰

Con el fin de evaluar la pertinencia regulatoria de cada esquema propuesto, se analizan las ventajas, limitaciones e implicancias ambientales, operativas y administrativas asociadas a cada alternativa.

6.3.1 Esquema 1: Aplicación por establecimiento (sin agrupaciones)

Este esquema implica que cada relleno sanitario constituya una fuente regulada de manera individual, con exigencias definidas caso a caso.

Ventajas

- Permite una regulación focalizada ajustada a las características específicas de cada sitio, tales como la cantidad de residuos dispuestos, operación, condiciones climáticas locales, entre otros.
- Facilita la priorización de aquellos sitios que contribuyan mayormente a las emisiones, compatible con un enfoque individual en que se priorizan aquel subconjunto reducido de rellenos que concentran la mayor cantidad de las emisiones.
- Esquema recomendable cuando el objetivo es maximizar la reducción de emisiones en el corto plazo, especialmente cuando un grupo reducido de sitios podría concentrar las emisiones.

Limitaciones

- Mayor complejidad administrativa y regulatoria, al requerir MRV y fiscalización por sitio específico.

²⁰ Información obtenida desde <https://regioneschile.com/>.

- Puede generar asimetrías regulatorias entre sitios de características similares.
- Requiere mayor disponibilidad y calidad de información individual, considerando que los antecedentes técnicos generados se fundamentan en varios supuestos para llevar la información a nivel de sitio específico.
- Esquema podría implicar mayores costos regulatorios y de fiscalización ante la alta individualización.

6.3.2 Esquema 2: Aplicación por categorización del nivel de actividad

Este esquema implica que los rellenos se agrupan según la cantidad anual de residuos recibidos (Grande, Mediano, Pequeño), en base a la clasificación definida en la Tabla 6-2. Además, se observa que los rellenos grandes concentran el 58% de los residuos sólidos domiciliarios (RSD) a nivel nacional, existiendo una relación directa entre el tamaño y la generación de metano.

Ventajas

- Simplifica el diseño operativo al agrupar aquellos sitios similares en cuanto a residuos.
- Permite aplicar exigencias diferenciadas según la capacidad operativa y el potencial de emisiones.
- Esquema recomendable cuando el objetivo es equilibrar la simplicidad regulatoria y la efectividad ambiental, siendo consistente con el principio de gradualidad, en que se establecen exigencias más estrictas para rellenos grandes y progresivas para medianos.

Limitaciones

- No incorpora explícitamente las variables climáticas, como la precipitación y la temperatura, que influyen significativamente en la generación de metano.
- Puede subestimar las emisiones en rellenos ubicados en zonas de alta precipitación al existir una mayor cantidad de sitios en zonas de baja precipitación.
- Puede incluir indiscriminadamente rellenos sanitarios muy pequeños, de titularidad municipal, que contribuyan marginalmente a las emisiones de la agrupación.

6.3.3 Esquema 3: Aplicación por categorización del nivel de actividad y zona climática

Este esquema incorpora tanto la cantidad de residuos dispuestos como las condiciones climáticas regionales, siendo ambas variables que influyen en la tasa de degradación anaeróbica y generación de biogás. En Chile existe una variabilidad climática significativa, desde zonas desérticas en el norte hasta climas templados oceánicos y fríos en el sur, lo que afecta el potencial de generación del biogás a lo largo del país.

Ventajas

- Mayor coherencia ambiental y técnica, es decir, consistencia entre las exigencias regulatorias y el comportamiento real de generación de emisiones, considerando las condiciones operacionales y climáticas de cada sitio.

- Permite ajustar las exigencias considerando un potencial más real de generación de metano, al incluir variables que significativamente afecten su generación.
- Reduce el riesgo de sobrerregular sitios en zonas áridas donde la generación es más lenta.
- Esquema más robusto desde el punto de vista técnico-ambiental, ya que reconoce los factores determinantes de la generación de metano, es decir, aquellas variables que influyen directamente en la descomposición anaeróbica de los residuos, tales como humedad, temperatura, composición de residuos y operación del sitio.

Limitaciones

- Mayor complejidad normativa.
- Requiere más capacidad técnica de modelación y seguimiento.
- Esquema requiere mayor esfuerzo institucional y sistemas de información más robustos.

6.4 Propuesta y justificación de escenarios para la futura Norma de Emisión de Metano en Rellenos Sanitarios

6.4.1 Identificación del gas de efecto invernadero y forzante climático a normar

El biogás de los rellenos sanitarios está compuesto, aproximadamente, en un 50% por metano (CH_4), casi un 50% de dióxido de carbono (CO_2) biogénico y pequeñas fracciones de compuestos orgánicos no-metánicos. Dado el elevado potencial de calentamiento global del primero (28 veces aquel del dióxido de carbono en un período de 100 años)²¹, **el gas de efecto invernadero a normar es el metano (CH_4)**.

6.4.2 Descripción de fuentes emisoras

Las fuentes de emisión corresponden a los rellenos sanitarios, particularmente su superficie de disposición de residuos, resultando en emisiones difusas de metano a la atmósfera. En particular, esto considera el frente de trabajo, la infraestructura y secciones que presentan un flujo de biogás (tales como pozos de extracción, cañerías, tuberías, la cobertura diaria, cobertura final, celdas asentadas, bombas, codos, uniones, entre otras), además de ventilaciones o zonas de fuga generadas tanto por la operación normal del relleno sanitario, como también por mantenimiento o eventuales dinámicas operativas no deseadas.

En el caso de los rellenos sanitarios que cuenten con sistemas activos de manejo de biogás y canalicen su volumen hacia sistemas de valorización energética (como turbinas a gas, por ejemplo) o de destrucción del metano (como antorchas), se identifican además emisiones residuales provenientes de la combustión imperfecta del biogás en chimeneas (ductos de escape

²¹ *Basic Information about Landfill Gas*, US EPA. (2025). Disponible en: <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>

del gas post combustión), las cuales podrían identificarse como fuentes puntuales dentro del contexto de un relleno sanitario, el cual, como un todo, corresponde a una fuente difusa.

6.4.3 Ámbito territorial y periodo de aplicación de la norma

- **Ámbito territorial:**

La norma de emisión se aplicará a todo el territorio nacional, sin perjuicio de que se puedan realizar agrupaciones de las fuentes emisoras que segreguen posteriormente en zonas con el fin de garantizar eficiencia normativa y condiciones justas para los futuros regulados.

- **Período de aplicación:**

Dado que el 31 de diciembre de 2025 se publicó en el diario oficial la Resolución Exenta 9.633, dando inicio al proceso de elaboración de la futura norma de emisión de metano, el cual tiene un plazo máximo de 18 meses de duración, de acuerdo con el Art. 14 de la Ley N°21.455, se asume y considera como supuesto de implementación de la norma que esta será publicada durante el año 2028 y que, otorgando un plazo de adecuamiento a los futuros regulados de 2 años, entonces la entrada en vigencia del esquema normativo será el año 2030.

6.4.4 Metodología para determinar los límites de emisión

Se describe el marco metodológico empleado para diseñar los escenarios de límites de emisión de metano en el sector de rellenos sanitarios de Chile. El objetivo central es definir, para cada uno de los 40 rellenos sanitarios activos considerados en el análisis, cuántas emisiones de GEI se le asigna como límite máximo permitido en dos horizontes temporales clave: el año 2030 y 2050.

Estos límites son consistentes con el presupuesto de emisiones sectoriales y con el compromiso de carbono neutralidad del país al 2050 establecido en la Ley Marco de Cambio Climático. El cumplimiento de la carbono neutralidad para el sector residuos, particularmente por parte de los rellenos sanitarios, considera el compromiso de Chile de reducir al año 2050 el 50% de sus emisiones. La Figura 6-1 presenta los escenarios de proyección y evaluación para el sector residuos por parte de la SNP, utilizando información provista por la Contraparte Técnica, considerando además las proyecciones de emisiones en caso de implementarse la estrategia de “Gran Compostaje” exitosamente como una referencia respecto a las exigencias de la norma de emisión.

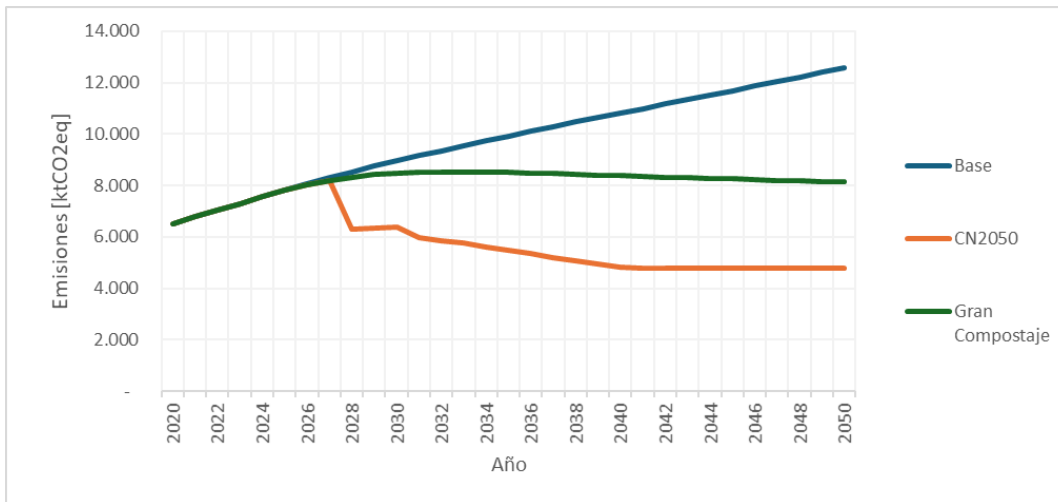


Figura 6-1 Escenarios de proyección y evaluación para el sector residuos

Fuente: Enviado por la Contraparte Técnica

Con lo anterior, la restricción sectorial de referencia establece que las emisiones totales del sector rellenos sanitarios no pueden superar el escenario “CN2050” de la Figura 6-1, es decir:

$$EA_{2050} = 4,8 \text{ MtonCO}_2e = 4.800 \text{ ktCO}_2e$$

$$EA_{2030} = 6,4 \text{ MtonCO}_2e = 6.400 \text{ ktCO}_2e$$

Para estructurar el análisis, se definen tres dimensiones de escenarios que se combinan entre sí:

- **Escenarios Distributivos (ED):** Definen cómo se reparte la emisión permitida entre rellenos.
- **Escenarios Temporales (ET):** Definen el perfil temporal del límite de emisión que deben cumplir los rellenos.
- **Escenarios de Umbral de Excedencia (EM):** Definen las condiciones de flexibilidad y compensación entre fuentes.

6.4.4.1 Marco Conceptual: Emisión Asignada (EA_t)

La variable central del análisis es la Emisión Asignada (EA), definida para cada relleno i como el límite máximo de emisiones de metano (expresado en $\text{ktCO}_2e/\text{año}$) que le corresponde en un horizonte temporal dado. En la Tabla 6-4 se presentan definiciones útiles para la comprensión de los escenarios.

Tabla 6-4 Definición de variables para el cálculo de la emisión asignada y la reducción requerida

Símbolo	Definición
EA_{2050} o EA_{2030}	Emisión asignada al relleno i al horizonte de referencia (2050 o 2030). Es el límite máximo fijado en la norma para ese año
$EA(t_i)$	Emisión asignada al relleno i en el año t . Es el límite máximo de emisiones exigido en cada año del período de vigencia de la norma (2030-2050). Su perfil en el tiempo depende del Escenario Temporal (ET) seleccionado
$BAU(t_i)$	Emisiones en escenario de referencia (<i>Business As Usual</i>) del relleno i en el año t , proyectadas mediante el modelo FOD de IPCC
$ER(t_i) = EE(t_i) - EA(t_i)$	Reducción de emisiones requerida: diferencia entre la emisión proyectada $EE(t)$, que corresponde al BAU vigente en el año t , y la emisión asignada $EA(t)$

Fuente: Elaboración propia

Mientras que la Figura 6-2 ilustra este marco conceptual, a partir de los datos históricos de emisiones (E_{2020} , E_{2025}) se proyecta la trayectoria BAU de emisiones, y la norma define el límite $EA(t_i)$ que cada relleno debe respetar en cada año del período de vigencia. La diferencia entre la emisión proyectada $EE(t_i)$ y el límite $EA(t_i)$ corresponde a la reducción de emisiones exigida $ER(t_i)$.

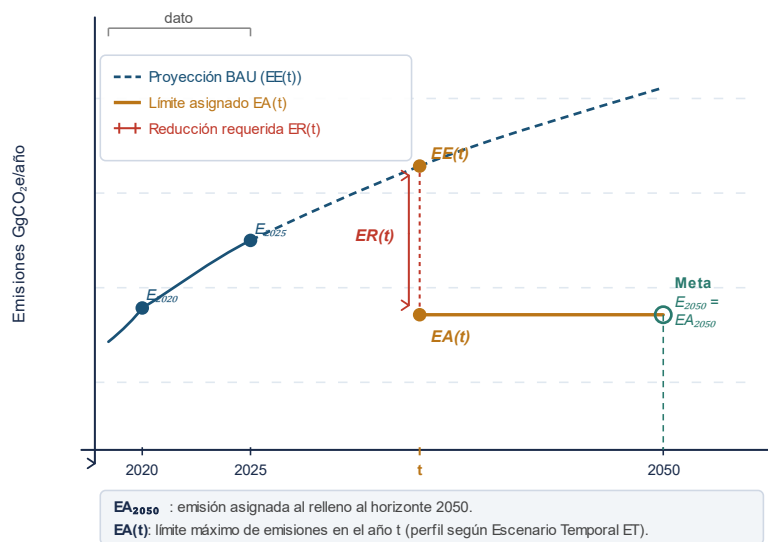


Figura 6-2 Representación conceptual de emisiones asignadas en el tiempo

Fuente: Elaboración propia

6.4.4.2 Escenarios Distributivos (ED)

Los **Escenarios Distributivos** definen la variable de decisión principal del análisis, cuánta emisión se le asigna a cada relleno sanitario " i " al horizonte de referencia. Formalmente, se busca determinar el vector de límites EA_i para $i = 1, \dots, 40$, tal que:

Ecuación 6-1 Restricción de asignación sectorial de emisiones

$$\sum_i EA_i = EA \leq EA_{sector}$$

donde EA_{sector} es el límite total sectorial (4.800 ktCO₂e al 2050 y 6.400 ktCO₂e al 2030, según la información enviada por SNP y explicada al inicio de la Sección 6.4.4). Se evalúan tres criterios de distribución, inspirados en los principios de equidad, eficiencia económica y viabilidad técnica. Además, cabe destacar que los porcentajes de BAU son mayores inicialmente dado que indica la proporción de las emisiones que se permite emitir.

A continuación, se presentan resúmenes de los tres escenarios distributivos propuestos (Tabla 6-5 a Tabla 6-7):

- E1: Reducción proporcional uniforme.
- E2: Diferenciado por Tamaño del Relleno.
- E3: Diferenciado por Zona Climática y Tamaño del Relleno.

Tabla 6-5 ED1: Reducción Proporcional Uniforme

Principio	Igualdad de esfuerzo relativo. Todos los rellenos reducen la misma fracción de sus emisiones BAU
Factor	Factor uniforme = $EA_{sector} / \sum BAU_i$. Mismo porcentaje de reducción para todos, independientemente del tamaño, zona o capacidad técnica
Factor 2050	37% del BAU 2050 (= 4.800 ÷ 12.944 ktCO ₂ e)
Factor 2030	70% del BAU 2030 (= 6.400 ÷ 9.116 ktCO ₂ e)
Resultado	Emisiones sectoriales = 4.800 ktCO ₂ e al 2050 y 6.400 ktCO ₂ e al 2030 (exactamente iguales a las metas)
Ventajas	Sencillo de implementar y fiscalizar. Fácil de comunicar. Trato igualitario en términos relativos
Desventajas	Exige el mismo esfuerzo relativo a rellenos pequeños con menos recursos. No reconoce economías de escala ni diferencias de generación por zona climática

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-6 ED2: Diferenciado por Tamaño del Relleno

Principio	Mayor esfuerzo a quienes más emiten y tienen mayor capacidad técnica y financiera. El factor de reducción varía según la categoría de tamaño (Grande, Mediano, Pequeño)
Factor 2050	Grande = 23% del BAU · Mediano = 47% del BAU · Pequeño = 84% del BAU
Factor 2030	Grande = 58% del BAU · Mediano = 85% del BAU · Pequeño = 100% (sin obligación de reducir aún)
Resultado	~4.796 ktCO ₂ e al 2050 (≈ meta). ~6.408 ktCO ₂ e al 2030 (≈ meta). En 2030, solo los rellenos Grandes deben reducir
Ventajas	Reconoce diferencias de escala y capacidad de inversión. Permite postergar exigencias a rellenos pequeños
Desventajas	No distingue diferencias dentro de los Grandes (por ejemplo, mega-rellenos RM vs. otros). No incorpora zona climática

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-7 ED3: Diferenciado por Zona Climática y Tamaño del Relleno

Principio	Combina dos variables físicas que determinan la generación de metano en el modelo IPCC FOD (First Order Decay): (a) masa de residuos dispuesta (tamaño), y (b) tasa de descomposición orgánica k , que refleja la precipitación anual de la zona. A mayor k y mayor tamaño, mayor generación de metano por tonelada → mayor exigencia
Zona seca ($k=0.06/\text{año}$)	Norte Grande (Arica, Tarapacá, Antofagasta), Norte Chico (Atacama, Coquimbo), Central (Valparaíso, RM, O'Higgins, Maule, Ñuble, Biobío)
Zona húmeda ($k=0.185/\text{año}$)	Sur (Araucanía, Los Ríos, Los Lagos) y Austral (Aysén, Magallanes)
Factores 2050	RM=21% · G-húm=25% · G-sec=30% · M-húm=43% · M-sec=56% · P-húm=75% · P-sec=90% del BAU
Factores 2030	RM=50% · G-húm=60% · G-sec=70% · M-húm=94% · M-sec=100% · P=100% del BAU
Resultado	~4.794 ktCO ₂ e al 2050 (≈ meta). ~6.425 ktCO ₂ e al 2030 (≈ meta). 7 categorías diferenciadas al 2050
Ventajas	Mayor fundamento técnico-científico: vincula el estándar con los parámetros físicos que determinan la generación de metano
Desventajas	Mayor complejidad (7 subgrupos). Requiere acreditar la zona climática de cada relleno

Fuente: Elaboración propia

6.4.4.3 Escenarios Temporales (ET)

Para cada uno de los tres Escenarios Distributivos, se evalúan tres **Escenarios Temporales** que definen el perfil de la Emisión Asignada $EA(t_i)$ a lo largo del período de vigencia de la norma (2030-2050). Los escenarios temporales responden a la pregunta: ¿Cómo evoluciona el límite máximo de emisiones que debe cumplir cada relleno en cada año?

Para ET2 y ET3 se considera un límite intermedio al 2030, derivado de la trayectoria de reducción necesaria para alcanzar el carbono neutralidad al 2050, que fija un techo sectorial de 6.400 ktCO₂e para ese horizonte. Mientras que la Figura 6-3 ilustra esquemáticamente los tres perfiles temporales de $EA(t_i)$ para un relleno genérico.

Tabla 6-8 Evolución temporal de la emisión asignada $EA(t)$ según escenario temporal

Escenario	Nombre	Perfil temporal $EA(t)$	Interpretación regulatoria
ET1	Límite fijo	$EA(t) = EA_{2050}$ para todo $t \in [2030, 2050]$	El estándar exigido al 2050 rige desde la entrada en vigor de la norma. Sin gradualidad
ET2	Dos niveles escalonados	$EA(t_1=2030)$ vigente 2030-2040; EA_{2050} vigente 2040-2050	Norma en dos tramos: nivel intermedio más exigente al 2030, nivel final al 2050. Permite planificar inversiones en dos etapas
ET3	Trayectoria lineal decreciente	$EA(t)$ varía linealmente desde $EA(2030)$ hasta $EA(2050)$, año a año	El límite se reduce progresivamente cada año. Máxima gradualidad y señal continua de reducción

Fuente: Elaboración propia

Definición conceptual de los Escenarios Temporales (ET)

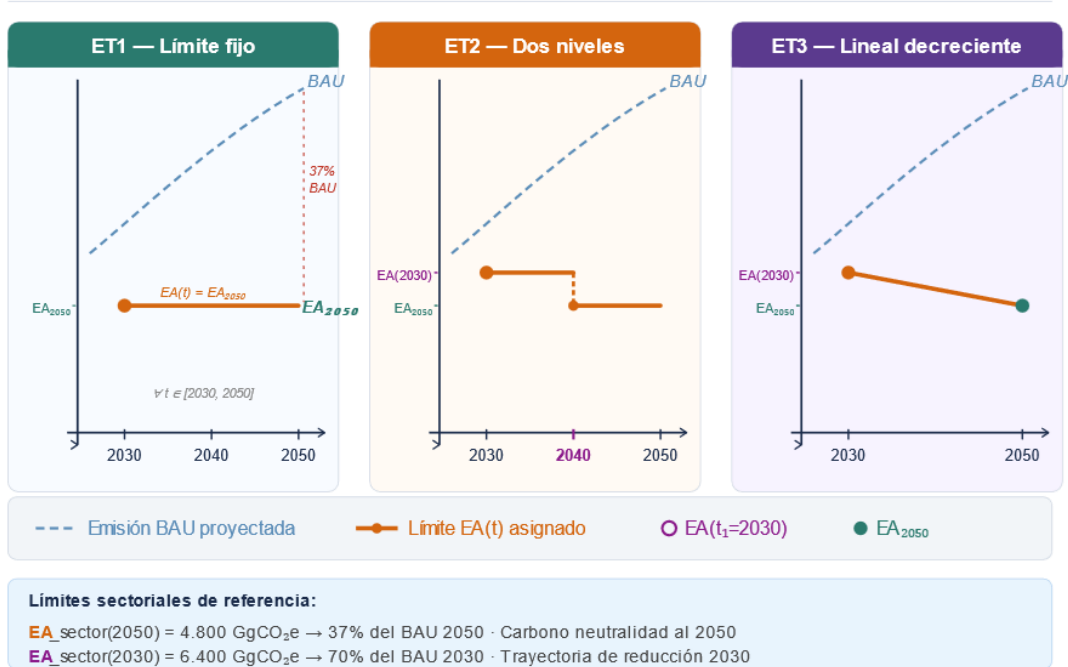


Figura 6-3 Definición conceptual de los Escenarios Temporales (ET1, ET2, ET3)

Fuente: Elaboración propia

- **ET1: Límite fijo**

El límite de emisión asignado para el horizonte de largo plazo (EA_{2050}) se mantiene constante durante todo el período de vigencia de la norma:

$$EA(t_i) = EA_{2050} \quad \forall t \in [2030, 2050]$$

Este escenario implica que, desde la entrada en vigor de la norma, cada relleno debe cumplir directamente con el estándar más exigente. No existe gradualidad temporal; el incentivo para reducir es máximo desde el primer año.

- **ET2: Dos Niveles Escalonados**

Se establecen dos tramos de exigencia dentro del período de vigencia:

- **Primer tramo (2030-2040):** Se exige el límite intermedio $EA(t_1 = 2030)$, derivado del presupuesto sectorial de emisiones para ese año (objetivo 6.400 ktCO₂e sectoriales al 2030).
- **Segundo tramo (2040-2050):** Se exige el límite de largo plazo EA_{2025} , más estricto, coherente con la meta de carbono neutralidad al 2050.

$$EA(t_i) = EA(t_i = 2030) \text{ para } t \in [2030, 2040]; EA(t_i) = EA_{2050} \text{ para } t \in [2040, 2050]$$

Este enfoque permite a los operadores planificar sus inversiones en dos etapas diferenciadas: una primera adaptación al estándar 2030 y una segunda inversión para alcanzar el estándar definitivo 2050.

- **ET3: Trayectoria Lineal Decreciente**

El límite de emisión disminuye linealmente año a año entre el valor intermedio al 2030 y el valor final al 2050:

$$EA(t_i) = EA(2030) - [(EA)]$$

$$EA(t_i) = EA(2030) - [(EA_{2030} - EA_{2050}) * (t - 2030) / (2050 - 2030)]$$

Este escenario provee la señal regulatoria más continua y predecible: el límite se reduce cada año en la misma cantidad, entregando incentivos permanentes para la implementación progresiva de medidas de captura y valoración del biogás. Es el escenario de mayor gradualidad y más compatible con la planificación financiera de largo plazo de los operadores.

6.4.4.4 Escenarios de umbral de excedencia (EM)

Una vez definidos los límites de emisión $EA(t_i)$, es necesario establecer las condiciones bajo las cuales un relleno puede exceder su límite asignado y, en ese caso, si existe un mecanismo de compensación con otros operadores. A esto se le denomina Umbral de Excedencia del Límite de Emisión Asignado (EM). Se evalúan dos alternativas, tal como se presenta en la Tabla 6-9:

Tabla 6-9 Escenarios Umbral de Excedencias

Escenario	Nombre	Umbral de excedencia (EM)	Mecanismo de flexibilidad
EM1	Estándar puro	Umbral = 0. No se tolera ninguna excedencia del límite asignado	Sin mecanismo de flexibilidad. Cada relleno debe cumplir su $EA(t)$ en forma estricta
EM2	Flexible	Umbral de excedencia = requisito de mitigación del relleno ($EA(t) - BAU(t)$)	Los rellenos que exceden su límite pueden compensar adquiriendo créditos de carbono de rellenos que reducen por debajo de su límite asignado

Fuente: Elaboración propia

En EM1 (Estándar Puro), el incumplimiento del límite $EA(t)$ está sujeto directamente a sanciones regulatorias, sin posibilidad de compensación. En EM2 (Flexible), los rellenos con emisiones por debajo de su límite asignado generan créditos de carbono que pueden ser adquiridos por rellenos que excedan su cuota, siempre que el total sectorial no supere el cap agregado definido por el ED y ET seleccionados.

6.4.4.5 Síntesis del Marco Metodológico

El marco metodológico diseñado permite evaluar de forma sistemática y transparente las implicancias regulatorias de cada combinación de decisiones normativas. Sus características centrales son:

- Anclaje a presupuestos sectoriales: Todos los escenarios son consistentes con las metas nacionales de carbono neutralidad al 2050 y la trayectoria de reducción al 2030.
- Granularidad rellena a relleno: El análisis se realiza para cada uno de los 40 rellenos sanitarios activos, con sus datos específicos de emisiones BAU, tamaño y zona climática.
- Flexibilidad en criterios de equidad: Los 3 Escenarios Distributivos cubren desde la máxima igualdad relativa (ED1) hasta la máxima diferenciación por características físicas y territoriales (ED3).
- Gradualidad temporal explícita: Los 3 Escenarios Temporales permiten analizar normas con distintos niveles de ambición temprana y planificación a largo plazo.
- Análisis de flexibilidad regulatoria: La dimensión EM permite cuantificar el impacto de incorporar mecanismos de mercado de carbono para facilitar el cumplimiento.

El resultado del análisis de estos escenarios constituye la base técnica para la propuesta de la norma de emisión de metano para el sector rellenos sanitarios de Chile, incluyendo la caracterización de los costos de cumplimiento, los co-beneficios de valoración energética del biogás y la distribución del esfuerzo regulatorio entre los operadores del sector.

6.4.5 Determinación de los límites de emisión (LE) bajo escenarios distributivos (ED)

Los ED constituyen la base de la estructura normativa, por lo que el primer paso es determinar los límites de emisión bajo las 3 configuraciones descritas para el año 2030 y el año 2050 como puntos temporales clave para los escenarios de norma. Las siguientes subsecciones presentan y describen los resultados obtenidos, los cuales se agrupan por tamaño de los rellenos sanitarios (grandes, medianos y pequeños) solamente para facilitar la visualización de éstos. En la Sección 12.3, Sección 12.4 y Sección 12.5 del Anexo 12 se presentan los resultados de cada escenario distributivo para el año 2030 y 2050.

6.4.5.1 Escenario distributivo 1 (ED1): Reducción proporcional uniforme

El cálculo del límite de emisión en los años 2030 y 2050 para cada relleno sanitario considerado para la aplicación de la futura norma se rige por el factor límite del 70% de las emisiones proyectadas al 2030 según la línea base (BAU) y del 37% de las emisiones proyectadas al 2050. Para ambos casos se obtienen tasas de captura de biogás necesarias, para cada relleno sanitario, del 30% y 63% en los años 2030 y 2050 respectivamente.

La Tabla 6-10 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño grande al año 2030, mientras que la Figura 6-4 visualiza la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable bajo este escenario, contrastando con su línea base.

Tabla 6-10 Características del escenario distributivo 1 para rellenos sanitarios grandes al año 2030

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2030	Límite de emisión al año 2030 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2030 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario Loma Los Colorados	30%	1.963	2.796
Relleno Sanitario Santa Marta		678	966
Relleno Sanitario Santiago Poniente		572	815
Relleno Sanitario Los Angeles		330	470
Relleno Sanitario El Molle		275	391

Fuente: Elaboración propia

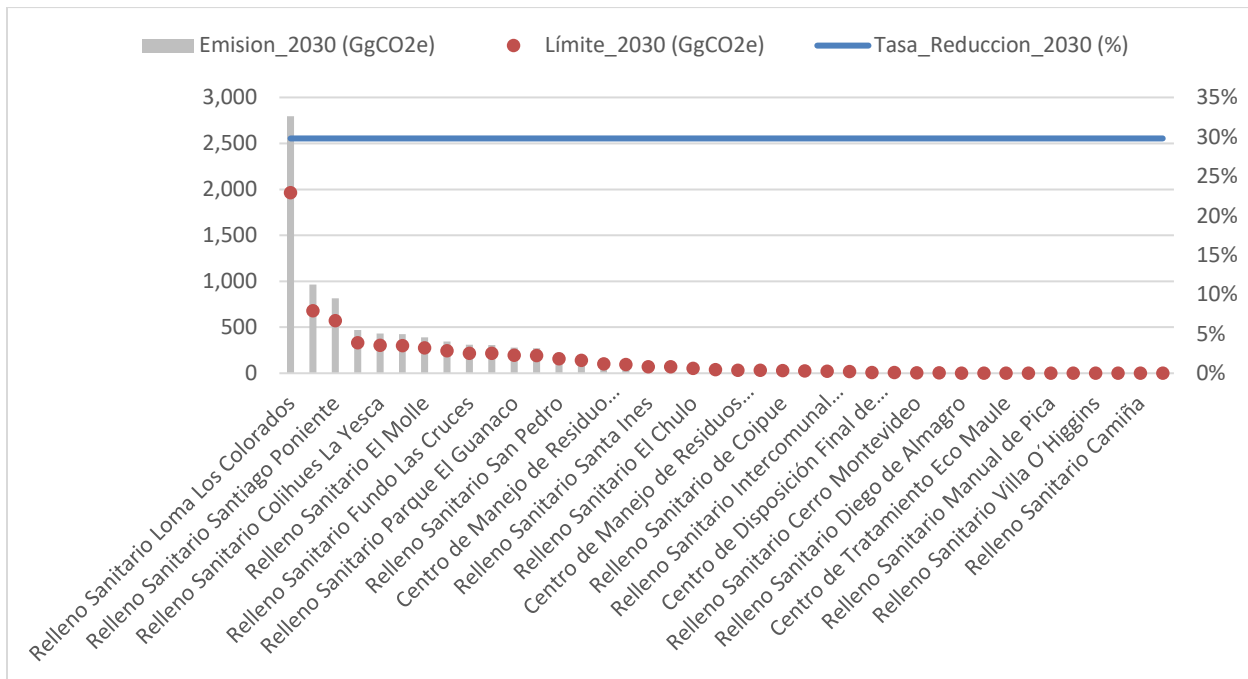


Figura 6-4 Escenario distributivo 1 aplicado a rellenos sanitarios grandes al año 2030

Fuente: Elaboración propia

Luego, la Tabla 6-11 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño grande al año 2050, mientras que la Figura 6-5 presenta la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable, contrastada con sus proyecciones BAU.

Tabla 6-11 Características del escenario distributivo 1 para rellenos sanitarios grandes al año 2050

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2050	Límite de emisión al año 2050 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2050 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario El Molle	63%	250	673
Relleno Sanitario Loma Los Colorados		1.366	3.684
Relleno Sanitario Los Angeles		204	550
Relleno Sanitario Santa Marta		491	1.323
Relleno Sanitario Santiago Poniente		425	1.145

Fuente: Elaboración propia

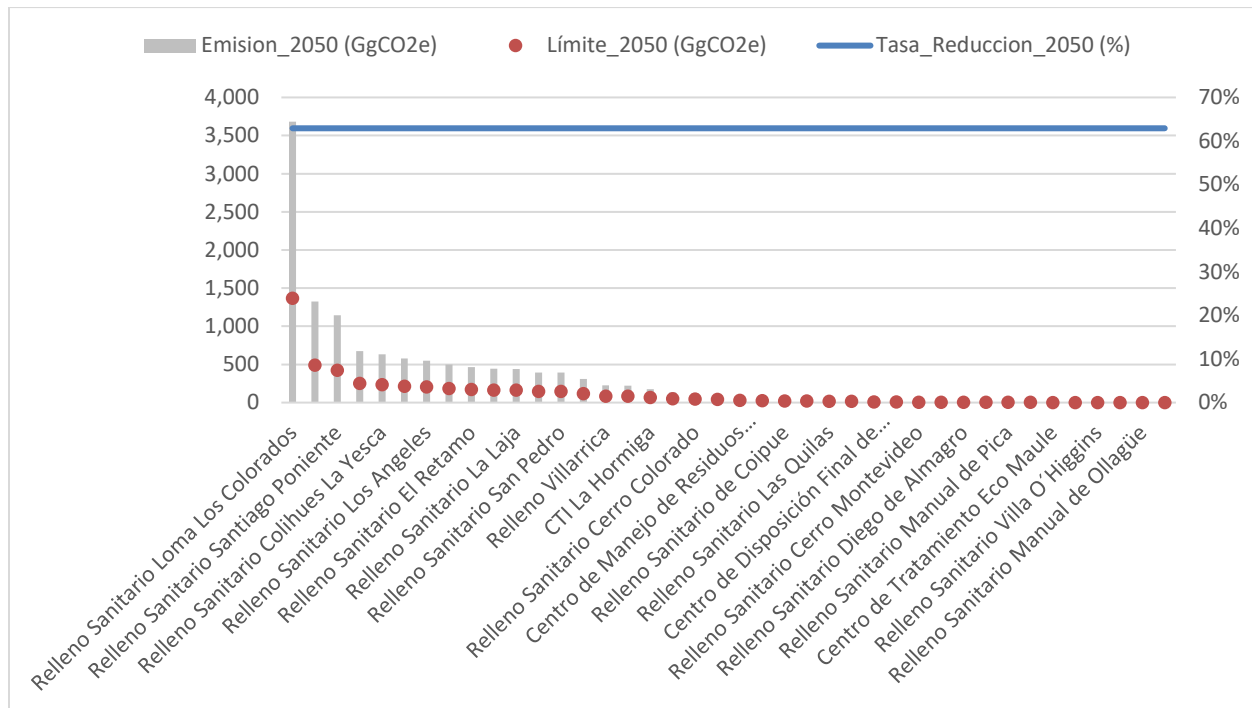


Figura 6-5 Escenario distributivo 1 aplicado a rellenos sanitarios grandes al año 2050

Fuente: Elaboración propia

Ahora, la Tabla 6-12 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño mediano al año 2030, mientras que la Figura 6-6 visualiza la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable bajo este escenario, contrastando con su línea base.

Tabla 6-12 Características del escenario distributivo 1 para rellenos sanitarios medianos al año 2030

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2030	Límite de emisión al año 2030 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2030 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario Colihues La Yesca	30%	302	431
Relleno Sanitario Cemarç		298	425
Relleno Sanitario El Retamo		243	346
Relleno Sanitario Fundo Las Cruces		218	310
Relleno Sanitario El Panul		216	307
Relleno Sanitario Parque El Guanaco		196	280
Relleno Sanitario La Laja		192	273
Relleno Sanitario San Pedro		157	224
Relleno Sanitario Chaqueta Blanca		96	137
Relleno Sanitario Santa Ines		71	102

Fuente: Elaboración propia

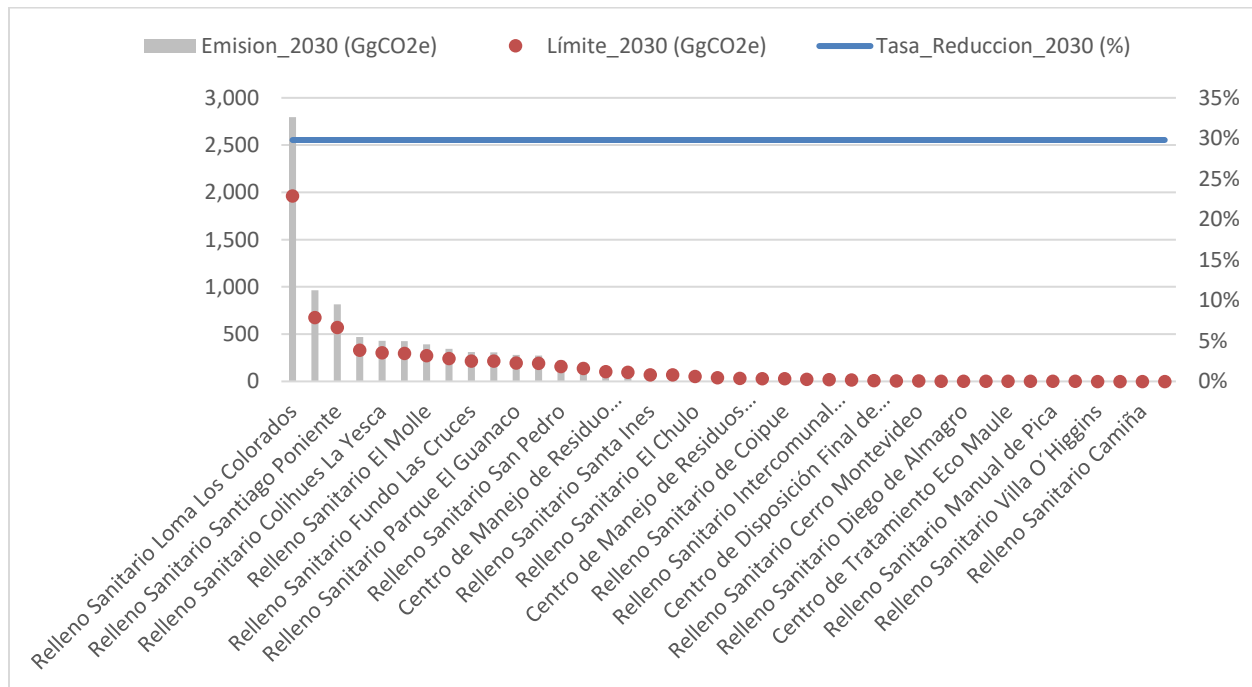


Figura 6-6 Escenario distributivo 1 aplicado a rellenos sanitarios medianos al año 2030

Fuente: Elaboración propia

Después, la Tabla 6-13 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño mediano al año 2050, mientras que la Figura 6-7 presenta la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable, contrastada con sus proyecciones BAU.

Tabla 6-13 Características del escenario distributivo 1 para rellenos sanitarios medianos al año 2050

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2050	Límite de emisión al año 2050 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2050 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario Cemarc	63%	185	500
Relleno Sanitario Chaqueta Blanca		115	309
Relleno Sanitario Colihues La Yesca		235	634
Relleno Sanitario El Panul		214	577
Relleno Sanitario El Retamo		173	466
Relleno Sanitario Fundo Las Cruces		165	444
Relleno Sanitario La Laja		162	438
Relleno Sanitario Parque El Guanaco		146	392
Relleno Sanitario San Pedro		145	392
Relleno Sanitario Santa Ines		42	113

Fuente: Elaboración propia

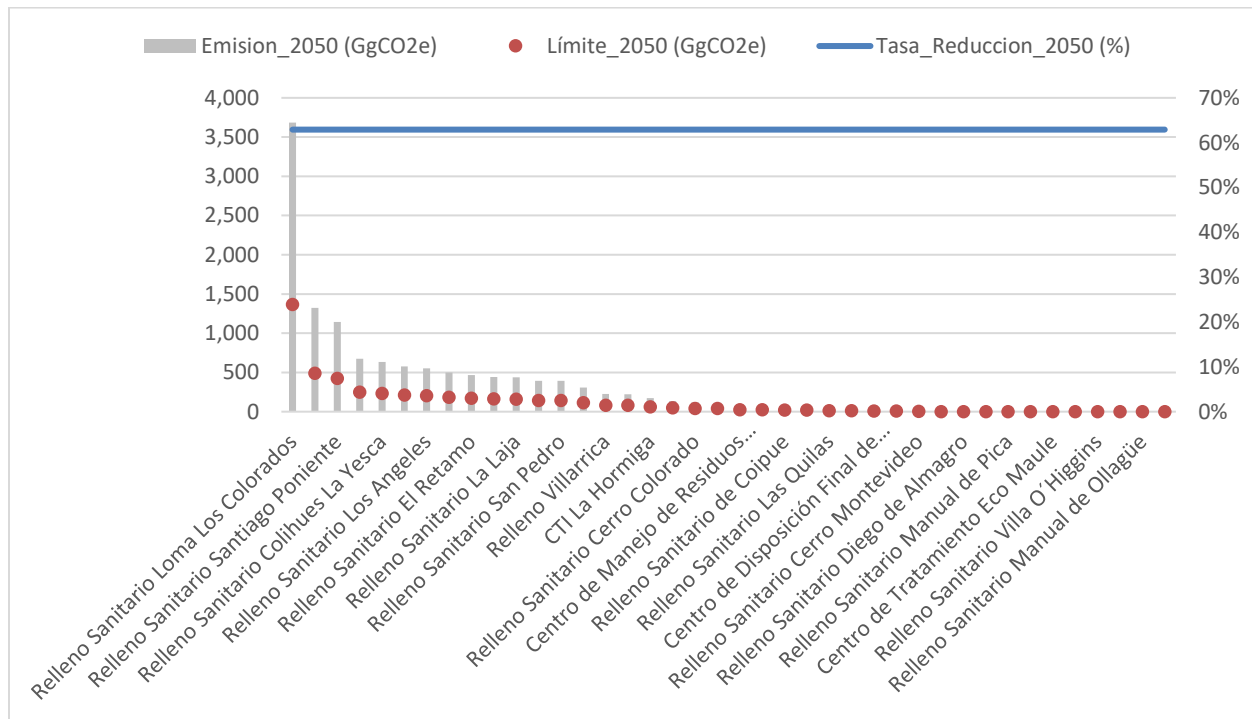


Figura 6-7 Escenario distributivo 1 aplicado a rellenos sanitarios medianos al año 2050

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la Tabla 6-14 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño pequeño al año 2030, mientras que la Figura 6-8 visualiza la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable bajo este escenario, contrastando con su línea base.

Tabla 6-14 Características del escenario distributivo 1 para rellenos sanitarios pequeños al año 2030

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2050	Límite de emisión al año 2050 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2050 (GgCO ₂ e)
Relleno Villarrica	30%	139	198
Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte		103	146
CTI La Hormiga		69	99
Relleno Sanitario El Chulo		54	77
Relleno Sanitario Cerro Colorado		40	57
Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemarc		32	45
Relleno Sanitario San Roque		31	44
Relleno Sanitario de Coipue		30	43
Relleno Sanitario Provincial del Huasco		24	33
Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue		21	30
Relleno Sanitario Las Quilas		17	24
CDFRS-Aysen		9	12
Relleno Sanitario Quebrada Ancha		7	10
Relleno Sanitario Cerro Montevideo		6	8
Relleno Sanitario San Pedro de Atacama		3	4
Relleno Sanitario Diego de Almagro		2	3
Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane		2	3
Centro de Tratamiento Eco Maule		2	3
Relleno Sanitario Puerto Ibañez		2	2
Relleno Sanitario Manual de Pica		2	2
Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufu		1	2
Relleno Sanitario Villa O'Higgins		0,3	0,4
Relleno Sanitario Camarones		0,2	0,3
Relleno Sanitario Camiña		0,2	0,2
Relleno Sanitario Manual de Ollagüe		0,1	0,1

Fuente: Elaboración propia

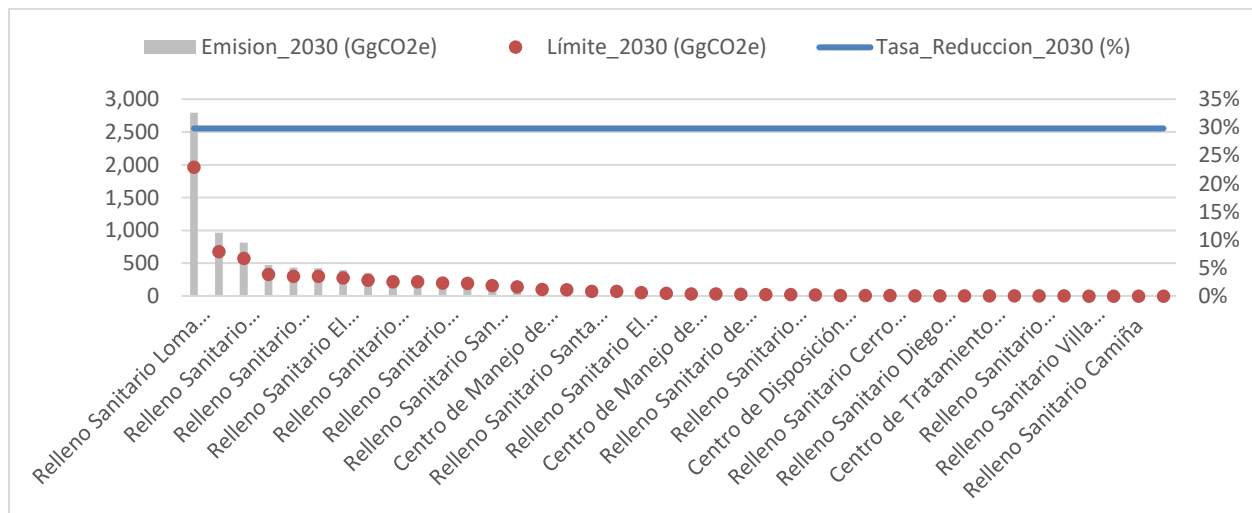


Figura 6-8 Escenario distributivo 1 aplicado a rellenos sanitarios pequeños al año 2030

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la Tabla 6-15 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño pequeño al año 2050, mientras que la Figura 6-9 presenta la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable, contrastada con sus proyecciones BAU.

Tabla 6-15 Características del escenario distributivo 1 para rellenos sanitarios pequeños al año 2050

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2050	Límite de emisión al año 2050 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2050 (GgCO ₂ e)
Relleno Villarrica	63%	83	225
Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte		82	222
CTI La Hormiga		64	174
Relleno Sanitario El Chulo		50	134
Relleno Sanitario Cerro Colorado		44	119
Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemarco		27	72
Relleno Sanitario San Roque		25	68
Relleno Sanitario de Coipue		22	60
Relleno Sanitario Provincial del Huasco		21	57
Relleno Sanitario Las Quilas		15	40
Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue		15	40
Centro de Disposición Final de Residuos Sólidos de Aysen (CDFRS-Aysen)		9	24
Relleno Sanitario Quebrada Ancha		8	22
Relleno Sanitario Cerro Montevideo		5	14
Relleno Sanitario San Pedro de Atacama		3	9
Relleno Sanitario Diego de Almagro		3	7
Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane		2	5
Relleno Sanitario Manual de Pica		2	4
Relleno Sanitario Puerto Ibañez		1	4
Centro de Tratamiento Eco Maule		1	4
Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufu		0,8	2
Relleno Sanitario Villa O'Higgins		0,3	0,8
Relleno Sanitario Camarones		0,2	0,6
Relleno Sanitario Manual de Ollagüe		0,1	0,2
Relleno Sanitario Camiña		0,0	0,1

Fuente: Elaboración propia

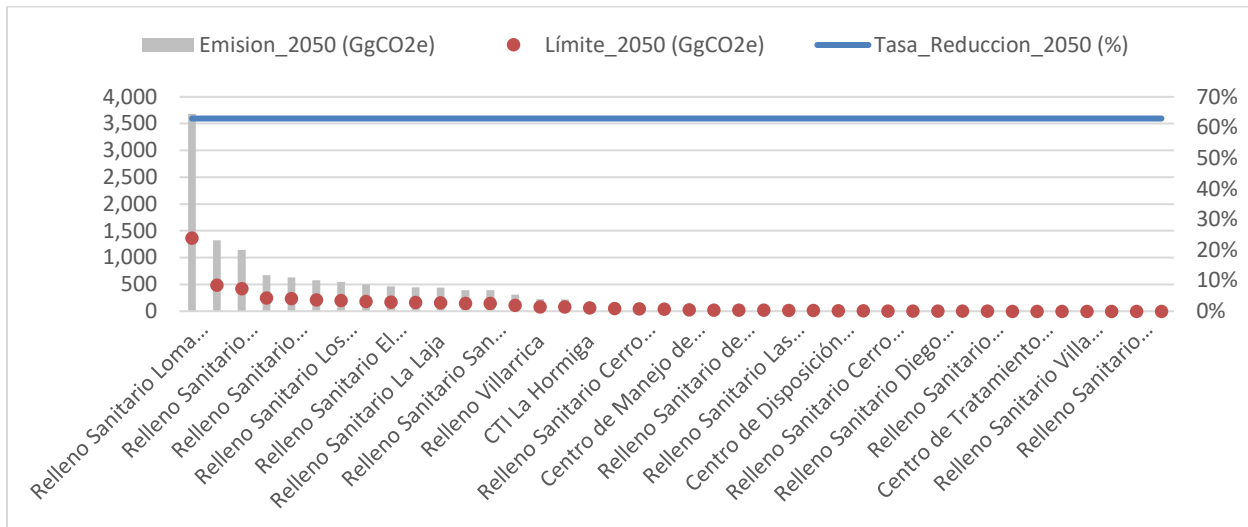


Figura 6-9 Escenario distributivo 1 aplicado a rellenos sanitarios pequeños al año 2050

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados luego deben ser cruzados con los escenarios temporales y escenarios de umbral de excedencia para generar los escenarios normativos.

6.4.5.2 Escenario distributivo 2 (ED2): Diferenciado por tamaño del relleno

En el segundo escenario distributivo de los límites de emisión, el cálculo de éste en los años 2030 y 2050 para cada relleno sanitario considerado para la aplicación de la futura norma se rige por factores dependientes del tamaño del relleno sanitario, es decir:

- Grandes, al 2030, se permitirá un 58% del BAU respectivo.
- Grandes, al 2050, se permitirá un 23% del BAU respectivo.
- Medianos, al 2030, se permitirá un 85% del BAU respectivo.
- Medianos, al 2050, se permitirá un 47% del BAU respectivo.
- Pequeños, al 2030, se permitirá un 100% del BAU respectivo (es decir, no tendrán límite de emisión exigible).
- Pequeños, al 2050, se permitirá un 84% del BAU respectivo.

Para todos los casos se calculan las tasas de captura de biogás necesarias, para cada categoría de relleno sanitario, las cuales son:

- Grandes, al 2030, deberán capturar el 42% del biogás generado.
- Grandes, al 2050, deberán capturar el 77% del biogás generado.
- Medianos, al 2030, deberán capturar el 15% del biogás generado.
- Medianos, al 2050, deberán capturar el 53% del biogás generado.
- Pequeños, al 2030, no deberán capturar biogás generado.
- Pequeños, al 2050, deberán capturar el 16% del biogás generado.

La Tabla 6-16 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño grande al año 2030, mientras que la Figura 6-10 visualiza la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable bajo este escenario, contrastando con su línea base.

Tabla 6-16 Características del escenario distributivo 2 para rellenos sanitarios grandes al año 2030

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2030	Límite de emisión al año 2030 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2030 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario Loma Los Colorados	42%	1.621	2.796
Relleno Sanitario Santa Marta		560	966
Relleno Sanitario Santiago Poniente		473	815
Relleno Sanitario Los Angeles		273	470
Relleno Sanitario El Molle		227	391

Fuente: Elaboración propia

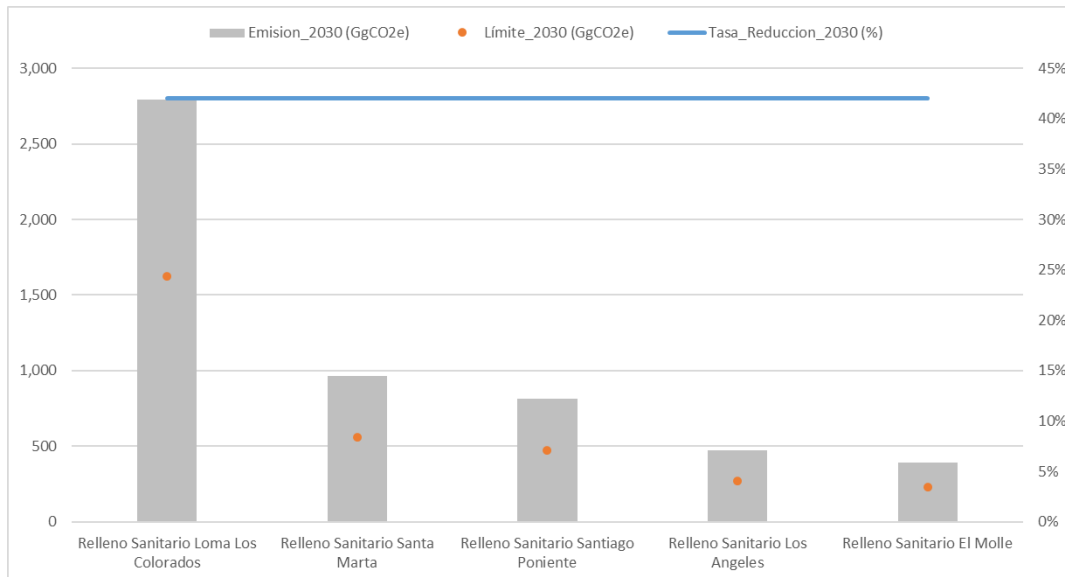


Figura 6-10 Escenario distributivo 2 aplicado a rellenos sanitarios grandes al año 2030

Fuente: Elaboración propia

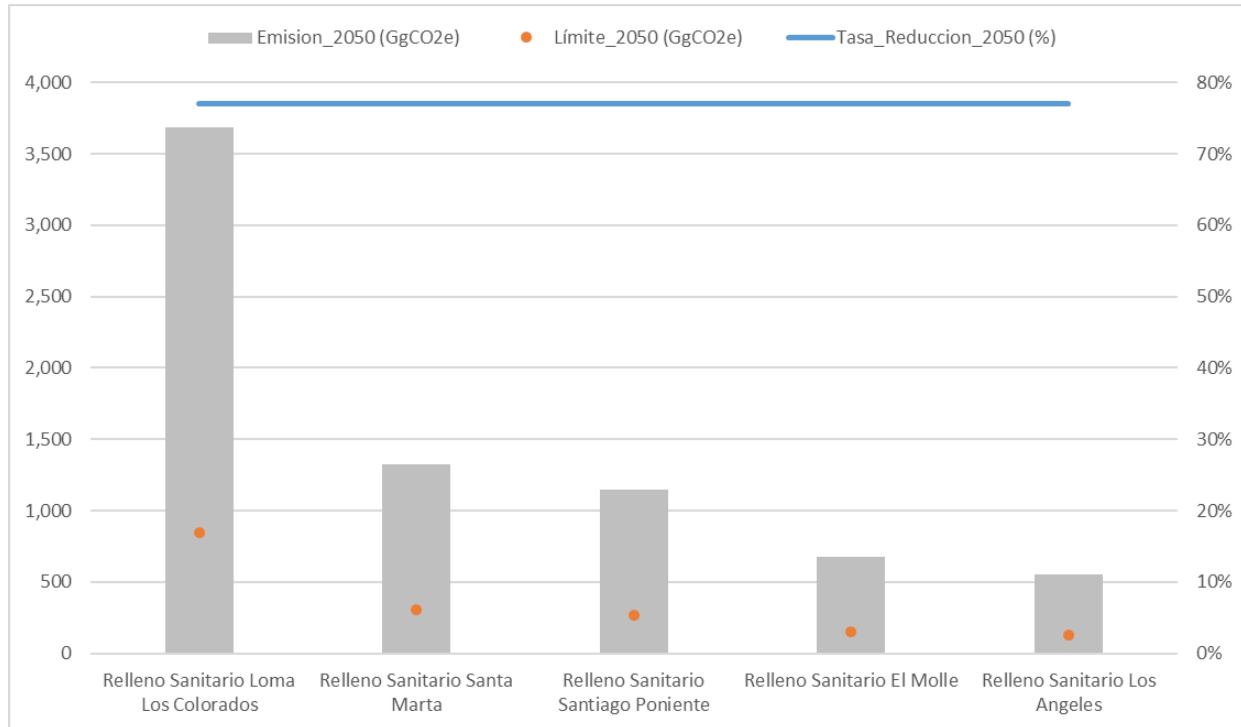
Luego, la Tabla 6-17 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño grande al año 2050, mientras que la Figura 6-11 presenta la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable, contrastada con sus proyecciones BAU.

Tabla 6-17 Características del escenario distributivo 2 para rellenos sanitarios grandes al año 2050

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2050	Límite de emisión al año 2050 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2050 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario Loma Los Colorados	77%	847	3.684
Relleno Sanitario Santa Marta		304	1.323

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2050	Límite de emisión al año 2050 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2050 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario Santiago Poniente		263	1.145
Relleno Sanitario El Molle		155	673
Relleno Sanitario Los Angeles		127	550

Fuente: Elaboración propia


Figura 6-11 Escenario distributivo 2 aplicado a rellenos sanitarios grandes al año 2050

Fuente: Elaboración propia

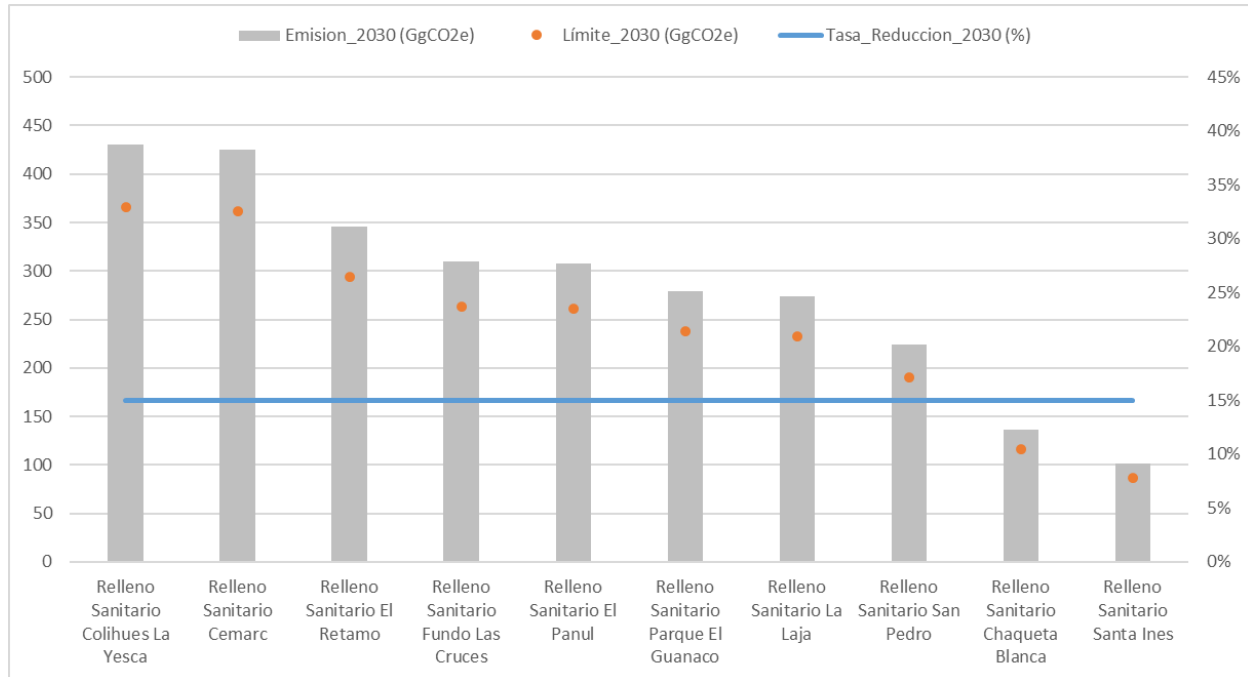
Ahora, la Tabla 6-18 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño mediano al año 2030, mientras que la Figura 6-12 visualiza la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable bajo este escenario, contrastando con su línea base.

Tabla 6-18 Características del escenario distributivo 2 para rellenos sanitarios medianos al año 2030

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2030	Límite de emisión al año 2030 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2030 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario Colihues La Yesca	15%	366	431
Relleno Sanitario Cemar		361	425
Relleno Sanitario El Retamo		294	346
Relleno Sanitario Fundo Las Cruces		263	310
Relleno Sanitario El Panul		261	307
Relleno Sanitario Parque El Guanaco		238	280
Relleno Sanitario La Laja		232	273

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2030	Límite de emisión al año 2030 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2030 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario San Pedro		191	224
Relleno Sanitario Chaqueta Blanca		116	137
Relleno Sanitario Santa Ines		86	102

Fuente: Elaboración propia


Figura 6-12 Escenario distributivo 2 aplicado a rellenos sanitarios medianos al año 2030

Fuente: Elaboración propia

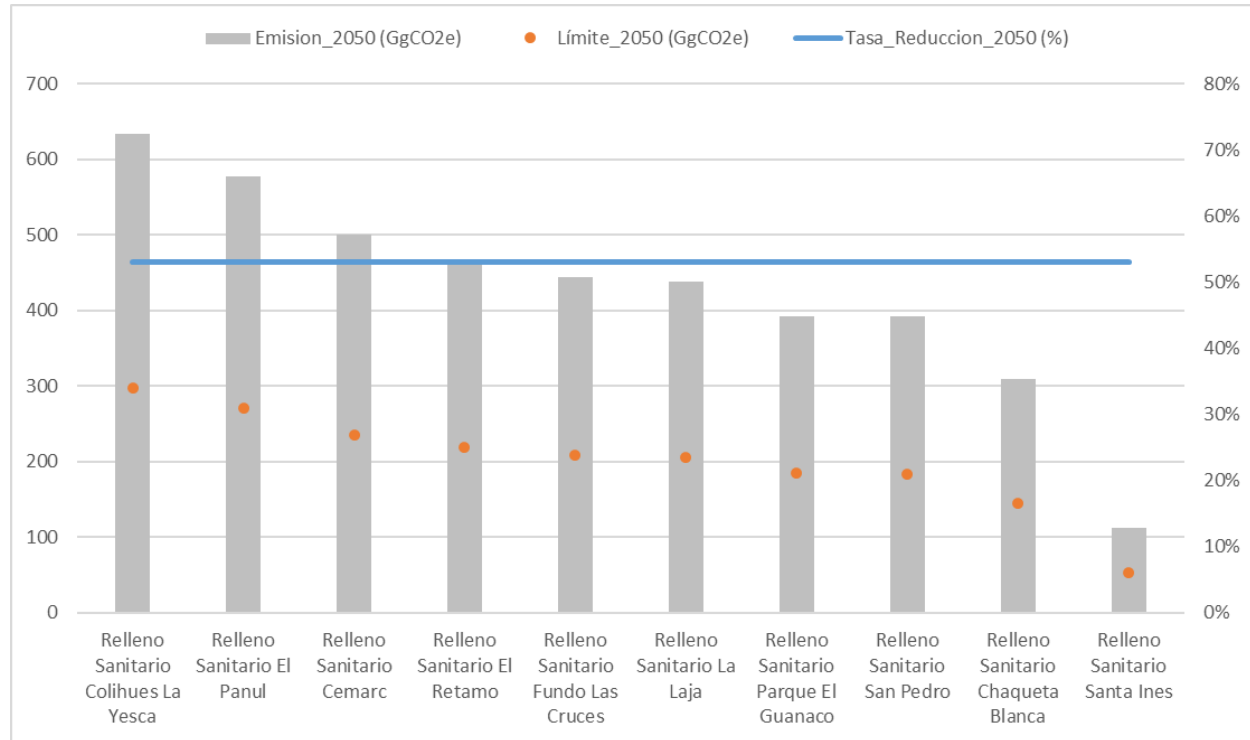
Después, la Tabla 6-19 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño mediano al año 2050, mientras que la Figura 6-13 presenta la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable, contrastada con sus proyecciones BAU.

Tabla 6-19 Características del escenario distributivo 2 para rellenos sanitarios medianos al año 2050

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2050	Límite de emisión al año 2050 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2050 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario Colihues La Yesca	53%	298	634
Relleno Sanitario El Panul		271	577
Relleno Sanitario Cemarc		235	500
Relleno Sanitario El Retamo		219	466
Relleno Sanitario Fundo Las Cruces		209	444
Relleno Sanitario La Laja		206	438
Relleno Sanitario Parque El Guanaco		184	392
Relleno Sanitario San Pedro		184	392

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2050	Límite de emisión al año 2050 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2050 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario Chaqueta Blanca		145	309
Relleno Sanitario Santa Ines		53	113

Fuente: Elaboración propia


Figura 6-13 Escenario distributivo 2 aplicado a rellenos sanitarios medianos al año 2050

Fuente: Elaboración propia

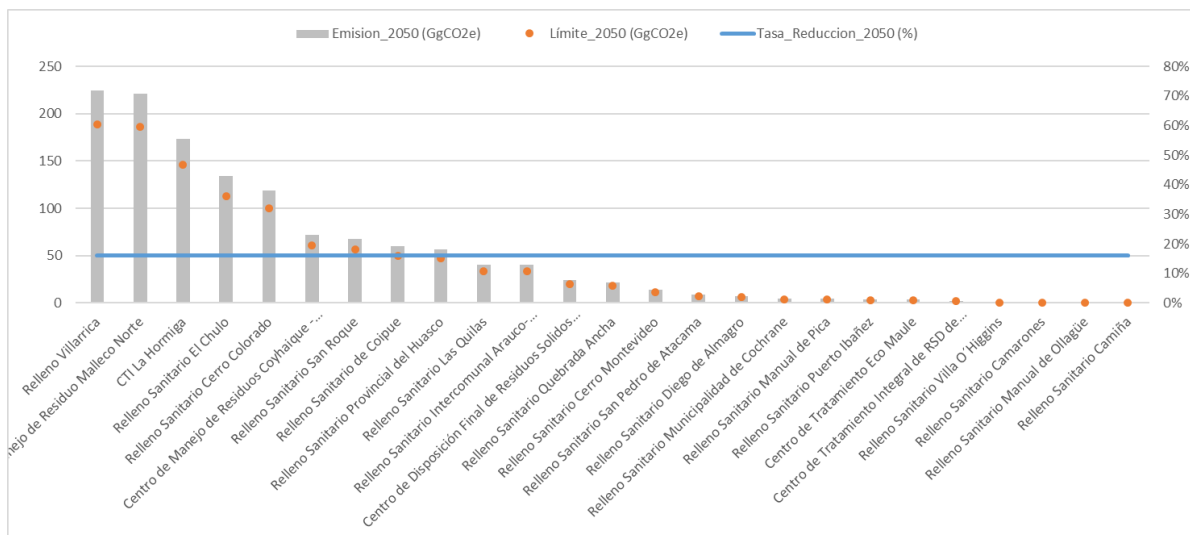
Finalmente, la Tabla 6-20 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño pequeño al año 2050, mientras que la Figura 6-14 presenta la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable, contrastada con sus proyecciones BAU. Cabe destacar que los pequeños al 2030 no tendrán un límite de emisión exigible y se permitirá un 100% del BAU respectivo.

Tabla 6-20 Características del escenario distributivo 2 para rellenos sanitarios pequeños al año 2050

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2030	Límite de emisión al año 2030 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2030 (GgCO ₂ e)
Relleno Villarrica	16%	189	225
Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte		186	222
CTI La Hormiga		146	174
Relleno Sanitario El Chulo		113	134
Relleno Sanitario Cerro Colorado		100	119
Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemarc		61	72
Relleno Sanitario San Roque		57	68

Unidad fiscalizable (relleno sanitario)	Tasa de reducción de emisiones al año 2030	Límite de emisión al año 2030 (GgCO ₂ e)	Emisiones BAU al año 2030 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario de Coipue		50	60
Relleno Sanitario Provincial del Huasco		48	57
Relleno Sanitario Las Quilas		34	40
Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue		34	40
CDFRS-Aysen		20	24
Relleno Sanitario Quebrada Ancha		18	22
Relleno Sanitario Cerro Montevideo		12	14
Relleno Sanitario San Pedro de Atacama		7	9
Relleno Sanitario Diego de Almagro		6	7
Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane		4	5
Relleno Sanitario Manual de Pica		4	4
Relleno Sanitario Puerto Ibañez		3	4
Centro de Tratamiento Eco Maule		3	4
Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufu		2	2
Relleno Sanitario Villa O'Higgins		0,6	0,8
Relleno Sanitario Camarones		0,5	0,6
Relleno Sanitario Manual de Ollagüe		0,2	0,2
Relleno Sanitario Camiña		0,1	0,1

Fuente: Elaboración propia


Figura 6-14 Escenario distributivo 2 aplicado a rellenos sanitarios pequeños al año 2050

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados luego deben ser cruzados con los escenarios temporales y escenarios de umbral de excedencia para generar los escenarios normativos.

6.4.5.3 Escenario distributivo 3 (ED3): Diferenciado por zona climática y tamaño del relleno

El tercer y último escenario distributivo, sigue el mismo proceso de cálculo de los anteriores, pero genera una segregación adicional por zona climática para personalizar la norma de acuerdo al

régimen climático relativo a cada unidad fiscalizable. Cabe destacar que cada región pertenece a una clasificación seca o húmeda, tal como se presentó en la Tabla 6-7. Esto resulta en una mayor cantidad de factores para calcular los límites de emisión.

Los factores para el año 2030 se desglosan así:

- Zona climática seca:
 - Región Metropolitana, se permitirá un 50% del BAU respectivo.
 - Grandes, se permitirá un 70% del BAU respectivo.
 - Medianos, se permitirá un 100% del BAU respectivo.
 - Pequeños, se permitirá un 100% del BAU respectivo.
- Zona climática húmeda:
 - Región Metropolitana, se permitirá un 50% del BAU respectivo.
 - Grandes, se permitirá un 60% del BAU respectivo.
 - Medianos, se permitirá un 94% del BAU respectivo.
 - Pequeños, se permitirá un 100% del BAU respectivo.

Mientras que los factores para el año 2050 son los siguientes:

- Zona climática seca:
 - Región Metropolitana, se permitirá un 21% del BAU respectivo.
 - Grandes, se permitirá un 30% del BAU respectivo.
 - Medianos, se permitirá un 56% del BAU respectivo.
 - Pequeños, se permitirá un 90% del BAU respectivo.
- Zona climática húmeda:
 - Región Metropolitana, se permitirá un 21% del BAU respectivo.
 - Grandes, se permitirá un 25% del BAU respectivo.
 - Medianos, se permitirá un 43% del BAU respectivo.
 - Pequeños, se permitirá un 75% del BAU respectivo.

La Tabla 6-21 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño grande que se encuentra ubicado en una zona climática seca al año 2030, mientras que la Figura 6-15 visualiza la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable bajo este escenario, contrastando con su línea base.

Tabla 6-21 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios grandes zona climática seca al año 2030

Nombre Relleno	Tasa_Reducccion_2030 (%)	Límite_2030 (GgCO ₂ e)	Emision_2030 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario Loma Los Colorados	50%	1.398	2.796
Relleno Sanitario Santa Marta	50%	483	966
Relleno Sanitario Santiago Poniente	50%	407	815
Relleno Sanitario El Molle	30%	274	391

Fuente: Elaboración propia

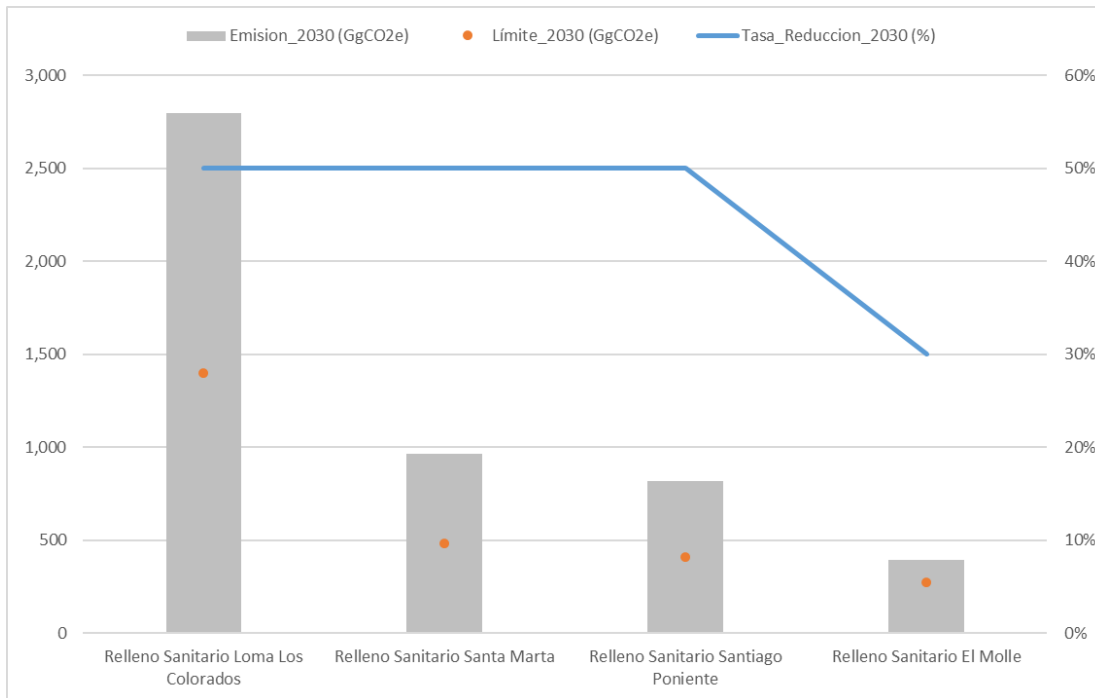


Figura 6-15 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática seca al año 2030

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 6-22 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño grande ubicado en una zona climática húmeda al año 2030, mientras que la Figura 6-16 visualiza la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable bajo este escenario, contrastando con su línea base.

Tabla 6-22 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios grandes zona climática húmeda al año 2030

Nombre Relleno	Tasa_Reducción_2030 (%)	Límite_2030 (GgCO2e)	Emission_2030 (GgCO2e)
Relleno Sanitario Los Angeles	40%	282	470

Fuente: Elaboración propia

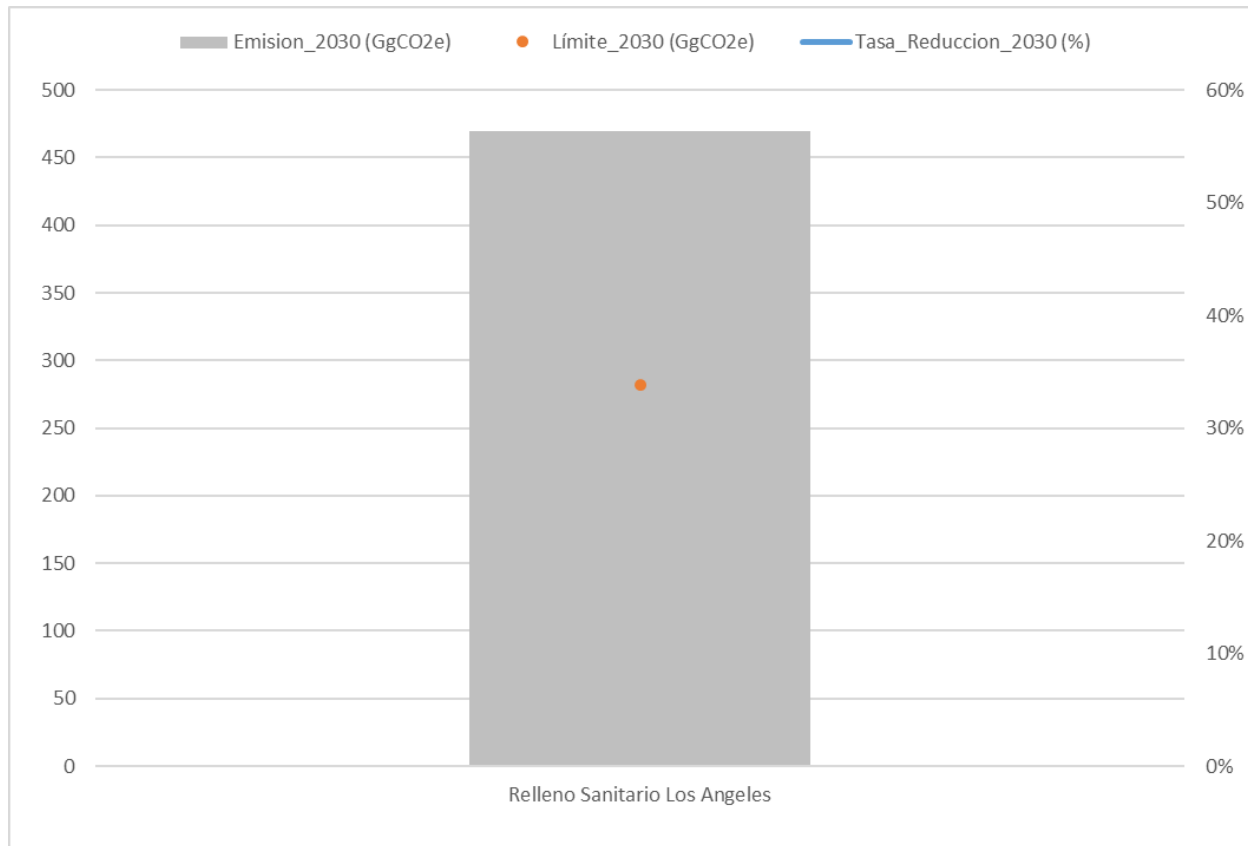


Figura 6-16 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática húmeda al año 2050

Fuente: Elaboración propia

Luego, la Tabla 6-23 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño grande ubicado en una zona climática seca al año 2050, mientras que la Figura 6-17 presenta la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable, contrastada con sus proyecciones BAU.

Tabla 6-23 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios grandes zona climática seca al año 2050

Nombre Relleno	Tasa_Reducccion_2050 (%)	Limite_2050 (GgCO2e)	Emission_2050 (GgCO2e)
Relleno Sanitario Loma Los Colorados	79%	774	3.684
Relleno Sanitario Santa Marta	79%	278	1.323
Relleno Sanitario Santiago Poniente	79%	241	1.145
Relleno Sanitario El Molle	70%	202	673

Fuente: Elaboración propia

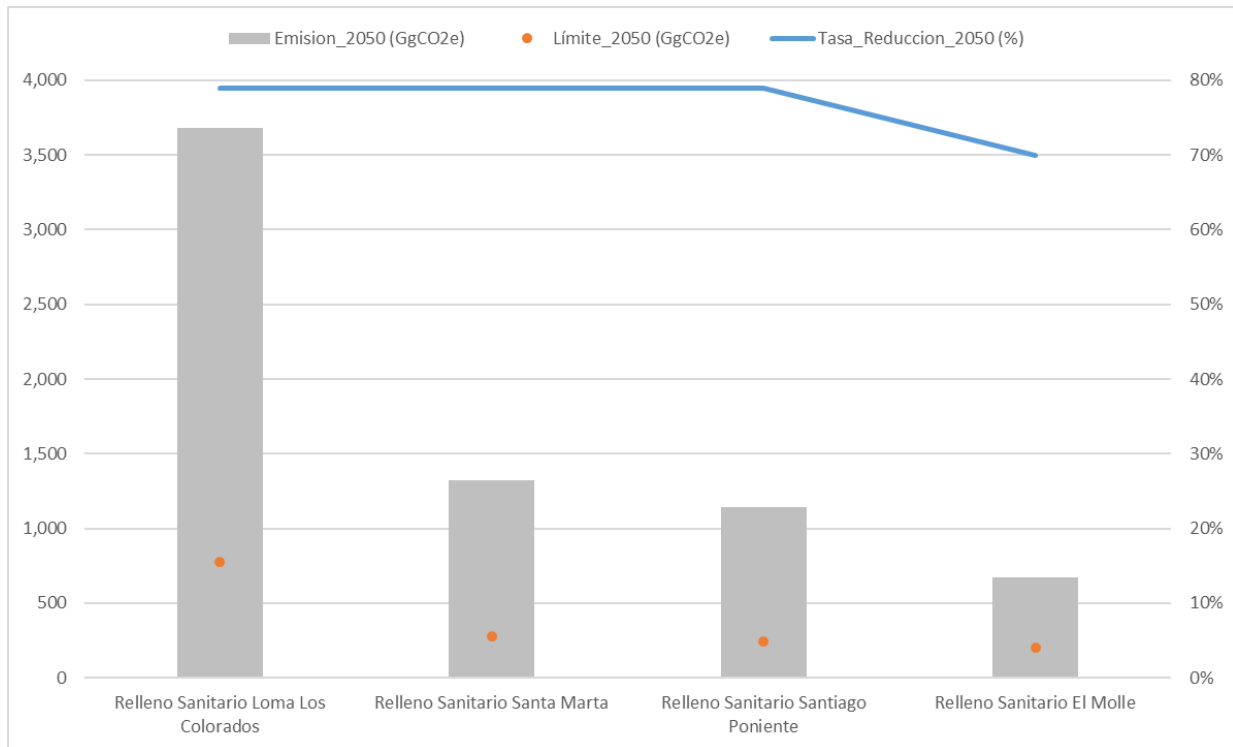


Figura 6-17 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática seca al año 2050

Fuente: Elaboración propia

A continuación, la Tabla 6-24 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño grande ubicado en una zona climática húmeda al año 2050, mientras que la Figura 6-18 presenta la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable, contrastada con sus proyecciones BAU.

Tabla 6-24 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios grandes zona climática húmeda al año 2050

Nombre Relleno	Tasa_Reducion_2050 (%)	Límite_2050 (GgCO2e)	Emission_2050 (GgCO2e)
Relleno Sanitario Los Angeles	75%	138	550

Fuente: Elaboración propia



Figura 6-18 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática húmeda al año 2050

Fuente: Elaboración propia

Al mismo tiempo, la Tabla 6-25 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño mediano ubicado en una zona climática húmeda al año 2030, mientras que la Figura 6-19 visualiza la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable bajo este escenario, contrastando con su línea base. Cabe destacar que los medianos en zona climática seca al 2030 no tendrán un límite de emisión exigible y se permitirá un 100% del BAU respectivo.

Tabla 6-25 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios medianos zona húmeda al año 2030

Nombre Relleno	Tasa_Reducccion_2030 (%)	Límite_2030 (GgCO2e)	Emission_2030 (GgCO2e)
Relleno Sanitario Cemarac	6%	399	425
Relleno Sanitario El Retamo	6%	325	346
Relleno Sanitario Fundo Las Cruces	6%	291	310
Relleno Sanitario Parque El Guanaco	6%	263	280
Relleno Sanitario San Pedro	6%	211	224

Fuente: Elaboración propia

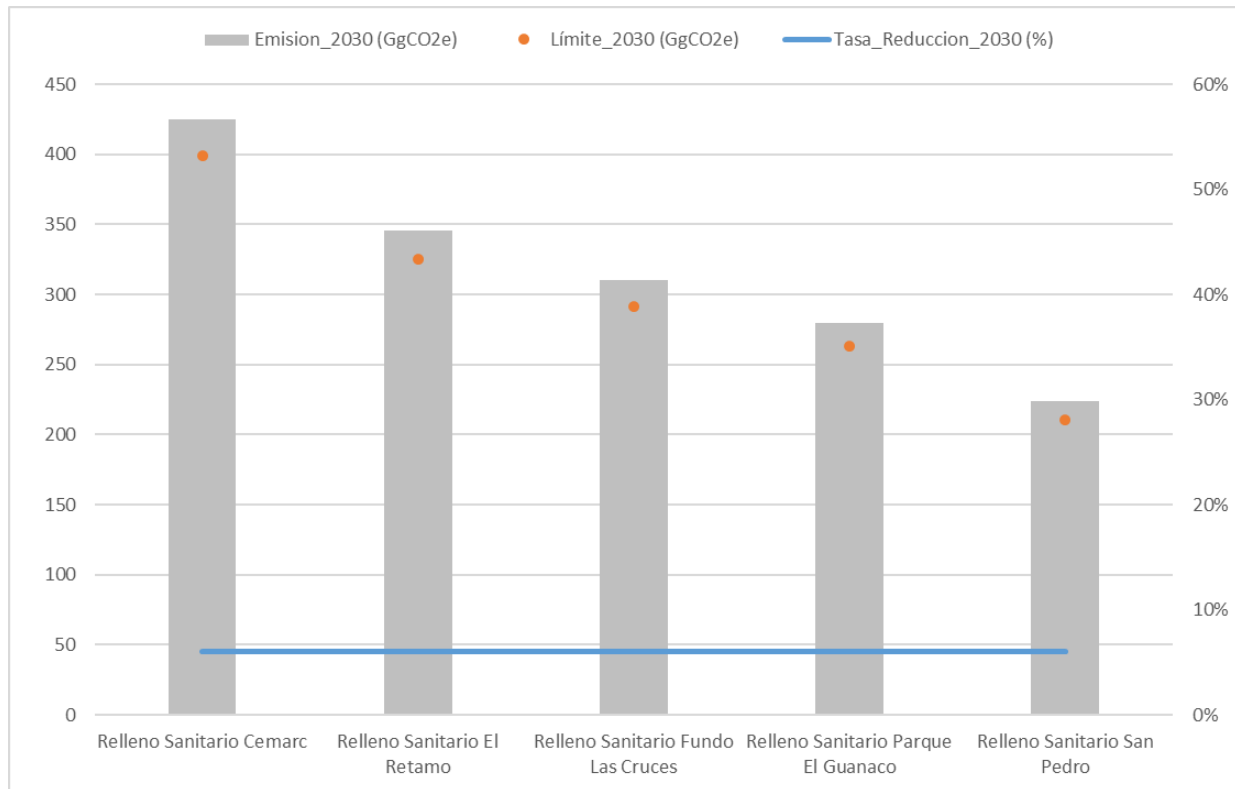


Figura 6-19 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática húmeda al año 2030

Fuente: Elaboración propia

Después, la Tabla 6-26 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño mediano ubicado en una zona climática seca al año 2050, mientras que la Figura 6-20 presenta la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable, contrastada con sus proyecciones BAU.

Tabla 6-26 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios medianos zona seca al año 2050

Nombre Relleno	Tasa_Reducción_2050 (%)	Límite_2050 (GgCO ₂ e)	Emission_2050 (GgCO ₂ e)
Relleno Sanitario Colihues La Yesca	44%	355	634
Relleno Sanitario El Panul	44%	323	577
Relleno Sanitario La Laja	44%	245	438
Relleno Sanitario Chaqueta Blanca	44%	173	309
Relleno Sanitario Santa Ines	44%	63	113

Fuente: Elaboración propia

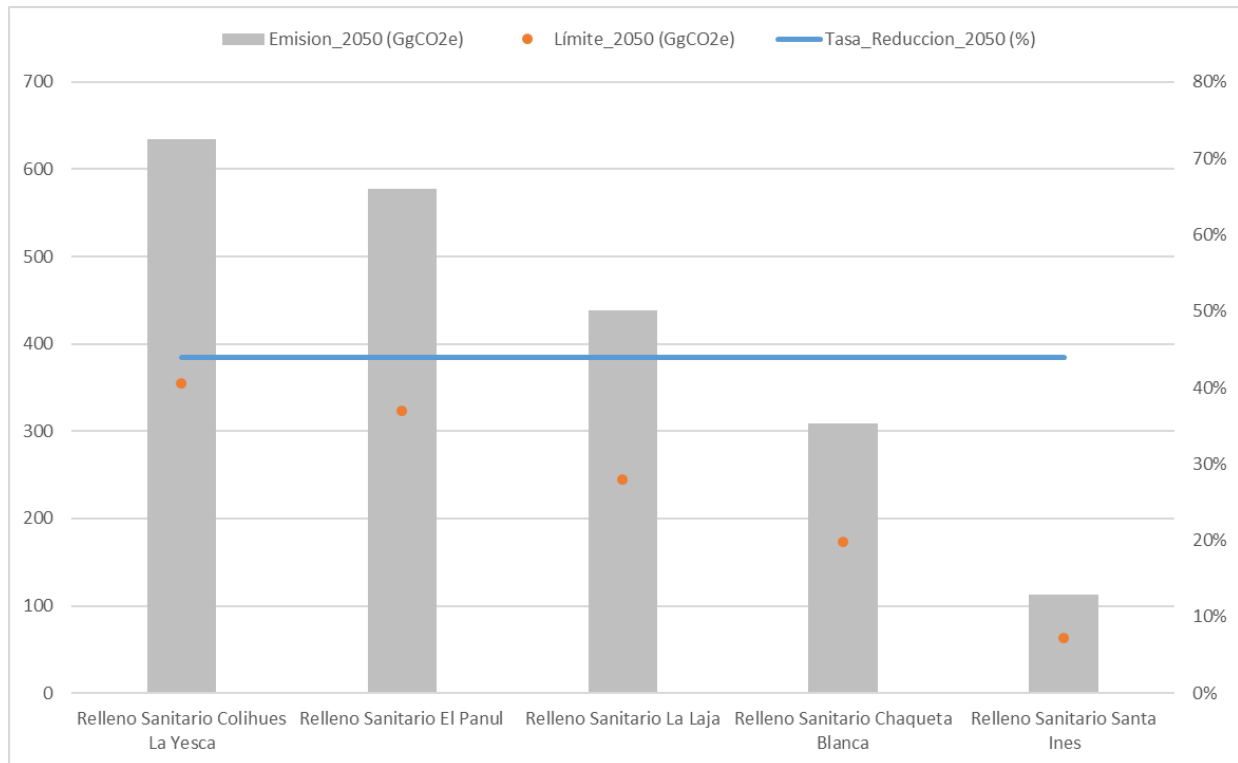


Figura 6-20 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática seca al año 2050

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, la Tabla 6-27 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño mediano ubicado en una zona climática húmeda al año 2050, mientras que la Figura 6-21 presenta la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable, contrastada con sus proyecciones BAU.

Tabla 6-27 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios medianos zona húmeda al año 2050

Nombre Relleno	Tasa_Reducción_2050 (%)	Límite_2050 (GgCO2e)	Emission_2050 (GgCO2e)
Relleno Sanitario Cemarc	57%	215	500
Relleno Sanitario El Retamo	57%	200	466
Relleno Sanitario Fundo Las Cruces	57%	191	444
Relleno Sanitario Parque El Guanaco	57%	169	392
Relleno Sanitario San Pedro	57%	168	392

Fuente: Elaboración propia

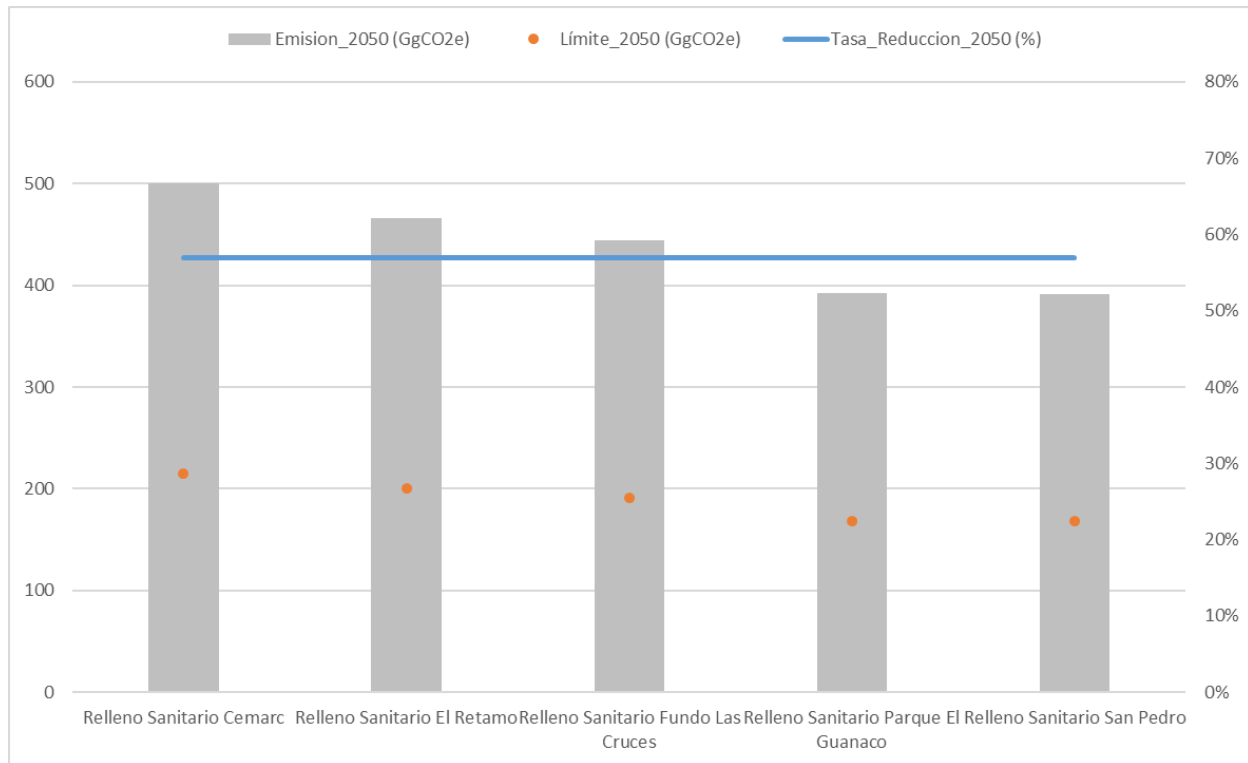


Figura 6-21 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios grandes zona climática húmeda al año 2050

Fuente: Elaboración propia

Terminando, la Tabla 6-28 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño pequeño ubicado en una zona climática seca al año 2050, mientras que la Figura 6-22 presenta la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable, contrastada con sus proyecciones BAU. Cabe destacar que los rellenos pequeños en zona climática seca al 2030 no tendrán un límite de emisión exigible y se permitirá un 100% del BAU respectivo.

Tabla 6-28 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios pequeña zona seca al año 2050

Nombre Relleno	Tasa_Reducción_2050 (%)	Límite_2050 (GgCO2e)	Emission_2050 (GgCO2e)
CTI La Hormiga	10%	156	174
Relleno Sanitario El Chulo	10%	121	134
Relleno Sanitario Cerro Colorado	10%	107	119
Relleno Sanitario Provincial del Huasco	10%	51	57
Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue	10%	36	40
Relleno Sanitario Quebrada Ancha	10%	19	22
Relleno Sanitario Cerro Montevideo	10%	13	14
Relleno Sanitario San Pedro de Atacama	10%	8	9
Relleno Sanitario Diego de Almagro	10%	7	7
Relleno Sanitario Manual de Pica	10%	4	4
Relleno Sanitario Camarones	10%	1	1

Nombre Relleno	Tasa_Reducccion_2050 (%)	Límite_2050 (GgCO2e)	Emission_2050 (GgCO2e)
Relleno Sanitario Manual de Ollagüe	10%	0,2	0,2
Relleno Sanitario Camiña	10%	0,1	0,1

Fuente: Elaboración propia

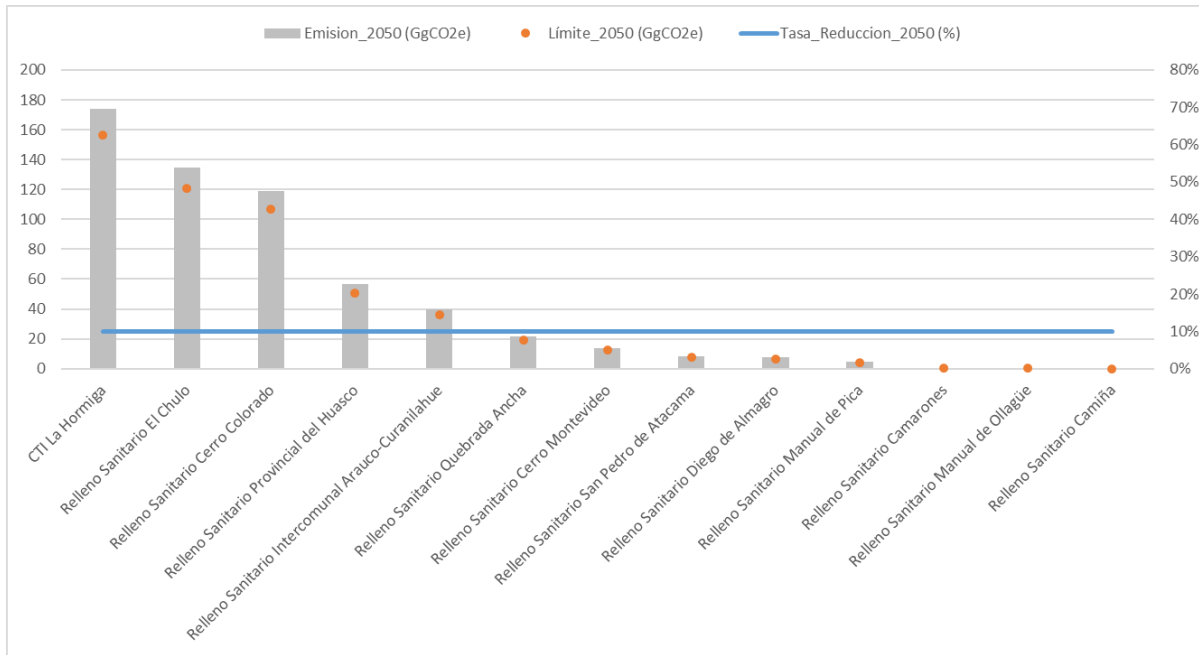


Figura 6-22 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios pequeños zona climática seca al año 2050

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la Tabla 6-29 presenta el límite de emisión calculado para cada relleno sanitario de tamaño pequeño ubicado en una zona climática húmeda al año 2050, mientras que la Figura 6-23 presenta la exigencia relativa a cada unidad fiscalizable, contrastada con sus proyecciones BAU. Cabe destacar que los rellenos pequeños en zona climática húmeda al 2030 no tendrán un límite de emisión exigible y se permitirá un 100% del BAU respectivo.

Tabla 6-29 Características del escenario distributivo 3 para rellenos sanitarios pequeña zona húmeda al año 2050

Nombre Relleno	Tasa_Reducccion_2050 (%)	Límite_2050 (GgCO2e)	Emission_2050 (GgCO2e)
Relleno Villarrica	25%	168	225
Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte	25%	166	222
Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemarc	25%	54	72
Relleno Sanitario San Roque	25%	51	68
Relleno Sanitario de Coipue	25%	45	60
Relleno Sanitario Las Quilas	25%	30	40
Centro de Disposición Final de Residuos Solidos de Aysen (CDFRS-Aysen)	25%	18	24

Nombre Relleno	Tasa_Reducccion_2050 (%)	Límite_2050 (GgCO2e)	Emission_2050 (GgCO2e)
Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane	25%	3	5
Relleno Sanitario Puerto Ibañez	25%	3	4
Centro de Tratamiento Eco Maule	25%	3	4
Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufu	25%	2	2
Relleno Sanitario Villa O'Higgins	25%	1	1

Fuente: Elaboración propia

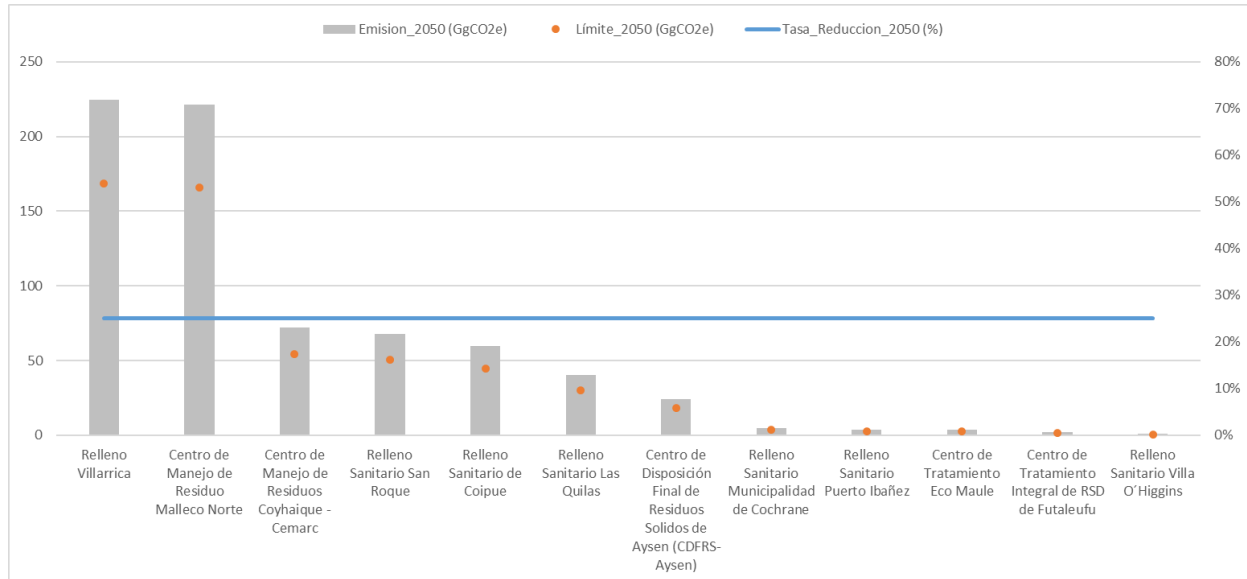


Figura 6-23 Escenario distributivo 3 aplicado a rellenos sanitarios pequeños zona climática húmeda al año 2050

Fuente: Elaboración propia

6.5 Cantidad máxima acumulada, umbral de excedencia, cantidad máxima de certificados permitidos y estándar de referencia

Para cada escenario se considera los siguientes límites:

- **Límite de excedencia:** Este límite es el que se establece en cada escenario antes mencionado.
- **Cantidad máxima acumulada y Umbral de excedencia:** Para la cantidad máxima acumulada se espera que al regulado se le permita generar excedentes de forma inmediata a mitigar sobre el cumplimiento, por lo que este límite sería el mismo que el umbral de excedencia.
- **Límite máximo para compensar:** Respecto a las normas internacionales revisadas²², el límite de cantidad máxima compensación será libre respecto a las emisiones del sitio, es

²² Respecto a las normas internacionales enmarcadas en un sistema de Cap and Trade como lo es el de California y de Quebec, Canadá.

decir que cada relleno podrá compensar en certificados la totalidad de sus emisiones que reportadas.

Respecto a lo anterior las zonas se representarían en lo siguiente, por un lado, la zona de cumplimiento sería de cero, ya que el límite de cantidad máxima acumulada y el límite de excedencia serían los mismos, asociados a los límites de los escenarios antes establecidos. Por otro lado, la zona de compensación está asociado al 100% de las emisiones que se le permitiría emitir al regulado, ya que esto es lo que estaría permitido compensar. Por un extremo está la zona de sanción que se encuentra sobre este valor antes mencionado (100% de las emisiones permitidas) y la zona de excedentes sería la inmediata al sobre cumplimiento del límite normativo, permitiendo generar excedentes por cada tonelada de CO₂ equivalente debajo del límite de emisión normado.

La Figura 6-24 grafica la **cantidad máxima acumulada** y el **umbral de excedencia** a nivel general que rigen a todos los escenarios normativos, siguiendo los antecedentes descritos en la Sección 6.4.4 para definir el límite emisión del sector para los hitos de los años 2030 y 2050 y dejando libre el límite máximo para compensar, en base a principios de costo-eficiencia.

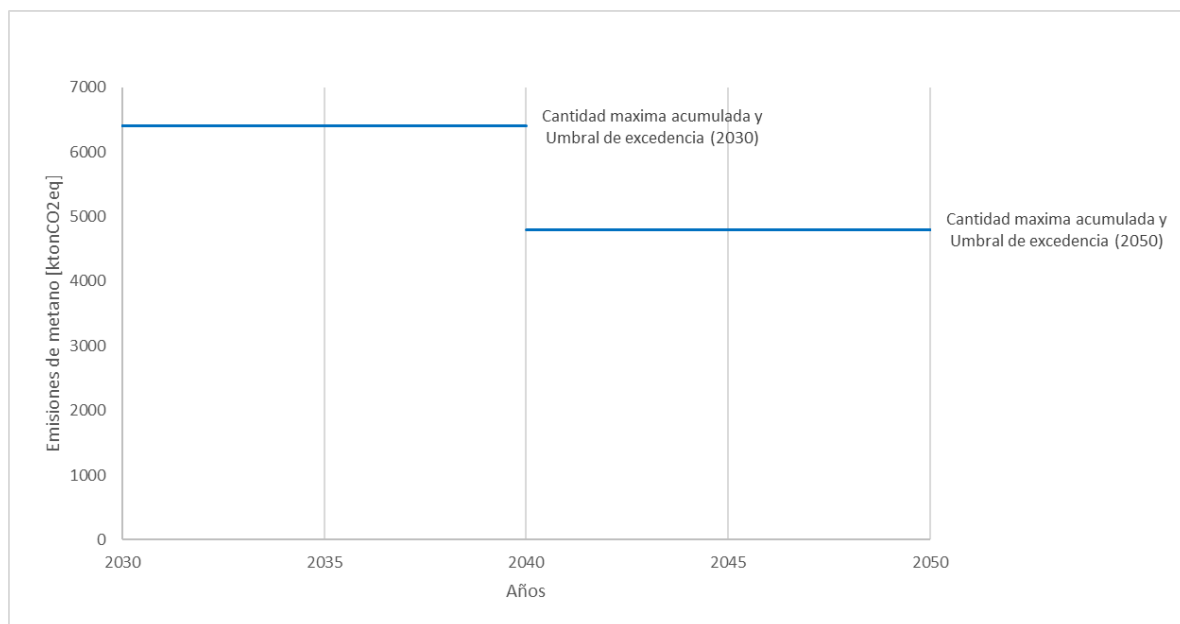


Figura 6-24 Umbrales generales para los escenarios de norma de emisión de metano para rellenos sanitarios, período 2030-2050, en ktCO₂eq.

Fuente: Elaboración propia, anexo digital "NEMetano-EscenariosNorma.xlsm"

La Tabla 6-23 a Tabla 6-36, presentadas en la Sección 6.5.2, describen la cantidad máxima de certificados que podrán comprar y emitir los rellenos sanitarios bajo ambos esquemas de norma (en base a metas 2030 y metas 2050) de acuerdo a los escenarios distributivos descritos en la Sección 6.4.4.2.

6.5.1 Estándar tecnológico de referencia

Para garantizar la factibilidad del cumplimiento normativo, se presentan las mejores técnicas disponibles que habilitan a los futuros regulados alcanzar las tasas de mitigación requeridas en cada uno de los escenarios distributivos, ya sea en función del límite estático al 2050 (Escenario Temporal 1, ET1) o según los límites escalonados entre los períodos 2030-2040 y 2040-2050 (Escenario Temporal 2, ET2). Toda la información utilizada y los resultados obtenidos se encuentra disponible en el anexo digital “NEMetano-Estandar_Referencia.xlsx”.

De acuerdo con la información presentada en la Sección 5.1.2, las tecnologías deben incorporarse entre sí para generar combinaciones tecnológicas con tasas de mitigación variables según sus condiciones de operación (Tabla 6-30), las cuales se caracterizan como:

- Condiciones mínimas o peores de operación (Min).
- Condiciones nominales o promedio de operación (Nom).
- Condiciones máximas o mejores de operación (Max).

Tabla 6-30 Eficiencia mínima, nominal y máxima de captura, destrucción y oxidación por tecnología

Parámetro	Tecnología	Min (%)	Nom (%)	Máx (%)
Eficiencia Captura	Activa	40	50	80
Eficiencia Captura	Pasiva	20	30	50
Eficiencia Destrucción	Valorización Energ.	-	96	-
Eficiencia Destrucción	Antorcha	95	97	99
Oxidación	Biofiltro	50	60	70
Oxidación	Convencional	-	10	-
Oxidación	Biocobertura	-	32	-

Fuente: Elaboración propia

Además, se definen siete combinaciones tecnológicas, las cuales se utilizan para la definición de los distintos escenarios propuestos. La Tabla 6-31 presenta información sobre las fórmulas y descripción considerada para obtener las eficiencias de las siguientes cadenas tecnológicas:

- Pasivo + Biocobertura.
- Pasivo + Biofiltro.
- Pasivo + Biofiltro + Biocobertura.
- Activo + Antorcha.
- Activo + Valorización.
- Activo + Antorcha + Biocobertura.
- Activo + Valorización + Biocobertura.

Tabla 6-31 Fórmulas y descripción considerada para eficiencias cadenas tecnológicas

Cadenas_Tecn	Descripción captura/descripción/oxidación cadena	Fórmula para eficiencia combinación
Pasivo + Biocobertura	1) El metano generado se captura por sistema pasivo. 2) Lo no capturado, lo oxida la cobertura convencional. 3) Lo no oxidado, lo oxida la biocobertura.	$(\text{EficCapt}_{\text{PAS}}) + ((1 - \text{EficCapt}_{\text{PAS}}) \cdot \text{Ox}) + ((1 - \text{EficCapt}_{\text{PAS}}) \cdot (1 - \text{Ox}) \cdot \text{Ox}_{\text{BC}})$
Pasivo + Biofiltro	1) El metano generado se captura por sistema pasivo. 2) Lo capturado se conduce a un biofiltro. 3) Lo no capturado, lo oxida la captura convencional.	$(\text{EficCapt}_{\text{PAS}} \cdot \text{EficDest}_{\text{BF}}) + ((1 - \text{EficCapt}_{\text{PAS}}) \cdot \text{Ox})$
Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	1) El metano generado se captura por sistema pasivo. 2) Lo capturado se conduce a un biofiltro. 3) Lo no capturado, lo oxida la cobertura convencional. 4) Lo no oxidado, lo oxida la biocobertura.	$(\text{EficCapt}_{\text{PAS}} \cdot \text{EficDest}_{\text{BF}}) + ((1 - \text{EficCapt}_{\text{PAS}}) \cdot \text{Ox}) + ((1 - \text{EficCapt}_{\text{PAS}}) \cdot (1 - \text{Ox}) \cdot \text{Ox}_{\text{BC}})$
Activo + Antorcha	1) El metano generado se captura por sistema activo. 2) Lo capturado es destruido por la antorcha. 3) Lo no capturado, lo oxida la cobertura convencional.	$(\text{EficCapt}_{\text{ACT}} \cdot \text{EficDest}_{\text{ANT}}) + ((1 - \text{EficCapt}_{\text{ACT}}) \cdot \text{Ox})$
Activo + Valorización	1) El metano generado se captura por sistema activo. 2) Lo capturado es destruido por valorización. 3) Lo no capturado, lo oxida la cobertura convencional.	$(\text{EficCapt}_{\text{ACT}} \cdot \text{EficDest}_{\text{VAL}}) + ((1 - \text{EficCapt}_{\text{PAS}}) \cdot \text{Ox})$
Activo + Antorcha + Biocobertura	1) El metano generado se captura por sistema activo. 2) Lo capturado es destruido por la antorcha. 3) Lo no capturado, lo oxida la cobertura convencional. 4) Lo no oxidado, lo oxida la biocobertura.	$(\text{EficCapt}_{\text{ACT}} \cdot \text{EficDest}_{\text{ANT}}) + ((1 - \text{EficCapt}_{\text{ACT}}) \cdot \text{Ox}) + ((1 - \text{EficCapt}_{\text{ACT}}) \cdot (1 - \text{Ox}) \cdot \text{Ox}_{\text{BC}})$
Activo + Valorización + Biocobertura	1) El metano generado se captura por sistema activo. 2) Lo capturado es destruido por valorización. 3) Lo no capturado, lo oxida la cobertura convencional. 4) Lo no oxidado, lo oxida la biocobertura.	$(\text{EficCapt}_{\text{ACT}} \cdot \text{EficDest}_{\text{VAL}}) + ((1 - \text{EficCapt}_{\text{ACT}}) \cdot \text{Ox}) + ((1 - \text{EficCapt}_{\text{ACT}}) \cdot (1 - \text{Ox}) \cdot \text{Ox}_{\text{BC}})$

Fuente: Elaboración propia

Con la información anterior, se obtienen los rangos de reducción por cadena tecnológica al aplicar las fórmulas para todas las combinaciones posibles de eficiencias. En la Tabla 6-32 se presentan los valores de reducción mínima, nominal y máxima por cadena tecnológica.

Tabla 6-32 Eficiencia de reducción captura por cadena tecnológica

Cadena Tecnológica	Captura Mín.	Captura Nom.	Captura Máx.
Pasivo + Biocobertura	50%	60%	70%
Pasivo + Biofiltro	20%	25%	40%
Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	40%	45%	55%
Activo + Antorcha	45%	55%	80%
Activo + Valorización energética	45%	55%	80%
Activo + Antorcha + Biocobertura	60%	70%	90%
Activo + Valorización + Biocobertura	60%	65%	85%

Fuente: Elaboración propia

Luego, se define el estándar de referencia de cada escenario anteriormente propuesto, en la Tabla 6-33 se presenta la tecnología de referencia mínima para los escenarios distributivos. Se observa que según el factor%BAU se determina la reducción requerida y su tecnología mínima asociada. Luego, para las tecnologías consideradas se presentan rangos de reducción esperados. Sin embargo, las eficiencias efectivamente utilizadas para alcanzar el porcentaje exacto de reducción pueden no coincidir estrictamente con los valores mínimo, nominal y máximo de

referencia indicados entre paréntesis, sino corresponder a valores intermedios dentro de esos rangos.

Además, en aquellos casos donde un relleno sanitario implemente las tecnologías bajo condiciones operacionales más eficientes a las consideradas como referencia, es posible obtener reducciones de emisiones mayores a las requeridas por el escenario evaluado. Esto permitiría generar reducciones excedentes, las cuales se traducen en beneficios adicionales asociados a la participación en mecanismos de compensación o mercados de carbono.

Tabla 6-33 Tecnología de referencia mínima para los escenarios distributivos

Esc.	Region	Tamaño	k_Organ	Año	Factor %BAU	% Reducc. Requerido	Tecnología Referencia Mínima	Rango Reducc.	Efic. requerida% (Mín-Nom-Máx%)
ED1	-	-	-	2030	70%	30%	Pasivo + Biofiltro	20 – 40%	Pas = 39% (20-30-50%) Biof = 60% (50-60-70%)
				2050	37%	63%	Activo + Antorcha	45 – 80%	Act = 61% (40-50-80%) Ant = 97% (95-97-99%)
ED2	-	Grande	-	2030	58%	42%	Activo + Antorcha	45 – 80%	Act = 40% (40-50-80%) Ant = 95% (95-97-99%)
				2050	23%	77%	Activo + Antorcha	45 – 80%	Act = 77% (40-50-80%) Ant =97% (95-97-99%)
		Mediano		2030	85%	15%	Pasivo + Biofiltro	20 – 40%	Pas = 20% (20-30-50%) Biof = 50% (50-60-70%)
				2050	47%	53%	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	40 – 55%	Pas = 47% (20-30-50%) Biof = 68% (50-60-70%)
		Pequeño		2030	100%	0%	-	-	-
				2050	84%	16%	Pasivo + Biocobertura	50 –70%	Pas = 20% (20-30-50%)
ED3	RM	-	-	2030	50%	50%	Activo + Antorcha	45 – 80%	Act = 47% (40-50-80%) Ant = 95% (95-97-99%)
				2050	21%	79%	Activo + Antorcha	45 – 80%	Act = 79% (40-50-80%) Ant = 97% (95-97-99%)
	-	Grande	Seco	2030	70%	30%	Activo + Antorcha	45 – 80%	Act = 40% (40-50-80%) Ant = 95% (95-97-99%)
				2050	30%	70%	Activo + Antorcha	45 – 80%	Act = 68% (40-50-80%) Ant = 97% (95-97-99%)
			Húmedo	2030	60%	40%	Activo + Antorcha	45 – 80%	Act = 40% (40-50-80%) Ant = 95% (95-97-99%)
				2050	25%	75%	Activo + Antorcha	45 – 80%	Act = 75% (40-50-80%) Ant = 97% (95-97-99%)
		Mediano	Seco	2030	100%	0%	-	-	-
				2050	56%	44%	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	40 – 55%	Pas = 30% (20-30-50%) Biof = 55% (50-60-70%)
			Húmedo	2030	94%	6%	Pasivo + Biofiltro	20 – 40%	Pas = 20% (20-30-50%) Biof = 50% (50-60-70%)
				2050	43%	57%	Activo + Antorcha	45 – 80%	Act = 54% (40-50-80%) Ant = 97% (95-97-99%)
		Pequeño	Seco	2030	100%	0%	-	-	-
				2050	75%	25%	Pasivo + Biocobertura	50 –70%	Pas = 20% (20-30-50%)
			Húmedo	2030	100%	0%	-	-	-
				2050	90%	10%	Pasivo + Biocobertura	50 –70%	Pas = 20% (20-30-50%)

Fuente: Elaboración propia

6.5.2 Cantidad máxima de certificados permitidos

Para todos los escenarios de norma, se evalúa la aplicación de la norma considerando que el 100% del límite de emisión pueda ser cumplido mediante certificados de excedencia, provenientes del mismo o sector u otros. Por lo tanto, la cantidad máxima de certificados durante toda la vigencia de la norma para cada escenario distributivo es equivalente a los valores presentados en la Tabla 6-34, Tabla 6-35 y Tabla 6-36.

Tabla 6-34 Certificados de excedencia permitidos por unidad fiscalizable para el cumplimiento de la norma de emisión, Escenario Distributivo 1

N	ID	Nombre de la unidad fiscalizable	Certificados permitidos bajo metas CN(2030)	Certificados permitidos bajo metas CN(2050)
1	095	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	1.962.546	1.365.946
2	096	Relleno Sanitario Santa Marta	677.799	490.697
3	097	Relleno Sanitario Santiago Poniente	571.958	424.689
4	029	Relleno Sanitario El Molle	274.623	249.495
5	041	Relleno Sanitario Los Angeles	329.905	204.082
6	035	Relleno Sanitario Colihues La Yesca	302.281	235.142
7	019	Relleno Sanitario El Panul	215.728	214.072
8	042	Relleno Sanitario Cemarc	298.287	185.398
9	037	Relleno Sanitario El Retamo	242.650	172.707
10	103	Relleno Sanitario Fundo Las Cruces	217.585	164.644
11	038	Relleno Sanitario Parque El Guanaco	196.274	145.477
12	030	Relleno Sanitario San Pedro	157.425	145.232
13	006	Relleno Sanitario Chaqueta Blanca	96.076	114.624
14	001	Relleno Sanitario Santa Ines	71.392	41.857
15	056	Relleno Sanitario La Laja	191.960	162.352
16	045	Relleno Villarrica	139.287	83.245
17	046	Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte	102.543	82.130
18	031	CTI La Hormiga	69.316	64.405
19	014	Relleno Sanitario El Chulo	53.944	49.822
20	007	Relleno Sanitario Cerro Colorado	40.273	44.084
21	070	Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemarc	31.529	26.727
22	039	Relleno Sanitario San Roque	30.822	25.060
23	051	Relleno Sanitario de Coipue	29.852	22.094
24	015	Relleno Sanitario Provincial del Huasco	23.481	20.954
25	044	Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue	20.798	14.838
26	036	Relleno Sanitario Las Quilas	17.111	14.864
27	071	Centro de Disposición Final de Residuos Solidos de Aysen (CDFRS-Aysen)	8.738	8.883
28	008	Relleno Sanitario Quebrada Ancha	7.069	7.984
29	016	Relleno Sanitario Cerro Montevideo	5.640	5.167
30	010	Relleno Sanitario San Pedro de Atacama	2.623	3.160
31	017	Relleno Sanitario Diego de Almagro	1.934	2.750

N	ID	Nombre de la unidad fiscalizable	Certificados permitidos bajo metas CN(2030)	Certificados permitidos bajo metas CN(2050)
32	075	Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane	1.826	1.683
33	003	Relleno Sanitario Manual de Pica	1.527	1.647
34	074	Relleno Sanitario Puerto Ibañez	1.597	1.350
35	040	Centro de Tratamiento Eco Maule	1.728	1.333
36	069	Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufu	1.125	817
37	078	Relleno Sanitario Villa O'Higgins	310	283
38	013	Relleno Sanitario Manual de Ollagüe	63	72
39	005	Relleno Sanitario Camiña	164	31
40	101	Relleno Sanitario Camarones	212	205
			6.400.000	4.800.000

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-35 Certificados de excedencia permitidos por unidad fiscalizable para el cumplimiento de la norma de emisión, Escenario Distributivo 2

N	ID	Nombre de la unidad fiscalizable	Certificados permitidos bajo metas CN(2030)	Certificados permitidos bajo metas CN(2050)
1	095	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	1.621.388	847.224
2	096	Relleno Sanitario Santa Marta	559.974	304.353
3	097	Relleno Sanitario Santiago Poniente	472.532	263.412
4	029	Relleno Sanitario El Molle	226.884	154.748
5	041	Relleno Sanitario Los Angeles	272.556	126.581
6	035	Relleno Sanitario Colihues La Yesca	365.990	298.033
7	019	Relleno Sanitario El Panul	261.195	271.328
8	042	Relleno Sanitario Cemarc	361.154	234.985
9	037	Relleno Sanitario El Retamo	293.790	218.900
10	103	Relleno Sanitario Fundo Las Cruces	263.443	208.680
11	038	Relleno Sanitario Parque El Guanaco	237.640	184.387
12	030	Relleno Sanitario San Pedro	190.604	184.076
13	006	Relleno Sanitario Chaqueta Blanca	116.326	145.282
14	001	Relleno Sanitario Santa Ines	86.439	53.052
15	056	Relleno Sanitario La Laja	232.418	205.774
16	045	Relleno Villarrica	198.404	188.570
17	046	Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte	146.064	186.044
18	031	CTI La Hormiga	98.735	145.894
19	014	Relleno Sanitario El Chulo	76.840	112.860
20	007	Relleno Sanitario Cerro Colorado	57.365	99.861
21	070	Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemarc	44.911	60.543
22	039	Relleno Sanitario San Roque	43.904	56.767
23	051	Relleno Sanitario de Coipue	42.522	50.047
24	015	Relleno Sanitario Provincial del Huasco	33.447	47.465
25	044	Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue	29.625	33.613
26	036	Relleno Sanitario Las Quilas	24.373	33.670
27	071	Centro de Disposición Final de Residuos Solidos de Aysen (CDFRS-Aysen)	12.447	20.121
28	008	Relleno Sanitario Quebrada Ancha	10.069	18.087

N	ID	Nombre de la unidad fiscalizable	Certificados permitidos bajo metas CN(2030)	Certificados permitidos bajo metas CN(2050)
29	016	Relleno Sanitario Cerro Montevideo	8.034	11.704
30	010	Relleno Sanitario San Pedro de Atacama	3.736	7.157
31	017	Relleno Sanitario Diego de Almagro	2.755	6.230
32	075	Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane	2.601	3.812
33	003	Relleno Sanitario Manual de Pica	2.175	3.730
34	074	Relleno Sanitario Puerto Ibañez	2.274	3.057
35	040	Centro de Tratamiento Eco Maule	2.461	3.020
36	069	Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufu	1.602	1.852
37	078	Relleno Sanitario Villa O'Higgins	441	640
38	013	Relleno Sanitario Manual de Ollagüe	90	163
39	005	Relleno Sanitario Camiña	233	69
40	101	Relleno Sanitario Camarones	302	464
			6.407.743	4.796.258

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-36 Certificados de excedencia permitidos por unidad fiscalizable para el cumplimiento de la norma de emisión, Escenario Distributivo 3

N	ID	Nombre de la unidad fiscalizable	Certificados permitidos bajo metas CN(2030)	Certificados permitidos bajo metas CN(2050)
1	095	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	1.397.748	773.552
2	096	Relleno Sanitario Santa Marta	482.736	277.888
3	097	Relleno Sanitario Santiago Poniente	407.355	240.507
4	029	Relleno Sanitario El Molle	273.825	201.846
5	041	Relleno Sanitario Los Angeles	281.954	137.588
6	035	Relleno Sanitario Colihues La Yesca	430.577	355.103
7	019	Relleno Sanitario El Panul	307.288	323.284
8	042	Relleno Sanitario Cemarc	399.394	214.986
9	037	Relleno Sanitario El Retamo	324.898	200.270
10	103	Relleno Sanitario Fundo Las Cruces	291.337	190.920
11	038	Relleno Sanitario Parque El Guanaco	262.802	168.694
12	030	Relleno Sanitario San Pedro	210.786	168.410
13	006	Relleno Sanitario Chaqueta Blanca	136.854	173.102
14	001	Relleno Sanitario Santa Ines	101.693	63.211
15	056	Relleno Sanitario La Laja	273.432	245.178
16	045	Relleno Villarrica	198.404	168.366
17	046	Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte	146.064	166.111
18	031	CTI La Hormiga	98.735	156.315
19	014	Relleno Sanitario El Chulo	76.840	120.921
20	007	Relleno Sanitario Cerro Colorado	57.365	106.993
21	070	Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemarc	44.911	54.056
22	039	Relleno Sanitario San Roque	43.904	50.685
23	051	Relleno Sanitario de Coipue	42.522	44.685
24	015	Relleno Sanitario Provincial del Huasco	33.447	50.855
25	044	Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue	29.625	36.014
26	036	Relleno Sanitario Las Quilas	24.373	30.063

N	ID	Nombre de la unidad fiscalizable	Certificados permitidos bajo metas CN(2030)	Certificados permitidos bajo metas CN(2050)
27	071	Centro de Disposición Final de Residuos Solidos de Aysen (CDFRS-Aysen)	12.447	17.966
28	008	Relleno Sanitario Quebrada Ancha	10.069	19.379
29	016	Relleno Sanitario Cerro Montevideo	8.034	12.540
30	010	Relleno Sanitario San Pedro de Atacama	3.736	7.668
31	017	Relleno Sanitario Diego de Almagro	2.755	6.675
32	075	Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane	2.601	3.403
33	003	Relleno Sanitario Manual de Pica	2.175	3.997
34	074	Relleno Sanitario Puerto Ibañez	2.274	2.730
35	040	Centro de Tratamiento Eco Maule	2.461	2.697
36	069	Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufu	1.602	1.653
37	078	Relleno Sanitario Villa O'Higgins	441	572
38	013	Relleno Sanitario Manual de Ollagüe	90	174
39	005	Relleno Sanitario Camiña	233	74
40	101	Relleno Sanitario Camarones	302	497
			6.428.089	4.799.630

Fuente: Elaboración propia

7. Análisis y sistematización de los elementos técnicos, operativos y regulatorios contenidos en el DS N°189 actualizado y Criterios de coherencia y complementariedad con otros instrumentos de gestión ambiental

Se menciona la modificación del objetivo e) de la presente consultoría, referida a “Proponer antecedentes técnicos que consideren y contribuyan a la actualización del DS 189 que regula el diseño y la operación de los rellenos sanitarios, que bajo el Plan Sectorial de Mitigación (PSM) del MINSAL se propone su actualización, ya otros instrumentos de gestión de calidad del aire y planes de prevención y descontaminación, tales como los Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica (PPDA) y el Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos, para asegurar que generen sinergias con la norma de emisión de metano para rellenos sanitarios”.

Debido al cierre del período de consulta pública del D.S. N°189, dicho objetivo pierde aplicabilidad en los términos originalmente planteados, por lo que se redefine el alcance del trabajo de mutuo acuerdo entre Equipo Consultor y Contraparte Técnica y se continúa con el siguiente objetivo:

- **“Analizar y sistematizar los elementos técnicos, operativos y regulatorios contenidos en el DS N°189 actualizado, que regula el diseño, construcción y operación de los rellenos sanitarios, con el fin de utilizarlo como línea base, estableciendo sinergias y compatibilidades con los productos de esta consultoría, para la definición de límites, exigencias y mecanismos de cumplimiento de la norma de emisión de metano para rellenos sanitarios, identificando además criterios de coherencia y complementariedad con otros instrumentos de gestión ambiental vigentes, tales como los Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica (PPDA), el Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos, entre otros instrumentos normativos y de gestión de residuos que resultan pertinentes, así como aspectos relevantes para el diseño de esquemas de monitoreo, reporte y verificación. (MRV) y de fiscalización, de modo de favorecer su aplicación coordinada y facilitar el cumplimiento normativo”.**

De esta manera, el énfasis del objetivo se modifica desde la formulación de antecedentes para una actualización del D.S. N°189 a este mismo ya actualizado, utilizándolo como referencia para asegurar coherencia, complementariedad y aplicabilidad efectiva de la futura norma de emisión de metano para rellenos sanitarios.

7.1 Identificación y sistematización de los elementos técnicos, operativos y regulatorios contenidos en el D.S. 189 actualizado

La identificación y sistematización del DS N°189 actualizado permite establecer una línea base sólida para la futura norma de emisión de metano, incorpora exigencias técnicas orientadas a

altos estándares de eficiencia en las condiciones de instalación de los sistemas de manejo de gases, la obligatoriedad restrictiva de sistemas de extracción activa de metano y un fortalecimiento general a los planes dictados por el decreto que forman parte del proyecto de ingeniería de R.S.

Respecto a los planes, las modificaciones integran:

- **Plan de operación:** Asegurar una gestión adecuada y segura de los rellenos sanitario, que contemple sistemas de manejo de biogás y lixiviados, mantención e inspección de maquinaria, entre varias actividades más.
- **Plan de emergencia:** Se modifica el nombre desde plan de contingencia a plan de emergencia, e integra nuevos contenidos mínimos como el sistema de manejo de biogás y las variables ambientales.
- **Plan de monitoreo y control:** Incorpora una gestión estructurada de los programas de seguimiento ambiental, que incluyen monitoreo de aguas superficiales, estabilidad geotécnica y condiciones estructurales.
- **Plan de cierre y post cierre:** Incluir el monitoreo de biogás y seguridad geotécnica.

Para sistematizar según aspectos técnicos, operativos y regulatorios las exigencias y límites propuestos en el D.S. N°189 actualizado, que incidan en la futura norma de emisión de metano para rellenos sanitarios fueron categorizados de la siguiente manera:

- **Diseño de ingeniería:** Presenta medidas, exigencias, y límites estructurales, de diseño respecto a la instalación y eficiencia de rellenos sanitarios.
- **Operación:** Establece nuevos contenidos mínimos, tales como sistemas de manejo de biogás, procedimiento de compactación de residuos, control y limpieza de residuos desplazados, coberturas, entre otros.
- **Monitoreo, reporte y fiscalización:** Se establece la gestión de seguridad y reportabilidad de datos obtenidos de monitoreos para el biogás, como de otros sistemas más.
- **Cierre y abandono:** Se presentan exigencias y medidas a considerar para el plan de cierre y abandono del R.S.
- **Exigencias de captura y gestión del biogás:** Se presentan obligaciones de captura activa y destrucción del biogás generado en el R.S.

7.1.1 Diseño de ingeniería

En la fase de diseño de ingeniería, se presenta a continuación una base en cuanto a lo establecido originalmente, tomando en cuenta las modificaciones, las cuales tienen un carácter preventivo y de aprovechamiento de biogás:

- **Zona de Protección:** Se establece un radio de 300 m alrededor de la instalación donde no se pueden construir viviendas ni servicios (reducibles justificadamente hasta 150 m para localidades de hasta 30 mil habitantes que hagan uso del servicio del R.S.), se podrá solicitar aprobaciones de menor distancia (no menores a 150 m) a la SEREMI justificada mediante estudios de olores, ruidos, material particulado, los cuales demuestren que no

se afectará a la población cercana. El relleno debe contener un cerco perimetral de 1.80 m de altura mínima, impidiendo el acceso de animales y personas ajenas, como también resguardar el área definida anteriormente.

- **Estabilidad geotécnica:** Los taludes durante la construcción de las celdas sanitarias y las pendientes de rellenos sanitarios con una altura mayor a 6 m, no deben ser superiores a 3H:1V para garantizar la seguridad del personal y la estabilidad de la masa de residuos. Debe incluir un estudio de trazabilidad y este debe contar con un programa de control y seguimiento de estabilidad geotécnica. Las pendientes de la superficie superior de las celdas deben estar dentro del rango de [2-5]%, para minimizar infiltración de aguas, y minimizar erosión o remoción de material de cobertura por escurrimiento de aguas.
- **Sistema de manejo de biogás:** Debe ser diseñado considerando una proyección anual de la generación de biogás, y establecer una secuencia constructiva para maximizar la extracción de biogás.

Todo relleno con una altura total igual o superior a 6 metros debe incluir un sistema de extracción de biogás activo, maximizando la captura de metano. El biogás debe ser sometido a un proceso de oxidación del metano, ya sea por valorización energética o uso de antorchas cerradas.

- **Valorización energética:** Debe garantizar una eficiencia no inferior al 98%. El porcentaje restante, que no pudo ser valorizado debe ser quemado.
- **Antorchas cerradas:** Deben asegurar una eficiencia mínima del 99%, operando a una temperatura mínima de 1.000°C con un tiempo de retención de gases de al menos 0,3 segundos.

El relleno debe considerar un sistema de extracción pasivo de biogás y un sistema de extracción, cuando técnicamente no sea posible procesar metano en antorchas cerradas.

- **Diseño de pozos, cabezales y tuberías:** Se debe considerar un diseño de pozos de extracción, estableciendo su distribución, tipo, ubicación, distanciamiento, profundidad y longitud, e incluir los cabezales de extracción, como válvulas para la regulación de la succión y toma de muestras. En cuanto a las tuberías, su diseño debe considerar la capacidad de conducción de la totalidad del biogás extraído, tener en cuenta la acumulación de líquidos condensados.
- **Lixiviados:** Todo proyecto de relleno sanitario debe considerar una estimación de generación de líquidos lixiviados y un sistema de impermeabilización en caso de determinar la existencia de lixiviados.

Si la población servida es:

- **Superior a 100.000 habitantes:** Debe considerar una membrana sintética con un espesor mínimo de 0,75 mm, y si es de polietileno de alta densidad el espesor debe ser mínimo 1,52 mm, colocadas sobre una capa de arcilla de 60 cm de espesor con una conductividad hidráulica máxima de 10^{-7} cm/s, o garantizar las mismas o mejores condiciones con doble capa.

- Inferior a 100.000 habitantes: Se debe tener como mínimo una capa de arcilla de 60 cm de espesor y una conductividad hidráulica máxima de 10^{-7} cm/s, o una capa de suelo que garantice condiciones iguales o mejores.

Para ambos la distancia entre el nivel freático más alto no deberá ser menor a 3 m, debiendo existir una capa de suelo con una conductividad hidráulica no superior a 10^{-5} cm/s. Si el balance hídrico demuestra que no existirá percolación ni el R.S. sirve a más de 20.000 habitantes se aceptará una impermeabilización basada en una capa de tierra con una conductividad hidráulica no superior a 10^{-5} cm/s.

7.1.2 Operación

- **Plan de Operación:** La modificación expande el plan de operación de un listado básico a un sistema de gestión integral. Se relacionan con mayor énfasis con el sistema de manejo activo de biogás y la futura norma de emisión de metano:
 - Sistema de pesaje y registro de residuos.
 - Sistema de manejo de lixiviados.
 - Sistema de manejo de biogás.
 - Procedimiento para la construcción de la cobertura diaria, intermedia y final.
 - Reciclaje de residuos.
 - Procedimientos de mantención e inspección de maquinaria, sistemas y equipos del relleno sanitario, tales como:
 - Equipos de protección personal.
 - Maquinaria de compactación, movimiento de tierra, vehículos, etc.
 - Sistema de pesaje y control de acceso.
 - Sistemas de manejo de lixiviados y de biogás.
 - Cobertura y sistema de impermeabilización.
 - Caminos de acceso e internos.
 - Señalética.
 - Otros más.
- **Construcción y Mecánica de Celdas**
 - Método de Compactación: Los residuos deben descargarse al pie de la celda y compactarse de abajo hacia arriba en capas de máximo 60 cm, pasando maquinaria pesada (tractor de oruga) al menos 4 veces sobre cada capa, con pendientes máximas a 3H:1V.
- **Sistemas de Cobertura**
 - Cobertura Diaria e Intermedia: La cobertura diaria e intermedia deben tener una conductividad hidráulica no mayor de 10^{-4} cm/s. La intermedia (para áreas sin uso por 2 meses) debe tener un espesor mínimo de 30 cm.
 - Cobertura Provisional: Cuando se alcance la altura final proyectada el R.S. debe ser tapado por una cubierta provisional de 60 cm con conductividad hidráulica de 10^{-5} cm/s y podrá ser parte de la cobertura final.

- Cobertura Final: Debe completarse en un plazo máximo de 365 días tras el cierre, con un espesor mínimo de 60 cm (nunca inferior a 30 cm si se usan materiales de menor permeabilidad) y una conductividad hidráulica de 10^{-5} cm/s. Incluye una capa de protección contra erosión de 15 cm de suelo vegetal.
- **Plan de emergencias**
 - Controles y monitoreos que permitan identificar situaciones de emergencia.
 - Medidas preventivas y de respuestas para cada amenaza identificada.

7.1.3 Monitoreo, reporte y fiscalización

Se establece un esquema de vigilancia orientado al cumplimiento de estándares de seguridad y reducción de emisiones:

- **Monitoreo Operacional de Biogás**
 - Límites de Explosividad: Todo relleno sanitario no puede exceder el 25% de su límite inferior de explosividad en cualquier ducto, estructura o edificación interna del sitio, superficies, exterior de pozos de captación ni componentes del sistema de extracción de biogás
 - Monitoreo de pozos: Se debe medir mensualmente en los cabezales de pozo la concentración de O_2 , CH_4 , CO_2 y la temperatura.
 - Límites de Oxígeno en el sistema de extracción: Al llegar al 2% se activa una alarma automática; al alcanzar el 4% el sistema de succión debe detenerse automáticamente para evitar incendios internos.
- **Monitoreo Estructural y de Cobertura**
 - Inestabilidad estructural: Si ocurren eventos de deterioro estructural, estos deben ser avisados inmediatamente, elaborar un análisis de estabilidad y ser evaluado por la autoridad sanitaria.
 - Coberturas: Deben ser controladas trimestralmente, o mayor frecuencia si es necesario, cuando corresponda reparar el espesor y pendientes de celdas.
- **Reporte y Transparencia**
 - Mensual: Los titulares deben informar antes del último día hábil sobre el mes anterior el origen y tipo de residuos ingresados al R.S., el estado del sistema de extracción de biogás, las cantidades de biogás extraído, valorizado y/o quemado, los resultados de monitoreos, estabilidad geotécnica, certificados de materiales, emergencias, y otros más.
 - Anual: A más tardar el 31 de marzo de cada año el informe debe incluir la capacidad utilizada y remanente de recepción de residuos, las toneladas y tipo de residuos anuales dispuestos, un plano a escala de las pendientes de la superficie del R.S. y una estimación de generación de biogás del año anterior y una proyección para el año en curso, además del total de biogás extraído y procesado del mismo año.
- **Fiscalización y Plazos de cierre y post cierre**

- La Autoridad Sanitaria supervisa el cumplimiento durante la operación y un periodo de post-cierre de al menos 20 años.
- Los rellenos existentes tienen 36 meses para actualizar sus proyectos y 60 meses para cumplir plenamente con el nuevo estándar. Sitios sin proyecto aprobado deben cerrar en un máximo de 5 años.

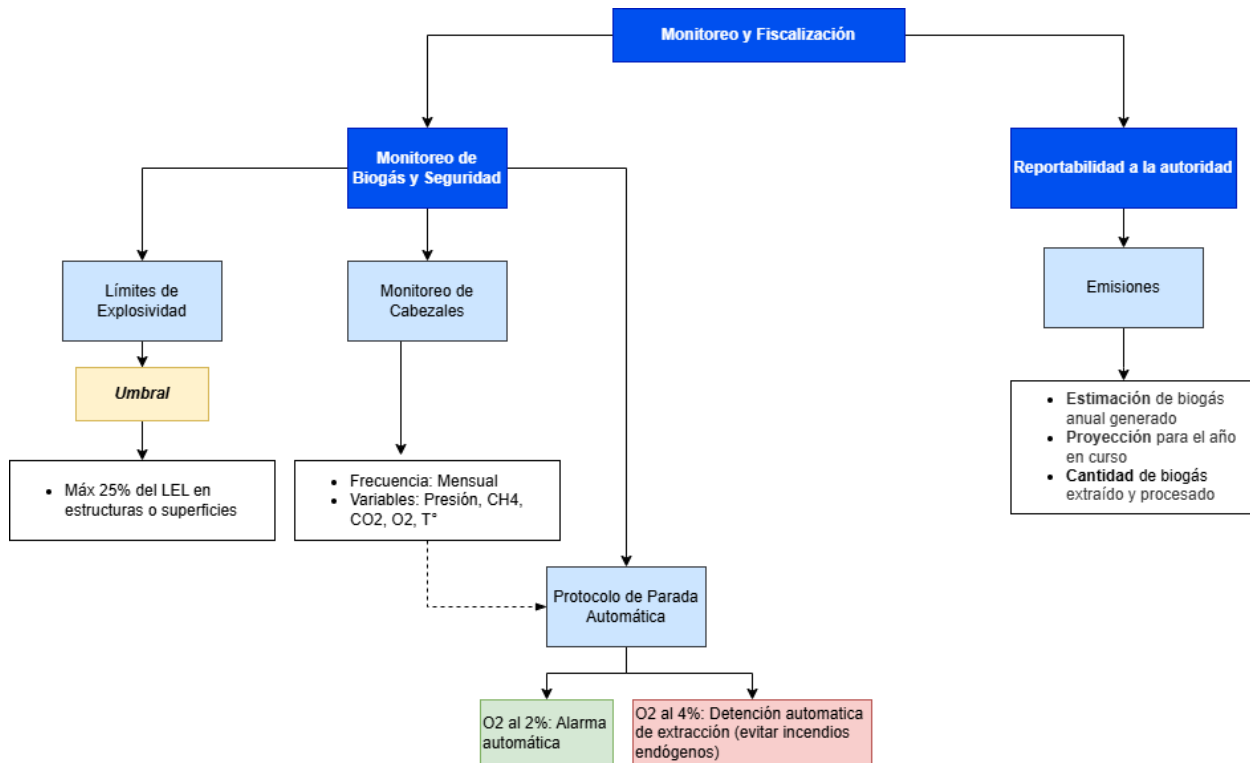


Figura 7-1 Sistematización de la gestión de monitoreo de biogás y reportabilidad a la autoridad sanitario del D.S. N°189 actualizado

Fuente: Elaboración propia en base al D.S. N°189 actualizado

7.1.4 Cierre y abandono

- Coberturas:** A más tardar de un año luego de finalizar la disposición de residuos en un R.S. se debe completar con una cobertura final para minimizar la infiltración de precipitaciones y evitar la salida de biogás. Debe tener un espesor de al menos 60 cm y una conductividad hidráulica inferior o igual a 10^{-5} cm/s. Puede utilizar inferiores a 60 cm si la permeabilidad de la capa es menor o igual a 10^{-5} cm/s, sin embargo, no puede ser inferior a 30 cm. Además, debe incluir una capa contra la erosión de al menos 15 cm de espesor y esta debe ser capaz de sostener vegetación si esta corresponde a la zona.
- Mantención y monitoreo:** El plan debe ser de al menos 20 años, y debe contemplar mantención de cobertura final, mantención y control de escorrentías superficiales,

mantención y operación de sistema de lixiviados y manejo de biogás, monitoreo aguas subterráneas y de biogás, como también vigilancia de estabilidad geotécnica.

7.1.5 Exigencias de captura y gestión del biogás

Uno de los puntos centrales que deben sistematizarse desde la propuesta de actualización del DS189 es la exigencia estipulada de captura y destrucción del biogás, el cual contiene el gas de efecto invernadero a normar, dado que la futura norma integra un sistema de transacción de emisiones en función con lo que habilita el Art. 15 de la LMCC y su propuesta de reglamento, donde sólo pueden emitirse certificados de excedencia por aquella mitigación que es “adicional”, lo cual se define como:

“Se entenderá que una reducción o absorción de emisiones es adicional cuando, considerando todas las políticas y legislación nacional, ésta no se hubiera implementado sin los incentivos financieros obtenidos por la venta de certificados de reducción o absorción de emisiones generados por el respectivo proyecto. Asimismo, la reducción o absorción de emisiones originada a partir de la ejecución de un proyecto debe representar una mitigación que exceda toda exigencia establecida por la ley y normativa vigente.”

Ahora, la propuesta de actualización del DS189 sí establece una obligación de captura y destrucción de metano para los rellenos sanitarios que atiendan a más de 20.000 [habitantes] o que reciban una carga orgánica mayor o igual a 4.000 [t/año]. Ésta establece literalmente que “Todo proyecto de Relleno Sanitario que de disposición final a los residuos generados por una población igual o superior a 20.000 habitantes o que disponga anualmente 4.000 ton o más de residuos orgánicos, deberá contemplar un sistema de manejo de biogás que incluya un sistema de extracción activo, diseñado y operado de forma que permita la extracción de la **mayor cantidad posible de metano durante su ciclo de vida**, además se deberá contar equipos que permitan determinar y registrar de manera continua la cantidad de gas extraída, así como la tratada. No obstante, los Rellenos Sanitarios que tengan una altura total inferior a seis metros quedaran exceptuados de esta obligación.”.

Considerando ambos antecedentes, el Equipo Consultor realiza un levantamiento de líneas base de captura y destrucción mínima que se han interpretado en distintos instrumentos para entregar antecedentes que permitan orientar la discusión técnica en cuanto a alcanzar mayor especificidad respecto a qué comprende “lo máximo posible”, dada la necesidad de establecer un umbral para evaluar la adicionalidad de las reducciones que se lograrán.

7.1.5.1 Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA)

Se revisan las RCA de los rellenos sanitarios más grandes del país (Santa Marta, Santiago Poniente y Loma Los Colorados respectivamente) y se determina que en 2 de éstos se establecen obligaciones de extraer y quemar ciertos porcentajes del biogás generado por los residuos acumulados, lo cual puede interpretarse, como parte de aquello, la obligación de generar ciertas

reducciones de GEI por motivos diferentes a las metas de la Ley Marco de Cambio Climático, pero que constituyen una reducción que independientemente de los instrumentos de carbono se habría generado de todas maneras.

- RCA 266/2008 “Captura y quema de biogás del Relleno Sanitario Santiago Poniente”: establece en el numeral 3.3.1 un **compromiso a quemar al menos un 5% del biogás generado**.
- RCA 509/2005 “Manejo de biogás del Relleno Sanitario Santa Marta”: establece en el numeral 5.1.11 la **obligación de quemar el 5% del biogás generado**.
- RCA 391/2006 “Ampliación del sistema de abatimiento de biogás; sistema de captación termo degradación y utilización energética en el marco del mecanismo para un desarrollo limpio en el Relleno Sanitario Loma Los Colorados” y RCA 344/2010 “Central Loma Los Colorados”: no establecen obligaciones de quemar biogás en proporciones específicas, como en el caso de Santa Marta o Santiago Poniente.

Este antecedente señala de que en el contexto regulatorio del DS189 y los Instrumentos de Gestión Ambiental emanados de la Ley 19.300 que son aplicables a este tipo de proyectos que presentan un riesgo a la salud de las personas, existen exigencias vigentes de captura y destrucción de biogás que se traducen en acciones de mitigación del GEI a normar.

7.1.5.2 Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL)

Los MDL fueron creados a partir del Art. 12 del Protocolo de Kyoto con el objetivo de que los países desarrollados cumplan con parte de sus compromisos de reducción de emisiones de GEI y que los países en vías de desarrollo se beneficien de las actividades de proyectos que generen certificados de carbono. Para emitir créditos, los proyectos deben cumplir con el requisito de **adicionalidad**.

Varios Rellenos Sanitarios han optado por participar en Mecanismos de Desarrollo Limpio, para lo cual deben presentar formularios de Diseño de Proyecto (CDM PDD, por sus siglas en inglés). Estos documentos de diseño de proyecto establecen factores de ajuste para determinar la adicionalidad de las reducciones en base a la mitigación que está obligada previamente por regulaciones sectoriales o nacionales. La Tabla 7-1 presenta los factores de ajuste sistematizados en dichos documentos que fueron presentados ante la Mesa Ejecutiva de los MDL, los cuales se presentan además como Anexos Digitales de este producto.

Tabla 7-1 Factores de línea base normativa por el DS189 para los MDL

Proyecto	Factor de ajuste (%)	Eficiencia de captura (%)	Tiempo de acreditación (años)
Agrupación1	4	75	10
Agrupación2	5 (La Hormiga) 0 (El Belloto)	70	10
Copiulemu	17	85-90	7 renovable
Coronel	2,5	60	10
Cosmito	10	60	7 renovable
El Panul	5	60	10
El Empalme	3	65	10
El Guanaco	5	92.8	7 renovable
El Molle	20	75	7 renovable
El Retamo	5	92.8	7 renovable
Fundo las cruces	6	70	7 renovable
Lepanto	4	50	7 renovable
Loma Los Colorados	1,4-1,5	92.8	7 renovable
Los Angeles	0	60	7 renovable
Santa Marta	5	65	7 renovable

Fuente: Elaboración propia en base a MDL

Como se aprecia en la Tabla 7-1, los factores de ajuste, entendidos como qué parte de la captura se considera como línea base, y que van desde un 0% a un 20%, pueden considerarse a una obligación de lo que cada relleno sanitario hace a la fecha y qué su justificación proviene de razones de seguridad del relleno y de la normativa aplicable a esa fecha (DS189).

7.1.5.3 Síntesis de exigencias de captura y gestión del biogás identificadas

Dado que las resoluciones de calificación ambiental son documentos administrativos oficiales emitidos por el Servicio de Evaluación Ambiental, los cuales establecen obligaciones para los titulares de sus respectivos proyectos, es importante considerar que al menos para 2 de los 3 mayores emisores de GEI del país se encuentran obligados como mínimo a quemar el 5% del biogás generado en sus instalaciones, lo cual se traduce en una mitigación base del 5% de los GEI generados por la digestión anaeróbica del carbono descomponible presente en los rellenos sanitarios.

Por otro lado, para participar en el antiguo Mecanismo para un Desarrollo Limpio de la UNFCCC, se realizaron diversas interpretaciones de cuál era la línea base de captura y quema de biogás, por lo cual no es posible en base a estos antecedentes converger a un valor único. No obstante, este valor ronda entre un 0 y un 20%, entendiendo con esto que existieron distintas obligaciones asociadas al cumplimiento normativo a la fecha en términos de exigencias operativas y de seguridad asociadas a los rellenos sanitarios (DS189 vigente a la fecha y sus RCA).

7.2 Síntesis de sinergias y compatibilidades con el DS189 como línea base

Luego de identificar los elementos técnicos, operativos y regulatorios provenientes de la propuesta de actualización del DS189/2005 del MINSAL, que son aplicables a los futuros regulados por la futura norma de emisión de metano, se compila que las exigencias base de la primera normativa facilitan el análisis y la definición de límites de concentración de metano, estándares de eficiencia para la valorización energética o quema, así como el fortalecimiento y complementariedad de los mecanismos de MRV y Fiscalización de deberían incorporarse en la nueva norma de emisión.

Por su parte, los antecedentes recopilados para contextualizar la exigencia de captura y quema del DS189/2005 del MINSAL (ver Sección 7.1.5) indican que, estando vigente el DS189, históricamente se ha considerado, tanto en las RCA como en los proyectos MDL, un requisito base de reducción de emisiones de metano, mediante la destrucción del biogás, valores que se han situado en un rango entre 0 y 20%.

La propuesta de actualización del DS189/2005 del MINSAL establece una exigencia de captura y quema de lo máximo posible para cada regulado, lo cual nace con un objetivo de abordar riesgos sanitarios y de seguridad, y que se traduce en una obligación de mitigación del metano como GEI de interés a normar. Paralelamente, la futura norma de emisión fijará límites que mandatará a los regulados a alcanzar ciertas tasas de mitigación respecto a sus emisiones anuales. Dado este contexto normativo, los titulares de rellenos sanitarios deberán cumplir con la regulación más estricta dadas sus condiciones propias.

No obstante, se sugiere precisar numéricamente la exigencia de captura y quema de la propuesta de actualización del DS189/2005 del MINSAL, dado que tal y como está escrita actualmente es incompatible la participación de los rellenos sanitarios en mercados de carbono o esquemas de transacción de emisiones (ETS) debido al criterio de adicionalidad, ya que cualquier mitigación técnicamente posible sería en cumplimiento del DS189/2005. Esta limitación genera mayor rigidez para los regulados en el cumplimiento normativo, dado que elimina el componente de cumplimiento flexible que entrega el Art. 15 de la LMCC.

Es relevante y necesario que se mantenga un nivel de captura y quema en el DS 189 de acuerdo a sus objetivos sanitarios y de seguridad, no obstante, y como se mencionó en el párrafo anterior, resulta recomendable precisar este valor, que como mínimo permita cumplir con los objetivos del MINSAL, permitiendo eficiencia económica en el cumplimiento normativo. En caso de que este valor se encuentre definido, podría permitir la compatibilidad entre ambas regulaciones.

Sin perjuicio de lo anterior, se identifican los siguientes componentes del DS189 que presentan sinergias con la futura norma de emisión y su sistema de MRV y Fiscalización propuestos (ver Sección 5.2 y Sección 8.1):

- **Estándar tecnológico de referencia:** el DS189 exige tasas de eficiencia en la valorización energética y quema en antorcha del 98% y 99%, los cuales pueden incorporarse como parámetros en la modelación del estándar de referencia para el cumplimiento normativo (ver Sección 6.5.1 y Sección 9.2.2).
- **Estimación de biogás:** todo proyecto de relleno sanitario debe incluir una metodología de estimación de biogás y memorias de cálculo que justifican el diseño de los radios de influencia de los pozos, lo que sirve como base para verificar si el sistema está dimensionado para capturar el potencial real de emisión, además de ser antecedente para evaluar su capacidad en el mercado de emisiones.
- **Mecanismos de monitoreo para biogás:** relevantes al momento de analizar y evaluar las pérdidas de gas en el relleno sanitario. Esto considera:
 - **Cabezales de pozo:** Medir mensualmente en los cabezales de pozo la concentración de O₂, CH₄, CO₂ y la temperatura.
 - **Coberturas:** Trimestralmente evaluar su estado para identificar fugas.
- **Reportabilidad:** Se contempla una gestión de reportabilidad a la autoridad sanitaria, mensual como anual, considerando aspectos relevantes como origen y tipo de residuo, estado del sistema de extracción de biogás, cantidades valorizadas/quemadas de biogás, monitoreos, entre otros más. Esta debiese articularse junto con los reportes que se deberán entregar a la SMA.
- **Cierre y abandono:** Se considera que, al menos durante 20 años, se mantiene la operación y mantención del sistema de manejo de biogás, así como la ejecución de su monitoreo correspondiente.

7.3 Coherencia con otros Instrumentos (PPDA)

Luego de presentar los antecedentes y revisar la sinergia entre la propuesta de modificación del DS189 y la futura norma de emisión de metano, bajo las definiciones de los Art. 14 y 15 de la LMCC, se presenta una revisión de coherencia de esta última con otros instrumentos de gestión ambiental (particularmente los Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica).

7.3.1 Levantamiento de Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica

Se desarrolló una revisión sistemática de los Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) vigentes a nivel nacional con el propósito de identificar cómo estos instrumentos normativos abordan o eventualmente omiten las emisiones provenientes de rellenos sanitarios.

El levantamiento de información consistió en la recopilación oficial de los PPDA disponibles en el sitio web del Ministerio del Medio Ambiente, específicamente en la sección correspondiente a Planes de Prevención y Descontaminación Atmosférica. En particular se analizaron los PPDA de las siguientes regiones, comunas, ciudades y localidades:

- Ciudad de Tocopilla, Región de Antofagasta

- Localidad de Huasco, Región de Atacama
- Localidad de Andacollo, Región de Coquimbo
- Provincia de Quillota y comunas de Catemu, Panquehue y Llay Llay, Región de Valparaíso
- Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví, Región de Valparaíso
- Región Metropolitana
- Valle central de la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins
- Valle central de la provincia de Curicó, Región del Maule
- Comunas de Talca y Maule, Región del Maule
- Comunas de Chillán y Chillán Viejo, Región de Ñuble
- Comuna de Los Ángeles, Región del Biobío
- Ciudad de Concepción Metropolitano
- Comunas de Temuco y Padre Las Casas, Región de La Araucanía
- Comuna de Valdivia, Región de Los Ríos
- Comuna de Osorno, Región de Los Lagos
- Ciudad de Coyhaique, Región de Aysén

El análisis de cada PPDA incluyó la revisión de sus capítulos normativos, inventarios de emisiones, medidas estructurales, exigencias de monitoreo y disposiciones específicas asociadas a fuentes emisoras vinculadas a la gestión de residuos sólidos domiciliarios. En particular, se examinó si existían referencias expresas a rellenos sanitarios, a la combustión o valorización del biogás.

7.3.2 Resultados respecto complementariedad de PPDA con D.S. N°189

El foco central del análisis fue establecer una vinculación técnica y regulatoria entre los PPDA y el D.S. N°189, que regula las condiciones sanitarias y de seguridad de los rellenos sanitarios en Chile, especialmente considerando su actualización, que exige sistemas activos de captación de biogás y la quema en antorcha o valorización energética del gas recolectado.

Como resultado de la revisión sistemática de los PPDA vigentes, se identificaron dos hallazgos estructurales en relación con el tratamiento de los rellenos sanitarios. En primer lugar, los rellenos sanitarios no suelen ser considerados ni clasificados como grandes emisores dentro de los contaminantes normados por los PPDA. Esto se explica, por una parte, por su naturaleza sanitaria, en contraste con fuentes industriales, residenciales o comerciales normalmente reguladas; y por otro, porque en muchos casos estos sitios no cuentan con sistemas de quema activa del biogás, operando únicamente con ventilación pasiva. En consecuencia, una fracción relevante de sus emisiones corresponde a metano, gas que no se encuentra regulado por normas de calidad del aire, lo que contribuye a su baja visibilización dentro de estos instrumentos. En segundo lugar, la actualización del D.S. N°189 introduce una modificación sustantiva en el perfil de emisiones de los rellenos sanitarios. Se establece que aquellos rellenos con altura de celda superior a 6 metros y con capacidad técnica deben implementar sistemas activos de captación de biogás, con exigencias de eficiencia de destrucción del metano capturado de 99% para

chimenea cerrada y 98% para valorización energética. Esta obligación implica una transición desde un escenario de emisiones predominantemente asociado a ventilación (principalmente CH₄ y CO₂) hacia un escenario donde las emisiones corresponden mayoritariamente a productos de oxidación del biogás, tales como CO₂, CO y NO_x.

La revisión indica que los PPDA vigentes, debido a que su objetivo no busca controlar las emisiones de CO₂ y CH₄, sino que, de contaminantes locales, no incorporan de manera sistemática ni explícita el tratamiento de las emisiones provenientes de rellenos sanitarios.

Sin embargo, la actualización del D.S. N°189 modifica el marco operativo y tecnológico de estos sitios. En este contexto, se identifica la necesidad de fortalecer la coherencia y articulación entre los PPDA y la futura norma de emisión de metano para rellenos sanitarios y/o la actualización del D.S. N°189, de modo de incluirlos como fuentes emisoras de contaminantes locales en caso de aplicar, adecuada contabilización de emisiones y una aplicación coordinada de los instrumentos de gestión ambiental vigentes.

8. Propuesta de mecanismos de monitoreo para la fiscalización y cumplimiento de la futura norma y de la modificación del decreto supremo N°189/2005 MINSAL

Para la propuesta de mecanismo de monitoreo para la fiscalización y cumplimiento normativo se recopila información sobre las prácticas que se plasman en las normativas internacionales y de instrumentos técnicos relativos a la operatividad de los rellenos sanitarios. También se utiliza como información las capacidades actuales de algunos rellenos sanitarios que ya presentan tecnologías de monitoreo y seguimiento ambiental.

8.1 Determinar para cada solución tecnológica posibles mecanismos de monitoreo y fiscalización para el cumplimiento de la norma y del D.S. 189/2005 de MINSAL

8.1.1 Monitoreo para cumplimiento normativo

Los mecanismos de monitoreo para el cumplimiento de la normativa se estructuran considerando que no todos los parámetros pueden ser medidos de forma directa en terreno. En este contexto, la definición de una línea base se fundamenta en estimaciones técnicamente justificadas, especialmente para variables como la generación de biogás que es clasificada como emisión difusa, donde la medición directa presenta limitaciones operativas y metodológicas.

A partir de esta premisa, el monitoreo se organiza en dos enfoques complementarios entre sí, por una parte, los parámetros no medibles directamente se evalúan mediante modelos de estimación, balances de masa, factores de emisión y otras herramientas reconocidas, que permiten aproximar su comportamiento a lo largo del tiempo. Estas estimaciones deben ser actualizadas periódicamente en función de la evolución del relleno sanitario y la disponibilidad de nueva información.

Por otro lado, existen parámetros que sí pueden ser medidos de forma directa, tales como las concentraciones en puntos de muestreo, mediciones de flujo, condiciones meteorológicas, entre otras. Estos son monitoreados mediante instrumentación en terreno, campañas de muestreo y sistemas de registro continuo, lo que permite obtener datos empíricos confiables para la verificación del cumplimiento normativo.

La idea de contrastar una estimación contra un dato real no implica debilidad metodológica, sino una distinción fundamental entre dos tipos de parámetros que coexisten en el sistema de monitoreo:

- **Parámetros estimados:** El valor se obtiene mediante el ejercicio de cálculo a partir de variables indirectas o referenciales. Estos constituyen la línea base de cumplimiento y expresan el resultado ambiental de la intervención.

- **Parámetros medibles:** Los cuales cuentan con datos reales y verificables mediante instrumentación y que actúan como insumos que alimentan, validan y ajustan la estimación.

Para la propuesta de monitoreo no se incorporan todas las tecnologías mencionadas en el objetivo específico c), ya que se seleccionaron aquellas que cuentan con mayor respaldo en la literatura y para las cuales ya existen proyectos actualmente en desarrollo o implementación en el marco nacional e internacional.

Para el caso de medir el cumplimiento de la normativa de emisión de metano para rellenos sanitarios se hace una separación entre los sistemas de captura activa y captura pasiva, ya que existe distinción tecnológica entre estos. Para cuantificar emisiones y cumplir la norma, los rellenos sanitarios con captura activa y captura pasiva, tienen como propuesta utilizar la Ecuación 8-1 y Ecuación 8-2, respectivamente.

Ecuación 8-1 Emisiones fiscalizables para un relleno con captura activa

$$E_i = (G - C) * (1 - Ox) * (1 - Ox_B) + C * (1 - Et_A)$$

Donde:

- E_i : Emisión final de metano al año i del relleno sanitario.
- G : Generación de metano estimada para el relleno sanitario.
- C : Cantidad de metano capturado por el relleno sanitario.
- Ox : Tasa de oxidación por cobertura tradicional en el relleno sanitario.
- Ox_B : Tasa de oxidación por cobertura biológicamente activa²³ en el relleno sanitario.
- Et_A : Eficiencia de destrucción del metano por la tecnología vinculada a la captura activa

Ecuación 8-2 Emisiones fiscalizables para un relleno con captura pasiva

$$E_i = G * (1 - Ec) * (1 - Ox) * (1 - Ox_B) + G * Ec * (1 - Et_p)$$

Donde:

- E_i : Emisión final de metano al año i del relleno sanitario.
- G : Generación de metano estimada para el relleno sanitario.
- Ec : Factor de captura para el sistema de captura pasiva en el relleno sanitario.
- Ox : Tasa de oxidación por cobertura tradicional en el relleno sanitario.
- Ox_B : Tasa de oxidación por cobertura biológicamente activa en el relleno sanitario.
- Et_p : Eficiencia de destrucción del metano.

8.1.1.1 Definición de línea base: Generación

Actualmente la manera más efectiva y práctica de calcular la generación de biogás en un relleno sanitario es en base a una estimación usando metodologías de cálculo, como la de decaimiento

²³ Cobertura biológicamente activa: biocobertura

de primer orden del IPCC o el modelo LandGEM, Scholl Canyon, modelo mexicano de biogás, u otro similar.

Dado que se considera determinar la línea base según una modelación, los parámetros resultan ser la parte fundamental para definir la generación, por lo que estos valores deben ser seleccionados y asignados de forma rigurosa, establecidos de forma correspondiente a los distintos contextos de zonas climáticas y condiciones operacionales propias del relleno sanitario respectivo.

Así, la línea base de generación de biogás considera que todas las emisiones generadas son emitidas a la atmósfera, sin ninguna medida restrictiva que las contenga. Respecto a lo anterior es que se deben aplicar algunas reducciones, como lo es la oxidación biológica en la cobertura del relleno sanitario y lo que se debe considerar como requerimientos mínimos del DS 189. En particular, se suele utilizar una tasa de oxidación de una cobertura tradicional del 10%.

Debido a todo lo anterior es que se hace fundamental que, para el cumplimiento de la normativa, se deba definir un modelo a seguir y los parámetros a considerar en la línea base, donde los resultados de la modelación deben ser verificados por la Superintendencia de Medio Ambiente.

8.1.1.2 Sistema de captura activo

El sistema de captura activa extrae de manera forzada el biogás generado en el interior del relleno mediante una red de pozos verticales u horizontales conectados a un soplador o compresor. Es la solución tecnológica con mayor potencial de captura cuantificable, dado que el biogás transita por ductos instrumentados y operados en condiciones controladas. Para este tipo de sistema de captura se consideran las cadenas tecnológicas descritas en la Tabla 8-1.

Tabla 8-1 Cadenas tecnológicas para sistemas de captura activa de biogás

Tipo de captura	Tecnología de destrucción de lo capturado	Tecnología de destrucción de lo no capturado
Captura activa	Chimenea	-
	Chimenea	Biocobertura
	Valorización energética	-
	Valorización energética	Biocobertura

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de sistema de **captura activa** se propone que el monitoreo sea a través de la medición del flujo total de biogás recolectado anualmente antes de que este ingrese al sistema de chimenea o valorización y también medir la composición de este gas, específicamente el porcentaje de metano, con medición continua de ambos parámetros. Esto sigue la línea de lo que actualmente los rellenos sanitarios deben reportar por la Resolución exenta 431/2021²⁴ a la SMA.

²⁴ Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1156781&idVersion=2026-01-06&idParte=>

Para el monitoreo de las **tecnologías de destrucción** del metano capturado, se propone simplemente utilizar las eficiencias de destrucción entregadas por el titular con respaldo del fabricante.

Para el monitoreo de las **tecnologías de destrucción del metano no capturado** siendo tal caso el uso de las biocobertura, se propone utilizar valores típicos de porcentaje de oxidación con respaldo en literatura científica, sujeto a revisión por parte de la SMA.

Respecto a todo lo anterior, se propone que el cumplimiento de la norma sea de forma anual, en la que el titular registre lo capturado en todo el periodo, se apliquen los factores correspondientes a la Ecuación 8-1, y evaluar la zona (cumplimiento, excedencia y otros) en la que entraría.

8.1.1.3 Sistema de captura pasivo

El sistema de captura pasiva no interviene el flujo de biogás de manera forzada, sino que aprovecha la migración natural del gas hacia la superficie (por diferencia de presión) para conducirlo hacia tecnologías de tratamiento. Es la solución prevalente en rellenos de menor escala o en etapa de cierre y término de operación, donde el volumen de generación de biogás no justifica la extracción activa.

El sistema de captura pasiva es el sistema más básico para poder evacuar el biogás generado y así no permitir que se generen concentraciones explosivas dentro del relleno sanitario. Para este tipo de sistema de captura se consideran las cadenas tecnológicas descritas en la Tabla 8-2.

Tabla 8-2 Cadenas tecnológicas para sistemas de captura pasiva de biogás

Tipo de captura	Tecnología de destrucción de lo capturado	Tecnología de destrucción de lo no capturado
Captura pasiva	Biofiltro	-
	Biofiltro	Biocobertura
	-	Biocobertura

Fuente: Elaboración propia

Para el monitoreo del sistema de **captura pasivo, las tecnologías de destrucción de lo capturado y de lo no capturado**, se propone el uso de parámetros predeterminados de eficiencias de rendimiento para los distintos sistemas. Esto se debe a la naturaleza operativa propia de estos, la cual es relativamente estática (asumiendo un correcto mantenimiento) en el tiempo para un mismo relleno sanitario.

Considerando todo lo anterior, se propone que el cumplimiento normativo se realice de forma anual, considerando las cadenas tecnológicas que disponga cada sitio, y evaluar en que zona entraría respecto a su emisión.

8.1.2 Monitoreo complementario superficial

También se presenta el monitoreo superficial como una solución para verificar el correcto funcionamiento de la cobertura final del relleno sanitario y que también sobre la búsqueda de posibles fugas por movimiento del terreno. Este tipo de monitoreo es la medición instantánea de las concentraciones de metano a través de la superficie del relleno, tal como se detalla en la Sección 5.2.2.

Entonces se propone, adicional al monitoreo propuesto para el cumplimiento normativo, que los titulares realicen campañas de monitoreo superficial como medida complementaria. Si bien este monitoreo no evalúa la emisión (como flujo directo) del sitio, me indica la calidad operacional del relleno, en cuanto a la calidad de captura que está teniendo el sistema y sobre la capacidad de la cobertura de retener físicamente la emisión (además de la capacidad de oxidación típica).

El monitoreo superficial se suele mencionar en las normativas internacionales revisadas en la Sección 3.2.1, como medida de control de seguridad y se suele obligar su realización en periodos trimestrales en forma de campañas con entrega de reporte también de forma trimestral. En base a eso se propone que los titulares de los rellenos sanitarios realicen mediciones instantáneas en superficie de concentraciones de metano. Esta medición se puede realizar trimestralmente a través de una campaña de monitoreo de la superficial con medición instantánea del relleno con reporte posterior al término de la campaña o también se pueden ubicar sensores que midan la concentración de metano establecidos de forma fija y que trimestralmente se presente un reporte de lo registrado durante los meses.

Nuevamente, siguiendo la revisión internacional, se propone seguir los valores que norman sobre concentraciones. Entonces para el monitoreo con medición directa instantánea a través de la superficie del relleno, ninguna medición debe superara concentraciones de 500 ppmv y para las mediciones con sensores fijos (con distribución equidistante) el promedio de todos los registros de estos equipos en los meses, no debe superar una concentración de 25 ppmv.

8.2 Evaluar costos, actores y brechas para la implementación de cada mecanismo propuesto

8.2.1 Actores relevantes identificados y brechas de implementación

Se identifican los siguientes actores relevantes para la implementación de los mecanismos de monitoreo propuestos:

- Dueños u operadores de los rellenos sanitario.
- Autoridades (SMA, MINSAL).
- Proveedores de equipamiento de monitoreo.
- Entidades externas con mediciones satelitales.

En este contexto los dueños u operadores de los rellenos sanitarios resultan ser los principales actores en el monitoreo del cumplimiento normativo, ya que ellos son los que operan directamente el sitio y por ello cuentan con los datos de primera fuente sobre el funcionamiento de este, en cuanto al biogás capturado para el monitoreo del sistema de captura activa y la condición “in situ” para realizar el monitoreo superficial.

Las autoridades también son de los principales actores y tienen una influencia directa en verificar que los datos reportados sean verídicos y que cumplan con las normas respectivas. En este caso la autoridad directa en verificar el cumplimiento de la norma de emisión de metano para rellenos sanitarios es la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA). Mientras que por otro lado se tiene el Ministerio de Salud (MINSAL) el encargado de verificar el cumplimiento del DS 189/2008 sobre las condiciones mínimas de sanidad y seguridad en los rellenos sanitarios.

Por otro lado, se tienen las entidades externas, como lo son los proveedores de los equipos de monitoreo, de los cuales los dueños de los operadores dependen para tener los equipos necesarios para el funcionamiento de sus sistemas de medición y control, y las entidades con equipos de medición satelital, que tiene una medición externa sobre las emisiones de los rellenos sanitarios, lo que puede resultar útil para las autoridades para contrastar la información reportada por los regulados porque los operadores o titulares no tienen control sobre estas mediciones.

8.2.2 Brechas para la implementación de los mecanismos de monitoreo

8.2.2.1 Parámetros estimados

Dentro de las brechas que se pueden presentar para la implementación de los mecanismos de monitoreo está la de corroborar el cálculo de la estimación de generación de metano, el cual depende de datos desde el origen del relleno, es decir, una larga data en años, sumado a la composición orgánica, dato que también es muy complejo de conseguir de forma medida, por lo que también se debe estimar. En resumen, si bien el modelo de estimación utiliza datos medidos, no siempre se tiene el registro para toda la vida útil del sitio, lo que supone la necesidad de estimar y alejarse de la realidad.

Esto también se replica para algunos parámetros estimados, como las eficiencias de captura, eficiencia de destrucción, tasas de oxidación y otros, ya que estos valores en su mayoría provienen de estudios realizados en situaciones controladas e incluso algunos parámetros simplemente se asumen como de uso general. Las estimaciones que dependen de parámetros también estimados generan una cadena de supuestos que termina alejando el dato resultante de la realidad, lo que puede suponer que los titulares estimen la generación (u otro parámetro) a su favor. Por lo anterior, se hace necesario que los parámetros a utilizar estén regularizados y que, al momento en que los titulares deban realizar los cálculos, estos ya se encuentren asignados por defecto, evitando los parámetros queden al criterio de los dueños de los rellenos sanitarios.

Sin embargo, es relevante considerar mecanismos que permitan a los titulares presentar solicitudes de actualización de parámetros calibrados localmente, siempre que estos se encuentren debidamente respaldados mediante campañas de medición, estudios técnicos o información histórica representativa del propio sitio que respalden y justifique técnicamente dicha actualización. Esto reconoce que cada relleno sanitario opera bajo condiciones propias de operación que difícilmente se incluyen en un único valor genérico de referencia, por ejemplo, la composición y humedad de los residuos, las prácticas operaciones, el tipo y espesor de coberturas, el clima, entre otras.

Luego se deben evaluar dichas propuestas en función de la trazabilidad, representatividad y calidad de la medición que la sustente; mientras la propuesta no sea aprobada, se mantiene el valor por defecto. De esta manera se regulariza con un esquema común y, a la vez, se incorpora la posibilidad de mejorar progresivamente la precisión de las estimaciones mediante evidencia verificable.

Como complemento, los titulares pueden monitorear y reportar otras variables operacionales que permitan establecer coherencia y validación de las estimaciones realizadas. Entre estas variables se pueden considerar parámetros asociados a la operación del sistema de captura y manejo de biogás, condiciones de cobertura, caudales operaciones u otros indicadores que permitan verificar la consistencia entre la operación real del relleno sanitario y las emisiones estimadas. Si la generación estimada resulta inconsistente con el comportamiento operacional observado, se cuenta con información para revisar tanto los parámetros utilizados como las mediciones realizadas, fortaleciendo la confianza del reporte.

8.2.2.2 Parámetros medidos

Otra de las brechas que se pueden generar es con los parámetros medidos, ya que estos vienen entregados por medición de forma directa por equipos expuestos a distintos factores ambientales, lo que puede alterar la medición de los parámetros o incluso estas mismas condiciones ambientales pueden afectar o dañar a los mismos equipos de monitoreo, afectando así que algunos equipos puedan variar su medición o, en el peor de los casos, no medir.

8.2.2.3 Mediciones en terreno

Otra brecha encontrada en la implementación del monitoreo es sobre las mediciones en terreno debido a que estas están ligadas a las condiciones ambientales (viento, humedad), factores que pueden afectar en la medición de los datos. Dentro de la revisión de las normas internacionales, algunos países que exigen monitoreo superficial establecen que esta medición no se debe realizar cuando las condiciones meteorológicas no son adecuadas.

8.2.3 Costos de implementar los mecanismos de monitoreo

En esta sección, nuevamente se debe separar los mecanismos de monitoreo activo y pasivo, ya que por la naturaleza que supone tener un sistema de captura pasivo, este exige, y es parte de lo que se requiere para que funcione el sistema, que este funcione de forma forzada, generando un vacío para la succión, además de contar con analizadores de gases para medir la porción de oxígeno que tiene la mezcla de biogás, ya que este en concentraciones del 2-5% puede generar una mezcla explosiva.

Entonces, considerando lo anterior, contar con un sistema de captura activa ya contempla el acondicionamiento de equipos de medición para que el sistema funcione correctamente, y por ello contando también con medidores de flujo, analizadores de gases, medidores de temperatura, humedad y muchas más variables de seguimiento. En base a las entrevistas y reuniones que, como equipo consultor, tuvimos con los operadores de rellenos sanitarios, planteaban justamente que presentar sistemas de captura activa, ya están consideradas en los costos de implementar el sistema mismo.

Es por lo anterior que los costos de implementar equipos de monitoreo de flujo (como flujómetros) y de composición del biogás (analizadores de gases) resultan no ser adicionales. Además, los rellenos sanitarios con captura activa ya deben reportar flujo y composición del biogás a la SMA por la resolución exenta 431.

Para el caso del sistema de captura pasiva, su cumplimiento se basa en seguir ciertos factores de eficiencia de captura y de oxidación, por lo que el cumplimiento tampoco supone costos adicionales.

Por último, para el caso de las campañas de monitoreo superficial de emisiones los costos pueden ir desde 5.000.000 a 20.000.000 CLP (incluyendo equipamiento, movilización y el reporte) (ImplementaSur, 2024).

8.3 Articulación con la modificación del DS 189/2005 (MINSAL) con las consideraciones técnicas del Informe Financiero del PSM del MINSAL

8.3.1 Articulación con la propuesta de modificación del DS 189/2005

El DS 189/2005, fiscalizado por la Autoridad Sanitaria a través de las Secretarías Regionales Ministeriales (SEREMI) de Salud, regula las condiciones sanitarias y de seguridad básicas de los rellenos sanitarios. Su modificación, sometida a consulta pública por el MINSAL, tiene como principal objetivo mejorar las condiciones sanitarias y de seguridad asociadas al gas metano e impulsar la reducción de sus emisiones, anticipando el cumplimiento de una de las medidas del PSM del sector Salud. De este modo, la norma de emisión y el DS 189/2005 modificado constituyen instrumentos complementarios: el primero fija y fiscaliza el límite cuantificado de emisión de metano (competencia de la SMA), mientras que el segundo establece las condiciones

mínimas de manejo y seguridad del biogás (competencia de la Autoridad Sanitaria), tales como la captura y el venteo para evitar concentraciones explosivas, las características de la cobertura y el control de fugas.

Esta complementariedad tiene implicancias directas sobre los mecanismos de monitoreo propuestos. En primer lugar, los requerimientos mínimos que defina el DS 189/2005 modificado constituyen el “piso técnico” sobre el cual operan la línea base y las ecuaciones de emisión fiscalizable (Ecuación 8-1 y Ecuación 8-2). En consecuencia, los supuestos por defecto de la estimación, en particular la tasa de oxidación de cobertura tradicional (10%), la oxidación por biocobertura y las exigencias de captura mínima, deben ser consistentes con lo que dicha modificación establezca como obligatorio, de modo que la línea base no acredite reducciones que el reglamento ya exige por razones sanitarias.

En segundo lugar, el monitoreo superficial propuesto (mediciones instantáneas con límite de 500 ppmv y promedio de sensores fijos de 25 ppmv) cumple un doble propósito: por una parte, es un control de seguridad coherente con la finalidad sanitaria del DS 189/2005 —detección de fugas e integridad de la cobertura—; por otra, es un indicador de la calidad operacional de la captura, que sirve de insumo a la norma de emisión. Conviene que esta convergencia quede reconocida explícitamente para que una sola campaña de monitoreo superficial satisfaga ambas finalidades.

En tercer lugar, dado que ambos instrumentos recaen sobre los mismos datos de terreno, pero son fiscalizados por autoridades distintas (SMA para la norma de emisión y SEREMI de Salud para el DS 189/2005), se propone que la información levantada alimente ambos sistemas a partir de un canal común, tomando como base el reporte de flujo y composición del biogás que ya exige la Resolución Exenta 431/2021 de la SMA. Con ello se evita la duplicidad de exigencias y se reduce la carga regulatoria sobre los titulares, manteniendo a la vez la trazabilidad para cada autoridad fiscalizadora.

8.3.2 Consideraciones técnicas del Informe Financiero del PSM del MINSAL

El Informe Financiero del PSM del sector Salud, remitido a la Dirección de Presupuestos (DIPRES) en el marco de la Ley N°21.455 y del DS N°16/2023 del MMA, costea y financia las medidas del Plan utilizando un dólar de referencia de \$888 (diciembre de 2024), una tasa social de descuento de 5,5% y un horizonte de evaluación al año 2050. La medida directamente vinculada a la norma de emisión y a sus mecanismos de monitoreo es la Medida 2, “Captura y valorización/quema de biogás en rellenos sanitarios existentes y nuevos”, que agrupa ocho acciones y se evalúa con una vida útil de 20 años. El análisis de sus consideraciones técnicas permite precisar tres puntos de articulación con el MRV propuesto: la estructura de costos, los instrumentos de monitoreo que el propio Informe financia y la trayectoria de penetración que el MRV debe verificar.

8.3.2.1 Estructura de costos y corroboración del costo del MRV

El Informe Financiero estima para la Medida 2 un costo económico (social) cuyo valor actualizado neto asciende a US\$326 millones, compuesto por US\$138 millones de inversión (CAPEX) y US\$188 millones de operación (OPEX), estimando el OPEX como un 12,2% de la inversión a partir del modelo de costos de la US-EPA y sin considerar generación eléctrica. Esa cifra corresponde mayoritariamente a la infraestructura de captura que instalan y operan los propios titulares. El gasto fiscal de la Medida 2, en cambio, es acotado: del orden de M\$75.000²⁵ en 2025 y 2026, M\$114.500 en 2027 (de los cuales M\$111.000 corresponden a capacitación) y cerca de M\$3.500 anuales en régimen, todos clasificados en el Subtítulo 22 (Bienes y Servicios de Consumo). Esta separación corrobora, con cifras del propio Informe, la conclusión de la sección 8.2.3: los equipos de medición de flujo y composición no constituyen un costo adicional de fiscalización, pues están incorporados en el CAPEX y el OPEX de los sistemas de captura que el Informe ya atribuye a los titulares; el costo fiscal incremental se concentra en el andamiaje regulatorio y de reporte del MRV, no en instrumentación.

8.3.2.2 Instrumentos del MRV financiados por el PSM

El gasto fiscal de la Medida 2 financia, precisamente, los componentes del MRV. Según el detalle de acciones del Informe, en 2025 se contempla el diseño de la norma de emisión (Acción 2.2.1, a cargo del MMA) y la solicitud de recursos para la fiscalización del cumplimiento de las modificaciones al DS 189/2005 y de la norma de emisión (Acción 2.6.1, MINSAL); en 2026, la elaboración de la guía de cumplimiento de las modificaciones del DS 189/2005 (Acción 2.1.2); y, de 2026 a 2030, la implementación y mantención anual de un “Sistema de Ingreso de Reportes de Operación de Rellenos Sanitarios” (Acción 2.8.1, MINSAL). El presupuesto de la Medida 2 también incluye un servicio de consultoría para evaluar los recursos necesarios para la fiscalización y un curso de capacitación para 300 funcionarios. La Tabla 8-3 resume estos instrumentos y su vínculo con el MRV propuesto en este capítulo.

Tabla 8-3 Acciones de la Medida 2 del PSM vinculadas al monitoreo, reporte y verificación (MRV)

Acción (PSM)	Descripción en el Informe Financiero	Vínculo con el MRV propuesto
2.2.1 (MMA, 2025)	Diseño y elaboración de la norma de emisión de metano para rellenos sanitarios.	Define el instrumento cuyo cumplimiento mide el MRV (Ecuación 8-1 y Ecuación 8-2).
2.6.1 (MINSAL, 2025)	Solicitud de recursos para la fiscalización del cumplimiento de las modificaciones al DS 189/2005 y de la norma de emisión.	Financia de forma conjunta la fiscalización de ambos instrumentos; respalda la articulación de competencias de la Sección 8.3.1.
2.1.2 (MINSAL, 2026)	Elaboración de guía para el cumplimiento de las modificaciones del DS 189/2005 sobre captura y valorización/quema de metano.	Operacionaliza los requerimientos mínimos que sirven de “piso técnico” a la línea base (Sección 8.1.1.1).

²⁵ M\$ = miles de pesos

Acción (PSM)	Descripción en el Informe Financiero	Vínculo con el MRV propuesto
2.8.1 (MINSAL, 2026-2030)	Sistema de Ingreso de Reportes de Operación de Rellenos Sanitarios, con mantención anual.	Es el soporte del componente de Reporte del MRV; el canal único propuesto sobre la Resolución Exenta 431/2021 debe implementarse a través de este sistema.
Capacitación (2027)	Curso para 300 funcionarios sobre desarrollo de proyectos de relleno que minimicen las emisiones de metano (M\$111.000).	Desarrolla las capacidades para la operación y la verificación del MRV.

Fuente: Elaboración propia a partir del Informe Financiero del PSM MINSAL

8.3.2.3 Trayectoria de penetración que el MRV debe verificar

El abatimiento que el Informe Financiero atribuye a la Medida 2 no descansa en un parámetro de oxidación o de eficiencia, sino en un supuesto de penetración de la captura: que el 100% de los rellenos sanitarios tradicionales (no manuales) existentes cuente con sistema de captura de gas al año 2035, con instalación de pozos distribuida de manera proporcional entre 2027 y 2029, y que el 100% de los nuevos rellenos disponga de captura o quema al 2035. En consecuencia, el MRV debe ser capaz de verificar, año a año y por sitio, tanto la instalación efectiva de los sistemas conforme a esa trayectoria como el flujo y la composición efectivamente capturados y destruidos (Sección 8.1.1.2). Solo así el abatimiento contabilizado financieramente se sostiene sobre emisiones fiscalizables verificadas, y el “Sistema de Ingreso de Reportes” (Acción 2.8.1) puede operar como fuente única tanto del seguimiento del PSM como de la fiscalización de la norma.

8.3.2.4 Coherencia institucional y actualización

El gasto fiscal de la Medida 2 recae sobre la Subsecretaría de Salud Pública, mientras que el diseño de la norma corresponde al MMA y la operación del sistema de reportes y la fiscalización sanitaria del DS 189/2005 al MINSAL; la fiscalización de la norma de emisión recae en la SMA. Esta distribución es consistente con los actores identificados en la Sección 8.2.1 y con la articulación de competencias de la Sección 8.3.1. Finalmente, el Informe Financiero advierte la necesidad de seguimientos y evaluaciones periódicas que comparen las estimaciones con los gastos y resultados reales para reasignar recursos; el MRV es justamente el mecanismo que provee esos datos verificados, por lo que debe diseñarse para retroalimentar la actualización del propio Informe Financiero y de los supuestos de penetración y costos (incluido el OPEX del 12,2% del modelo US-EPA) sobre los que se construye.

Cabe precisar que la trayectoria de penetración y el modelo de costos considerados en el Informe Financiero evalúan a nivel global la implementación de la Medida 2 del PSM, pero no profundizan en distintos escenarios de aplicación o implementación de las exigencias normativas, por lo que sus resultados no necesariamente representan la alternativa más costo-eficiente de mitigación. Además, el Informe Financiero no fija los parámetros técnicos de emisión, tales como tasas de oxidación, factores de captura y eficiencias de destrucción, los cuales residen en la norma y en el presente estudio. Por ello, la consistencia exigida no es de “mismos parámetros”, sino de

alineamiento: los supuestos de penetración del Informe Financiero y los parámetros de la Ecuación 8-1 y la Ecuación 8-2 deben actualizarse de forma conjunta, de manera que el abatimiento financiero y las emisiones fiscalizables sean consistentes a lo largo del horizonte de evaluación.

9. Análisis técnico y económico de los escenarios de norma de emisión propuestos

9.1 Estimación del potencial de reducción de emisiones de cada escenario propuesto respecto a la línea base y comparación con los objetivos del PSM del MINSAL

Se estima el potencial de reducción de emisiones de cada escenario propuesto respecto a la línea base y en comparación con los objetivos del PSM del MINSAL. La estimación del potencial de reducción de emisiones de metano se desarrolló mediante un modelo en el *software* Analytica, el cual permite representar de forma integrada la evolución temporal de emisiones, los límites definidos y los escenarios de mitigación propuestos. Los resultados de la estimación se encuentran disponibles en el anexo digital “NEMetano-Potencial_Reduccin.ana”.

Para la estimación se utiliza la línea base de emisiones, correspondiente a la proyección de emisiones de metano de los rellenos sanitarios sin la implementación de medidas de reducción o control de emisiones. Sobre esta base, se aplican los distintos escenarios propuestos de mitigación, los cuales incorporan la aplicación de límites de emisión y tecnologías de reducción para alcanzar estos límites, con el fin de estimar el potencial de reducción, el cual corresponde a la capacidad de cada escenario propuesto para disminuir emisiones en comparación con el escenario de línea base o con la mitigación esperada del PSM.

La evaluación se realiza para los tres escenarios distributivos (ED), pero únicamente para dos de los tres escenarios temporales (ET). El escenario temporal de una trayectoria lineal decreciente, si bien se presenta como una opción de escenario de norma, la baja probabilidad de recomendación debido a la complejidad operativa asociada a establecer y fiscalizar límites distintos cada año hace que en el presente capítulo no se evalúe.

9.1.1 Potencial reducción con respecto a la línea base

A continuación, se estima el potencial de reducción de los escenarios propuestos con respecto a la línea base. Para la estimación del potencial se utiliza la línea base de emisión, obtenida desde la proyección de emisiones de metano en los rellenos sin implementar medidas de control de emisiones, tal como se presenta agrupada en la Tabla 9-1.

Tabla 9-1 Emisión por periodo desde proyección propia

Periodo	Emisión(ktCO ₂ eq)
2030-2040	111.363
2041-2050	121.692
2030-2050	233.055

Fuente: Elaboración propia

Luego, el potencial de reducción considera la aplicación de los límites de emisión y su implementación según cada escenario distributivo y temporal. Cabe destacar, que se asume que los rellenos sanitarios emiten como máximo el límite establecido en cada año correspondiente, lo que permite estimar de manera conservadora el efecto de las medidas sobre la reducción de emisiones.

La Tabla 9-2 muestra el potencial de reducción al comparar la emisión de los rellenos bajo cada escenario de mitigación respecto de la línea base. Se observa que todos los escenarios propuestos generan reducciones significativas de emisiones respecto de la línea base, el escenario temporal con límite 2050 constante en todos los años (límite 2050) presenta reducciones cercanas al 43% para el periodo total 2030-2050 y alcanza un 51% en el escenario temporal con límite 2030 y 2050.

Tabla 9-2 Potencial de reducción por escenario distributivo (ED) y temporal (ET) por periodo en comparación línea base

Esc. Temp.	Periodo / Esc. Distrib.	Emision_Base (ktCO ₂ eq)	Emis_ED1 (ktCO ₂ eq)	Emis_ED2 (ktCO ₂ eq)	Emis_ED3 (ktCO ₂ eq)	Potenc_Red_ED1 (%)	Potenc_Red_ED2 (%)	Potenc_Red_ED3 (%)
ET1: Limite 2050	2030-2040	111.363	52.800	52.759	52.796	47%	47%	47%
	2041-2050	121.692	48.000	47.963	47.996	39%	39%	39%
	2030-2050	233.055	100.800	100.721	100.792	43%	43%	43%
ET2: Limite 2030_2050	2030-2040	111.363	70.400	70.485	70.709	63%	63%	63%
	2041-2050	121.692	48.000	47.963	47.996	39%	39%	39%
	2030-2050	233.055	118.400	118.448	118.705	51%	51%	51%

Fuente: Elaboración propia

El cumplimiento de las reducciones estimadas está sujeto a las condiciones de operación de las tecnologías de referencia presentadas en la Sección 6.5.1 para el cumplimiento de cada escenario normativo.

9.1.2 Potencial reducción con respecto a mitigación esperada PSM

A continuación, se estima el potencial de reducción de los escenarios propuestos con respecto a la mitigación esperada del Plan Sectorial de Mitigación (PSM) del MINSAL. Para ello, se utiliza la línea base de emisiones proyectadas (Tabla 9-1) y se obtiene la reducción de emisiones como la diferencias entre las emisiones de línea base y las emisiones de cada escenario. Se asume que cada relleno cumplirá con el límite definido, siendo ese límite su emisión máxima en cada año. En la Tabla 9-3 se presenta la reducción por escenario distributivo y temporal por periodo.

Tabla 9-3 Reducción por escenario distributivo (ED) y temporal (ET) por periodo

Esc. Temporal	Periodo / Esc. Distributivo	Reducción_ED1 (ktCO ₂ eq)	Reducción_ED2 (ktCO ₂ eq)	Reducción_ED3 (ktCO ₂ eq)
ET1: Limite 2050	2030-2040	58.563	60.134	60.229
	2041-2050	73.692	73.747	73.809
	2030-2050	132.255	133.881	134.038
ET2: Limite 2030-2050	2030-2040	40.963	40.882	40.658
	2041-2050	73.692	73.747	73.809
	2030-2050	114.655	114.629	114.467

Fuente: Elaboración propia

Para evaluar la contribución de los escenarios analizados, se incorporan los objetivos establecidos en el PSM (2024) del MINSAL, el cual define la mitigación esperada de 44.900 ktCO₂eq para el periodo total de 2020-2050 y una mitigación 39.250 ktCO₂eq para 2030-2050, tal como se presenta en la Tabla 9-4.

Tabla 9-4 Mitigación esperada PSM

Periodo	Mitigación Esperada (ktCO ₂ eq)
2020-2030	5.650
2031-2040	19.250
2041-2050	20.000
2020-2050	49.000
2030-2050	39.250

Fuente: Elaboración propia en base a PSM 2024

Finalmente, se estimó y presenta el potencial de reducción en la Tabla 9-5. Se observa la alta capacidad de cada escenario para disminuir emisiones en comparación con el PSM. Se muestra que todos los escenarios cumplen y superan ampliamente las metas de reducción del PSM, tanto en el mediano plazo (2030-2040) como en el largo plazo (2041-2050), alcanzando valores que varían entre 210-369%. El escenario temporal con límite 2050 es el que presenta mayores reducciones, lo cual es coherente con aplicar un límite más exigente durante todo el periodo de implementación de la norma (2030 a 2050). Mientras que el escenario temporal con 2 límites, el límite 2030 para 2030-2040 y el límite 2050 para 2041-2050, presenta menores valores de potencial al ser más flexible con la exigencia en el tiempo.

Tabla 9-5 Potencial de reducción por escenario distributivo y temporal por periodo en comparación PSM

Esc. Temporal	Periodo / Esc. Distributivo	Potencial_Red_ED1 (%)	Potencial_Red_ED2 (%)	Potencial_Red_ED3 (%)
ET1: Limite 2050	2030-2040	304%	312%	313%
	2041-2050	369%	369%	369%
	2030-2050	337%	341%	342%
ET2: Limite 2030-2050	2030-2040	213%	212%	211%
	2041-2050	369%	369%	369%
	2030-2050	292%	292%	292%

Fuente: Elaboración propia

9.2 Análisis de los costos de cada uno de los escenarios

La estimación de los costos de cumplimiento asociados a cada escenario distributivo (ED) se basa en la construcción de curvas de costo empíricas para cada una de las siete combinaciones tecnológicas de captura y tratamiento de metano disponibles en rellenos sanitarios (ver Tabla 9-6). La metodología de cómo se elaboran las curvas de costos se describe en la Sección 9.2.1.

Las siete tecnologías cubren el espectro completo de complejidad de aplicación e inversión, y también se basan en lo recopilado en la Sección 5.1, desde la biocobertura pasiva hasta los sistemas activos de captación con valorización energética del biogás. La Tabla 9-6 presenta las siete combinaciones tecnológicas evaluadas, indicando su tipo (pasivo/activo y la presencia de biocobertura), la fracción de emisión nominal (E/G) como referencia rápida, el CAPEX referencial de inversión y la existencia o no de ingreso por valorización energética del biogás.

Tabla 9-6 Combinaciones tecnológicas evaluadas: tipo, E/G nominal y referencia de inversión

N°	Combinación tecnológica	Código	Tipo	E/G nom.	CAPEX ref. (kUSD)*	Ingreso electr.
1	Pasivo + Biocobertura	PAS_BC	Pasivo	73%	~700	No
2	Pasivo + Biofiltro	PAS_BF	Pasivo	75%	~900	No
3	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	PAS_BF_BC	Pasivo	55%	~1.100	No
4	Activo + Antorcha	ACT_ANT	Activo	47%	~1.500	No
5	Activo + Valorización energética	ACT_VAL	Activo	47%	~1.500	Sí
6	Activo + Antorcha + Biocobertura	ACT_ANT_BC	Activo + BC	32%	~2.000	No
7	Activo + Valorización + Biocobertura	ACT_VAL_BC	Activo + BC	33%	~2.000	Sí

 * CAPEX referencial para escala mediana ($Q_{red} \approx 100 \text{ GgCO}_2\text{e/año}$)

Fuente: Elaboración propia

Con base en estas combinaciones, se realiza para cada relleno sanitario y cada escenario distributivo (ED1...3) una **asignación tecnológica en dos etapas**. En primer lugar, se identifica la **tecnología mínima**: la combinación de menor complejidad técnica cuya fracción de emisión resultante (E/G) es inferior al factor límite asignado a ese relleno al año 2050. En segundo lugar, se determina la **tecnología costo-efectiva**: aquella que, entre todas las combinaciones que

cumplen el límite, minimiza el costo neto por tonelada de CO₂eq reducida, ajustado mediante el factor de recuperación de capital (CRF) con la tasa social de descuento del 5,5%.

El costo imputable al escenario se calcula sobre la **reducción estrictamente necesaria para alcanzar el límite**, y no sobre la reducción máxima que la tecnología podría lograr. Este criterio refleja que, si un sistema opera con mayor eficiencia que la exigida, la reducción adicional constituye un sobrecumplimiento que podría transarse en mercados de carbono, pero cuyo costo no se incorpora al escenario regulatorio evaluado. De este modo, el análisis permite comparar equitativamente el costo de cumplimiento entre tecnologías que tienen distintos niveles de eficiencia intrínseca, evaluando a todas ellas a la misma escala de reducción requerida.

A continuación, se presentan en detalle las metodologías utilizadas, en primera instancia la metodología para construir las curvas de costos (ver Sección 9.2.1) y en segunda instancia, la metodología para la asignación tecnológica a cada relleno y para cada escenario distributivo (ver Sección 9.2.2). Luego, en la Sección 9.2.3, se presentan los resultados del análisis económico de cumplir con la norma de emisión en cada escenario evaluado.

Todos los cálculos se encuentran disponibles en el anexo digital “NEMetano-Costos_Escenarios.xlsx”.

9.2.1 Curva de Costos: Metodología de cálculo de los costos para cada tecnología

El presente capítulo describe en detalle la metodología empleada para construir las curvas de costo asociadas a cada tecnología de captura y tratamiento de metano considerada. El objetivo es establecer, de forma transparente y replicable, los parámetros de costo que permiten estimar el gasto de cumplimiento para cada relleno sanitario bajo los distintos escenarios distributivos (ED) y temporales (ET) de la norma.

La evaluación de costo-efectividad requiere cuantificar el Costo de Capital (CAPEX), el Costo de Operación y Mantenimiento (OPEX) y los ingresos potenciales por valorización energética del biogás capturado, para siete combinaciones tecnológicas.

9.2.1.1 Forma Funcional: Ley de Potencia

Para la estimación de costos, no se utilizaron directamente los costos unitarios de las tecnologías obtenidos en la Sección 5 (Tabla 5-3). Si bien dichos valores constituyen una referencia útil, corresponden a estimaciones generadas para un único escenario de diseño, por lo que presentan una relación lineal entre la capacidad y costos. Esta aproximación limita la representación de la variabilidad observada en proyectos reales, donde los costos pueden variar significativamente en función de la escala, configuración y condiciones de implementación.

El costo de capital de sistemas de infraestructura ambiental no escala linealmente con la capacidad de la instalación. A mayor escala, el costo unitario disminuye debido a economías de escala en ingeniería, adquisición de materiales y construcción. Para capturar este comportamiento se adoptó la ley de potencia, también conocida como regla del “factor de las seis décimas” o “scale-up rule”, estándar ampliamente utilizado en ingeniería de procesos (Tribe & Alpine, 1986):

Ecuación 9-1 Curva de costo CAPEX en función de la escala de reducción

$$CAPEX(Q) = A * Q^b \quad [USD \text{ millones}]$$

Donde:

- Q : La reducción anual de emisiones requerida (ktCO₂eq/año), que actúa como variable de escala de la instalación. Se define como $Q = BAU \times (1 - E/G)$, donde BAU es la emisión en escenario de referencia y E/G es la fracción de emisión lograda con la tecnología asignada.
- A : El coeficiente de escala [USD M / (ktCO₂eq/año)], que representa el costo base a escala unitaria de referencia. Es el parámetro más sensible a las condiciones locales de mercado y debe actualizarse con cotizaciones nacionales cuando estén disponibles.
- b : El exponente de escala [adimensional, $0 < b < 1$], que determina la magnitud de las economías de escala. Cuando $b = 1$ el costo escala linealmente con la capacidad (sin economías de escala). Cuando $b < 1$, duplicar la capacidad Q cuesta un factor $2^b < 2$.

Para ilustrar el efecto del exponente: con $b = 0,818$ (sistemas activos antorcha), duplicar Q aumenta el CAPEX en un factor $2^{0,818} \approx 1,76\times$. Con $b = 0,221$ (sistemas pasivos), el factor es $2^{0,221} \approx 1,17\times$.

Esta función se linealiza aplicando logaritmos para permitir la calibración por regresión lineal ordinaria (OLS):

Ecuación 9-2 Forma lineal para calibración por regresión (OLS en plano log-log)

$$\ln(CAPEX) = \ln(a) + b * \ln(Q)$$

Los parámetros A y b se obtienen desde una calibración de distintas fuentes de datos e iteraciones para los sistemas activos y pasivos. La metodología de la calibración de parámetros A y b de costos por tecnología se presenta en la Sección 12.6, además, en el anexo digital “NEMetano-Factores_Calibracion_Costos.xlsx” se encuentran disponibles más detalle sobre las fuentes y valores obtenidos.

9.2.1.2 Fuentes de datos para calibración

La calibración de las curvas se realizó triangulando tres tipos de fuentes complementarias, en orden de prioridad metodológica:

- Fuentes primarias: La principal referencia fue la plantilla de cálculo LFGCost de la EPA y los proyectos MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio, UNFCCC²⁶). El LFGCost entrega valores de referencia al aplicar distintos parámetros genéricos de estimación, permitiendo abarcar un amplio aspecto de datos. Mientras que los MDL registrados en Chile constituyen la única fuente de costos reales en contexto local.
- Fuentes secundarias (Reportes regionales y literatura académica): El reporte Solid Waste and Landfill Gas Management in Latin America and the Caribbean (World Bank, 2023) aporta benchmarks para instalaciones medianas (50-200 ktCO₂e/año) en contextos similares al chileno. Para biocobertura, las referencias principales de (BAAQMD, 2008), (SCS Engineers, 2008), (Prado et al., 2009) con datos de costo por hectárea en Europa Central, ajustados a Chile mediante factores de paridad de poder adquisitivo.

9.2.1.3 Calibración por tecnología

- **Sistema de captación pasiva**

Los sistemas de captación pasiva consisten en una red de pozos verticales sin compresor. Los costos están dominados por perforación, tuberías HDPE, adecuar cabezales de pozo y captadores de recolección.

La regresión log-lineal sobre cuatro puntos empíricos produjo:

Ecuación 9-3 Curva CAPEX sistemas de captación pasiva (a = 0,057 · b = 0,221)

$$CAPEX_{pas}(Q) = 0,057 \cdot Q^{0,221} \quad [USD \ M]$$

El exponente b = 0,221 indica economías de escala moderadas. La tasa de OPEX es 18% del CAPEX/año y la vida útil es de 20 años (EPA, 2024), consistente con los períodos de amortización de los proyectos MDL revisados.

- **Sistemas de captación activa**

Los sistemas activos de antorcha incorporan compresores, colectores de alta presión, sistemas SCADA, y los sistemas activos por valorización incorporan motores de gas para generación eléctrica. La calibración utilizó los proyectos MDL como punto de anclaje empírico, tal como se presenta en la Sección 12.6, combinado con la calculadora LFGCost de la EPA:

Ecuación 9-4 Curva CAPEX sistemas de captación activa antorcha (a = 0,028 · b = 0,818)

$$CAPEX_{act}(Q) = 0,028 \cdot Q^{0,818} \quad [USD \ M]$$

Ecuación 9-5 Curva CAPEX sistemas de captación activa valorización (a = 0,453 · b = 0,677)

$$CAPEX_{act}(Q) = 0,453 \cdot Q^{0,677} \quad [USD \ M]$$

²⁶ Disponible en: <https://cdm.unfccc.int/>

El coeficiente de la antorcha $a = 0,028$ es inferior al del sistema pasivo (0,057), lo que refleja que a la misma escala Q , el sistema activo por antorcha logra mayor eficiencia por unidad. El exponente $b = 0,818$, superior al del pasivo, indica que el compresor y los sistemas eléctricos tienen costos que escalan casi linealmente, atenuando el beneficio de la mayor escala.

- **Biocobertura: Costos incremental activa**

La biocobertura (capa de 30-60 cm de compost o suelo orgánico) se trata como un costo incremental aditivo al sistema de captación base, tanto para captura activa como para pasiva. Su costo escala linealmente con el área del relleno, no con la eficiencia de captura. Usando la densidad de emisión típica de los rellenos chilenos ($\approx 1.500 \text{ tCO}_2\text{e/año/ha}$ de superficie activa) y los costos por hectárea de (BAAQMD, 2008) y (SCS Engineers, 2008) ajustados a Chile:

Ecuación 9-6 Costo incremental biocobertura para sistema pasivo (lineal con el área)

$$CAPEX_{BC}(Q) = 0,11 \cdot Q \quad [USD \text{ M}]$$

Ecuación 9-7 Costo incremental biocobertura para sistema activo (lineal con el área)

$$CAPEX_{BC}(Q) = 0,154 \cdot Q \quad [USD \text{ M}]$$

El CAPEX total para variantes con biocobertura ($\_BC$) es la suma de la curva base más el costo incremental:

Ecuación 9-8 CAPEX total para variantes con biocobertura para sistema pasivo ($\_BC$)

$$CAPEX_{total} = CAPEX_{base} + CAPEX_{BC} = a_{base} \cdot Q^{b_{base}} + 0,11 \cdot Q$$

Ecuación 9-9 CAPEX total para variantes con biocobertura para sistema activo ($\_BC$)

$$CAPEX_{total} = CAPEX_{base} + CAPEX_{BC} = a_{base} \cdot Q^{b_{base}} + 0,154 \cdot Q$$

Esta formulación garantiza que las variantes con biocobertura sean siempre más costosas que sus equivalentes sin biocobertura a la misma escala Q , lo cual es metodológicamente correcto. Se considera una vida útil de la biocobertura de 10 años en base a (Kriipsalu et al., 2023).

9.2.1.4 Costos anuales: Amortización y OPEX

El costo anual total (Costo Bruto) de cada tecnología se calcula como la suma de la amortización lineal del capital más el OPEX anual:

Ecuación 9-10 Costo bruto anual por tecnología [USD M/año]

$$\text{Costo Bruto}_{act} = \frac{CAPEX_{base}}{VU_{base}} + \frac{CAPEX_{BC}}{VU_{BC}} + CAPEX_{base} \cdot r_{OPEX} + CAPEX_{BC} \cdot r_{OPEX,BC}$$

Donde VU es la vida útil (años) y r_{OPEX} es la tasa de OPEX como fracción del CAPEX (año^{-1}). Los parámetros por tecnología se resumen en la Sección 9.2.1.7.

9.2.1.5 Ingresos por valorización energética

Para las variantes ACT_{VAL} y ACT_{VAL-BC} , el biogás capturado se utiliza en motores de gas de ciclo abierto para generación eléctrica. El ingreso unitario por ktCO_2e capturado se calcula como:

Ecuación 9-11 Ingreso unitario por ktCO_2e capturado

$$REV_{PG} = \frac{P_{elec} \cdot \eta_{bg}}{D_{CH_4} \cdot f_{CH_4} \cdot GWP \cdot 1000} \quad [USD \text{ M} / \text{ktCO}_2\text{e}]$$

Con los siguientes parámetros:

- $P_{elec} = 70 \text{ USD/MWh}$ (precio venta electricidad a red industrial, en base a CNE Chile)
- $\eta_{bg} = 1,5 \text{ kWh/m}^3$ de biogás (motor de gas ciclo abierto, eficiencia 35-38% (EPA, 2024))
- $D_{CH_4} = 0,716 \text{ kg/m}^3$ (densidad metano en condiciones normales (MESSER, n.d.))
- $f_{CH_4} = 50\%$ (composición típica biogás relleno; (BAAQMD, 2008))
- $GWP = 28$ (GWP a 100 años; (IPCC, 2013a))

Con estos valores, $REV_{PG} \approx 0,01048 \text{ USD M} / \text{ktCO}_2\text{e}$ capturado. El ingreso anual y el costo neto son:

Ecuación 9-12 Ingreso anual por valorización eléctrica

$$Ingreso_{act} = Q \cdot REV_{PG} \cdot f_{rev} \quad [USD \text{ M/año}]$$

Ecuación 9-13 Costo neto anual de cumplimiento

$$Costo \text{ Neto} = Costo \text{ Bruto} - Ingreso \quad [USD \text{ M/año}]$$

Ecuación 9-14 Indicador de costo-efectividad (Factor 1.000: convierte USD M/ ktCO_2eq a USD/ tCO_2eq)

$$CE = \frac{Costo \text{ Neto} \cdot 1.000}{Q} \quad [USD/\text{tCO}_2\text{eq/año}]$$

9.2.1.6 Limitaciones metodológicas

- **Predominio de datos internacionales:** La calibración se basa principalmente en datos de proyectos estadounidenses y europeos ajustados mediante factores de localización estimados. Es posible actualizar el coeficiente a con mayor cantidad de cotizaciones de proyectos nacionales cuando estén disponibles.
- **Costos no incluidos:** Las curvas no incorporan costos de gestión administrativa de créditos de carbono, costos de clausura de pozos al final de la vida útil ni gastos de ingeniería y

licitación, que en conjunto pueden representar un 10-20% adicional del CAPEX de instalación.

- **Extrapolación a pequeña escala:** El exponente b se asumió constante en todo el rango de escala. Para rellenos muy pequeños ($Q < 5 \text{ ktCO}_2\text{eq/año}$), los costos fijos de ingeniería y permisos dominan, haciendo que el costo unitario real sea mayor que el predicho por la curva. Se propone aplicar un costo mínimo de proyecto de USD 0,3 millones independiente de la reducción requerida.

9.2.1.7 Resumen de parámetros

La Tabla 9-7 consolida todos los parámetros del modelo de costos con sus valores nominales, rangos y fuentes bibliográficas.

Tabla 9-7 Parámetros del modelo de costos

Parámetro	Símbolo	Valor nominal	Rango	Unidad	Fuente
Oxidación cobertura convencional	Ox	10%	Fijo	%	(IPCC, 2006b)
Oxidación por biocobertura	OxB	32%	Fijo	%	(Abichou et al., 2006); (EPA, 2011)
Eficiencia captura pasiva (nominal)	Ec_PAS	30%	20-50%	%	(Dever et al., 2011)
Eficiencia captura activa (nominal)	Ec_ACT	50%	40-80%	%	(BAAQMD, 2008); (EPA, 2024)
Ef. destrucción - valorización	Et_VAL	96%	Fijo	%	(EPA, 2011)
Ef. destrucción - antorcha	Et_ANT	97%	95-99%	%	(EPA, 2011)
Ef. destrucción - biofiltro	Et_BF	60%	50-70%	%	(Abichou et al., 2006)
Coef. curva CAPEX - pasivo	a_PAS	0,057	—	USD M	Obtención propia ²⁷
Exponente escala - pasivo	b_PAS	0,221	—	adim.	Obtención propia ²⁷
Coef. curva CAPEX - activo - antorcha	a_ACT_ANT	0,028	—	USD M	Obtención propia ²⁷
Exponente escala - activo - antorcha	b_ACT_ANT	0,818	—	adim.	Obtención propia ²⁷
Coef. curva CAPEX - activo - valorización	a_ACT_VAL	0,453	—	USD M	Obtención propia ²⁷
Exponente escala - activo - valorización	b_ACT_VAL	0,677	—	adim.	Obtención propia ²⁷
CAPEX incremental biocobertura - pasivo	CAPEX_BC_PAS	0,11	0,10-0,25	USD M/ktCO ₂ eq	Obtención propia ²⁷
CAPEX incremental biocobertura - activo	CAPEX_BC_ACT	0,154	0,10-0,25	USD M/ktCO ₂ eq	Obtención propia ²⁷
Tasa OPEX - activo - antorcha	r_OPEX,ACT_ANT	12%	—	%/año	Obtención propia ²⁷
Tasa OPEX - activo - valorización	r_OPEX,ACT_VAL	3%	—	%/año	Obtención propia ²⁷
Tasa OPEX - sistemas pasivos	r_OPEX,PAS	18%	—	%/año	Obtención propia ²⁷
Tasa OPEX - biocobertura	r_OPEX,BC	3,0%	—	%/año	Obtención propia ²⁷
Vida útil - sistemas activos y pasivos	VU	20	—	años	(EPA, 2024)
Vida útil - biocobertura	VU_BC	10	—	años	(Kripsalu et al., 2023)
Precio electricidad	P_elec	70	—	USD/MWh	CNE ²⁸
Conversión biogás→electricidad	η_bg	1,5	—	kWh/m ³	En base a la eficiencia de conversión eléctrica. (EPA, 2024)

²⁷ Para mayor información ver anexo digital "NEMetano-Factores_Calibracion_Costos".

²⁸ Disponible en: <https://www.cne.cl/tarificacion/electrica/>

Parámetro	Símbolo	Valor nominal	Rango	Unidad	Fuente
GWP CH ₄ (AR5, 100 años)	GWP	28	—	kgCO ₂ eq/kgCH ₄	(IPCC, 2013b)
Fracción CH ₄ en biogás	f_CH ₄	50%	—	m ³ CH ₄ /m ³ biogás	(BAAQMD, 2008)
Densidad CH ₄	D_CH ₄	0,716	—	kg/m ³	(MESSER, n.d.)
Factor valorización eléctrica - activo	f_rev,ACT	85%	—	%	(BAAQMD, 2008)
Factor valorización eléctrica - pasivo	f_rev,PAS	0%	—	%	Escala insuficiente para motor de gas
Ingreso unitario (REV_PG calculado)	REV_PG	≈0,01048	—	USD M/ktCO ₂ eq	Derivado de Ecuación 9-11 con parámetros anteriores

Fuente: Elaboración propia

9.2.2 Metodología de asignación tecnológica para los escenarios de norma

Como se mencionó anteriormente, para cada relleno sanitario y cada escenario distributivo (ED), el análisis de cumplimiento, y posterior consideración de costos, se determina:

- La tecnología mínima: combinación tecnológica de menor complejidad que logra cumplir con el límite máximo de emisión del escenario respectivo, para cada relleno sanitario.
- La tecnología costo-efectiva: tecnología que minimiza el costo neto por tCO₂eq hasta el límite.

La identificación de la tecnología mínima, podría tomarse en el futuro como una referencia para establecer adicionalidad y/o compensación en el contexto de mercados de carbono.

A continuación, se presenta mayor detalle metodológico de la asignación de tecnología por escenario y relleno.

9.2.2.1 Ecuación de Emisión y Combinaciones Tecnológicas

El desempeño de cada combinación tecnológica se describe mediante:

Ecuación 9-15 Ecuación base para estimar la emisión por cadena tecnológica y para cada escenario

$$E = G \cdot (1 - Ec) \cdot (1 - Ox) \cdot (1 - OxB) + G \cdot Ec \cdot (1 - Et)$$

Donde:

- G = Emisiones BAU 2050 (tCO₂eq/año).
- Ox = 0,10 (fijo, oxidación INGEI-SNP).
- OxB = 0,32 (solo cadenas tecnológicas con biocobertura, fijo, Sección 5.1.1.4).
- Ec = eficiencia de captura.
- Et = eficiencia de destrucción.

El indicador $E/G \leq Factor_{ED}$ del escenario para cada relleno, es la condición de cumplimiento para que la tecnología pueda ser aplicable al relleno.

La Tabla 9-8 presenta las siete combinaciones con los parámetros de eficiencia de captura (E_c) y de destrucción (E_t) que alimentan la Ecuación 9-15, justo con la fracción de emisión resultante (E/G) en sus tres valores: nominal, mínimo alcanzable (mejor caso) y máximo (peor caso):

Tabla 9-8 Parámetros de eficiencia y razón E/G por cadena tecnológica

N°	Cadena Tecnológica	E_c nom.	E_c min.	E_c max.	E_t nom.	E/G nom.	E/G mín. alcanzable	E/G máx. (peor caso)
1	PAS_BC: Pasivo + Biocobertura	30%	20%	50%	0% ($E_t=0$)	73%	69%	81%
2	PAS_BF: Pasivo + Biofiltro	30%	20%	50%	60%	75%	60%	82%
3	PAS_BF_BC: Pas. + BF + Biocob.	30%	20%	50%	60%	55%	46%	59%
4	ACT_ANT: Activo + Antorcha	50%	40%	80%	97%	47%	19%	56%
5	ACT_VAL: Activo + Valorización	50%	40%	80%	96%	47%	21%	56%
6	ACT_ANT_BC: Act.+Ant.+Biocob.	50%	40%	80%	97%	32%	13%	39%
7	ACT_VAL_BC: Act.+Val.+Biocob.	50%	40%	80%	96%	33%	15%	38%

Fuente: Elaboración propia

En base a la Tabla 9-7 y al factor E/G de cada relleno determinado por el límite de emisión exigido y la generación de emisiones de línea base (Emisiones BAU) para cada escenario, se selecciona:

- La tecnología mínima: combinación tecnológica de menor complejidad que logra cumplir con el límite máximo de emisión del escenario respectivo, para cada relleno sanitario.
- La tecnología costo-efectiva —tecnología que minimiza el costo neto por tCO_2eq .

Ecuación 9-16 Indicador de costo-efectividad

$$USD/tCO_2eq_{neto} = \frac{(CAPEX \cdot CRF + OPEX - Ingreso) \times 1000}{Q_{red}}$$

Ecuación 9-17 Factor de Recuperación de Capital ($r = 5.5\%$)

$$CRF = \frac{r \cdot (1 + r)^{vU}}{(1 + r)^{vU} - 1}$$

Ecuación 9-18 Q_{red} basado en el límite

$$Q_{red} = G \times (1 - Factor_{red})$$

Donde:

- $Factor_{red}$: Porcentaje del BAU que debe reducir el relleno por escenario.

9.2.3 Estimación y análisis de costos por escenario de norma

La Tabla 9-9 sintetiza los principales indicadores de costo agregados a nivel sectorial para los tres escenarios distributivos. En todos los casos, la tecnología costo-efectiva asignada es Activo + Valorización energética. Los valores positivos representan costos, mientras que los negativos significan ingresos o ganancias.

Tabla 9-9 Comparativa sectorial de costos de cumplimiento. TSD = 5,5%. Negativo

Indicador sectorial	ED1 - Proporcional	ED2 – Por Tamaño	ED3 - Tamaño×Clima	Unidad
Q_{red} total (reducción hasta límite)	8.144,3	8.148,0	8.150,6	ktCO ₂ eq/año
CAPEX total (inversión)	515,4	466,0	466,0	USD M
OPEX anual	15,5	14,0	13,9	USD M/año
Ingreso electricidad anual	72,5	72,5	72,6	USD M/año
USD/t bruto CRF (sector)	977,6	1.457,4	1.281,5	USD/tCO ₂ eq·año
USD/t neto CRF (sector)	621,5	1.101,3	934,3	USD/tCO ₂ eq·año
VAN Bruto CE (sector)	866,6	867,0	867,2	USD M
VAN Neto CE (sector)	-166,4	-233,9	-236,8	USD M

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que **el ED1 (proporcional) tiene el mayor CAPEX sectorial (USD 515,4 M frente a USD 466,0 M de ED2 y ED3)**, aunque no presenta el USD/t bruto más alto. **El USD/t bruto CRF sectorial alcanza 977,6 USD/tCO₂eq·año en ED1, 1.457,4 USD/tCO₂eq·año en ED2 y 1.281,5 USD/tCO₂eq·año en ED3.** En términos generales, ED1 exige una reducción proporcional a todos los rellenos, mientras que en ED2 y ED3 la exigencia se diferencia por tamaño y clima, respectivamente, lo que modifica la distribución de costos y reducciones entre instalaciones.

El VAN Neto es más negativo en ED2 y ED3 (-USD 233,9 M y -USD 236,8 M, respectivamente) que en ED1 (-USD 166,4 M). Se explica, en términos generales, porque los ingresos eléctricos son similares entre escenarios, con USD 72,5 M/año en ED1 y ED2, y USD 72,6 M/año en ED3, mientras que el CAPEX es menor en ED2 y ED3 respecto de ED1. Esto genera un VAN neto más negativo en ED2 y ED3.

El USD/t neto CRF sectorial es positivo en los tres escenarios: 621,5 USD/tCO₂eq·año en ED1, 1.101,3 USD/tCO₂eq·año en ED2 y 934,3 USD/tCO₂eq·año en ED3. No obstante, el ingreso por venta de electricidad, cercano a USD 72,5 M/año, supera ampliamente el OPEX anual estimado, que varía entre USD 13,9 M/año y USD 15,5 M/año. Esto significa que, **una vez instalado el sistema, la operación puede generar ingresos relevantes para el sector.** Sin embargo, la barrera principal sigue siendo el CAPEX inicial, que se ubica entre USD 466,0 M y USD 515,4 M, y requiere financiamiento.

Un resultado aparentemente contraintuitivo es que la cadena tecnológica Activo + Valorización (ACT_{VAL}) resulta costo-efectiva incluso para los rellenos más pequeños del sector, que técnicamente podrían cumplir con captación pasiva y biocobertura (en ED2-ED3). El análisis de costo-efectividad entrega que incorporando los ingresos obtenidos por electricidad la valorización energética genera siempre el menor costo neto por tonelada.

Cualquier sistema de captación activa que logra inyectar biogás a un motor de gas genera ingresos eléctricos que superan los costos incrementales de pasar de un sistema pasivo a uno activo²⁹.

Sin embargo, la barrera no es la costo-efectividad, sino el acceso al financiamiento (ver opciones en la Sección 9.2.4). Para un relleno pequeño —generalmente operado por municipios de baja o mediana capacidad financiera— la inversión inicial de USD 1-3 M para un sistema activo de captación y generación representa un monto que supera ampliamente la capacidad de endeudamiento municipal. Las siguientes condiciones agravan este problema:

- **Falta de escala para bonos verdes:** los mercados de deuda verde o de carbono requieren mínimos de proyecto (usualmente > USD 5-10 M de CAPEX) que quedan fuera del alcance de rellenos pequeños.
- **Riesgo tecnológico percibido:** los financiadores no están familiarizados con proyectos de captación activa en rellenos pequeños localizados en países en vías de desarrollo, lo que eleva el costo del capital por encima de la tasa de descuento social.
- **Flujo de caja negativo en los primeros años:** aunque el VAN es positivo (negativo en el contexto presentado en la Tabla 9-9), la deuda puede no estar cubierta por los ingresos eléctricos en los primeros años de operación mientras el biogás alcanza su pico de generación.

Por estas razones, la implementación de la norma debe contemplar instrumentos de apoyo diferenciados por tamaño de relleno: acceso a créditos blandos, subsidios parciales al CAPEX, agregación de pequeños proyectos en portafolios financiables, o la opción de que rellenos pequeños adopten sistemas pasivos como tecnología mínima —cumpliendo la norma— mientras se generan los instrumentos para abordar la transición a sistemas activos en el mediano plazo (ver estándar de referencia en la Sección 6.5.1).

A continuación, se presenta en detalle el resultado del análisis de costo de cumplimiento para relleno en cada escenario distributivo.

9.2.3.1 Costos del Escenario Distributivo 1: Proporcional, Factor 37% del BAU para todos los rellenos

En el ED1, **los 40 rellenos requieren sistema activo con antorcha (ACT_{ANT}) como tecnología mínima, con altos estándares de condiciones operacionales para alcanzar alta eficiencia de captura de metano.** Ninguna combinación pasiva logra $E/G \leq 37\%$ incluso con sus mejores parámetros ($PAS_{BF-BC} max=45,6\%$). Esto implica que la norma, bajo el escenario proporcional,

²⁹ Para un relleno pequeño con $Q_{red} = 20 \text{ ktCO}_2\text{eq/yr}$, el ingreso anual por electricidad es del orden de USD 0,21 M/año, mientras que el CAPEX incremental del sistema activo sobre el pasivo es de aproximadamente USD 0,5-1 M, recuperable en 2-5 años.

obliga a la modernización completa de todos los rellenos del sector sin excepción, independiente de su tamaño.

La tecnología costo-efectiva para todos es ACT_{VAL} , el ingreso eléctrico la hace la opción con menor costo neto/t en todos los casos. Los 27 rellenos pequeños tienen costos brutos unitarios más altos (por efecto de escala inversa en las curvas de potencia) pero el criterio costo-efectivo sigue siendo ACT_{VAL} porque es el único sistema que genera ingresos.

A continuación, en la Tabla 9-10 presenta en detalle, para cada relleno, su Limite de Emisión, la tecnología mínima y tecnología costo efectiva para cumplir con el límite y el Valor Presente bruto y neto asociado a este escenario distributivo.

Tabla 9-10 Resumen Costos ED1

N°	Nombre	Tamaño	Zona Clim.	BAU 2050 (ktCO ₂ e)	Factor %BAU	Límite (ktCO ₂ e)	Tech. mínima	Tech. CE (costo-ef.)	Emisión= Límite (ktCO ₂ e)	VAN Bruto CE (USD M)	VAN Neto CE (USD M)
1	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	Grande	Sec.	3.684	37%	1.366	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	1.366	117	-130
2	Relleno Sanitario Santa Marta	Grande	Sec.	1.323	37%	491	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	491	58	-30
3	Relleno Sanitario Santiago Poniente	Grande	Sec.	1.145	37%	425	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	425	53	-24
4	Relleno Sanitario El Molle	Grande	Sec.	673	37%	249	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	249	37	-8
5	Relleno Sanitario Los Angeles	Grande	Húm.	550	37%	204	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	204	32	-5
6	Relleno Sanitario Colihues La Yesca	Mediano	Sec.	634	37%	235	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	235	36	-7
7	Relleno Sanitario El Panul	Mediano	Sec.	577	37%	214	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	214	33	-5
8	Relleno Sanitario Cemararc	Mediano	Húm.	500	37%	185	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	185	30	-3
9	Relleno Sanitario El Retamo	Mediano	Húm.	466	37%	173	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	173	29	-2
10	Relleno Sanitario Fundo Las Cruces	Mediano	Húm.	444	37%	165	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	165	28	-2
11	Relleno Sanitario La Laja	Mediano	Húm.	438	37%	162	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	162	28	-2
12	Relleno Sanitario Parque El Guanaco	Mediano	Húm.	392	37%	145	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	145	26	-1
13	Relleno Sanitario San Pedro	Mediano	Sec.	392	37%	145	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	145	26	-1
14	Relleno Sanitario Chaqueta Blanca	Mediano	Sec.	309	37%	115	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	115	22	1
15	Relleno Sanitario Santa Ines	Mediano	Sec.	113	37%	42	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	42	11	3
16	Relleno Villarrica	Pequeño	Húm.	224	37%	83	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	83	18	3
17	Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte	Pequeño	Húm.	221	37%	82	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	82	17	3
18	CTI La Hormiga	Pequeño	Sec.	174	37%	64	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	64	15	3
19	Relleno Sanitario El Chulo	Pequeño	Sec.	134	37%	50	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	50	12	3
20	Relleno Sanitario Cerro Colorado	Pequeño	Sec.	119	37%	44	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	44	11	3
21	Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemararc	Pequeño	Húm.	72	37%	27	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	27	8	3
22	Relleno Sanitario San Roque	Pequeño	Húm.	68	37%	25	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	25	8	3
23	Relleno Sanitario de Coipue	Pequeño	Húm.	60	37%	22	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	22	7	3
24	Relleno Sanitario Provincial del Huasco	Pequeño	Sec.	57	37%	21	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	21	7	3
25	Relleno Sanitario Las Quilas	Pequeño	Sec.	40	37%	15	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	15	5	3
26	Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue	Pequeño	Húm.	40	37%	15	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	15	5	3
27	Centro de Disposición Final de Residuos Sólidos de Aysen (CDFRS-Aysen)	Pequeño	Húm.	24	37%	9	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	9	4	2
28	Relleno Sanitario Quebrada Ancha	Pequeño	Sec.	22	37%	8	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	8	4	2
29	Relleno Sanitario Cerro Montevideo	Pequeño	Sec.	14	37%	5	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	5	3	2
30	Relleno Sanitario San Pedro de Atacama	Pequeño	Sec.	9	37%	3	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	3	2	1

N°	Nombre	Tamaño	Zona Clim.	BAU 2050 (ktCO ₂ e)	Factor %BAU	Límite (ktCO ₂ e)	Tech. mínima	Tech. CE (costo-ef.)	Emisión= Límite (ktCO ₂ e)	VAN Bruto CE (USD M)	VAN Neto CE (USD M)
31	Relleno Sanitario Diego de Almagro	Pequeño	Sec.	7	37%	3	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	3	2	1
32	Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane	Pequeño	Húm.	5	37%	2	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	2	1	1
33	Relleno Sanitario Manual de Pica	Pequeño	Sec.	4	37%	2	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	2	1	1
34	Relleno Sanitario Puerto Ibañez	Pequeño	Húm.	4	37%	1	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	1	1	1
35	Centro de Tratamiento Eco Maule	Pequeño	Húm.	4	37%	1	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	1	1	1
36	Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufu	Pequeño	Húm.	2	37%	1	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	1	1	1
37	Relleno Sanitario Villa O'Higgins	Pequeño	Húm.	1	37%	0,3	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	0,3	0,4	0,3
38	Relleno Sanitario Camarones	Pequeño	Sec.	1	37%	0,2	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	0,2	0,3	0,3
39	Relleno Sanitario Manual de Ollagüe	Pequeño	Sec.	0,2	37%	0,1	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	0,1	0,1	0,1
40	Relleno Sanitario Camiña	Pequeño	Sec.	0,1	37%	0,03	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	0,03	0,1	0,1
				12.944		4.800			4.800	700	-166

Fuente: Elaboración propia

9.2.3.2 Costos del Escenario Distributivo 2: Por tamaño

En el ED2, la diferenciación por tamaño permite que 25 rellenos pequeños (límite 83-84% del BAU) cumplan con Pasivo + Biocobertura (PAS_{BC}) como tecnología mínima, que es la opción de menor complejidad. Los 10 rellenos medianos (límite 47% del BAU) requieren Pasivo + Biofiltro + Biocobertura (PAS_{BF-BC}) con parámetros exigentes. Los 5 rellenos grandes (límite 23% del BAU) requieren Activo + Antorcha (ACT_{ANT}) con parámetros exigentes.

Sin embargo, **la tecnología costo-efectiva sigue siendo Activo + Valorización (ACT_{VAL}) para los 40 rellenos**, incluidos los pequeños. La cadena tecnológica Activo + Valorización genera ingresos que ninguna tecnología pasiva puede igualar, haciendo que su USD/tCO₂e neto sea siempre menor que otra tecnología a igual nivel de reducción.

A continuación, en la Tabla 9-11, presenta en detalle, para cada relleno, su Límite de Emisión, la tecnología mínima y tecnología costo efectiva para cumplir con el límite y el Valor Presente bruto y neto asociado a este escenario distributivo.

Tabla 9-11 Resumen Costos ED2

N°	Nombre	Tamaño	Zona Clim.	BAU 2050 (ktCO ₂ e)	Factor %BAU	Límite (ktCO ₂ e)	Tech. mínima	Tech. CE (costo-ef.)	Emisión= Límite (ktCO ₂ e)	VAN Bruto CE (USD M)	VAN Neto CE (USD M)
1	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	Grande	Sec.	3.684	23%	847	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	847	134	-168
2	Relleno Sanitario Santa Marta	Grande	Sec.	1.323	23%	304	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	304	67	-41
3	Relleno Sanitario Santiago Poniente	Grande	Sec.	1.145	23%	263	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	263	61	-33
4	Relleno Sanitario El Molle	Grande	Sec.	673	23%	155	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	155	42	-13
5	Relleno Sanitario Los Angeles	Grande	Húm.	550	23%	127	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	127	37	-8
6	Relleno Sanitario Colihues La Yesca	Mediano	Sec.	634	47%	298	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	298	32	-4
7	Relleno Sanitario El Panul	Mediano	Sec.	577	47%	271	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	271	30	-3
8	Relleno Sanitario Cemarac	Mediano	Húm.	500	47%	235	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	235	27	-1
9	Relleno Sanitario El Retamo	Mediano	Húm.	466	47%	219	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	219	26	-1
10	Relleno Sanitario Fundo Las Cruces	Mediano	Húm.	444	47%	209	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	209	25	-0,2
11	Relleno Sanitario La Laja	Mediano	Húm.	438	47%	206	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	206	25	-0,1
12	Relleno Sanitario Parque El Guanaco	Mediano	Húm.	392	47%	184	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	184	23	1
13	Relleno Sanitario San Pedro	Mediano	Sec.	392	47%	184	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	184	23	1
14	Relleno Sanitario Chaqueta Blanca	Mediano	Sec.	309	47%	145	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	145	19	2
15	Relleno Sanitario Santa Ines	Mediano	Sec.	113	47%	53	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	53	10	3
16	Relleno Villarrica	Pequeño	Húm.	224	84%	189	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	189	7	3
17	Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte	Pequeño	Húm.	221	84%	186	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	186	7	3
18	CTI La Hormiga	Pequeño	Sec.	174	84%	146	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	146	6	3
19	Relleno Sanitario El Chulo	Pequeño	Sec.	134	84%	113	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	113	5	3
20	Relleno Sanitario Cerro Colorado	Pequeño	Sec.	119	84%	100	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	100	5	2
21	Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemarac	Pequeño	Húm.	72	84%	61	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	61	3	2
22	Relleno Sanitario San Roque	Pequeño	Húm.	68	84%	57	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	57	3	2
23	Relleno Sanitario de Coipue	Pequeño	Húm.	60	84%	50	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	50	3	2

N°	Nombre	Tamaño	Zona Clim.	BAU 2050 (ktCO ₂ e)	Factor %BAU	Límite (ktCO ₂ e)	Tech. mínima	Tech. CE (costo-ef.)	Emisión= Límite (ktCO ₂ e)	VAN Bruto CE (USD M)	VAN Neto CE (USD M)
24	Relleno Sanitario Provincial del Huasco	Pequeño	Sec.	57	84%	47	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	47	3	2
25	Relleno Sanitario Las Quilas	Pequeño	Sec.	40	84%	34	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	34	2	1
26	Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue	Pequeño	Húm.	40	84%	34	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	34	2	1
27	Centro de Disposición Final de Residuos Sólidos de Aysen (CDFRS-Aysen)	Pequeño	Húm.	24	84%	20	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	20	2	1
28	Relleno Sanitario Quebrada Ancha	Pequeño	Sec.	22	84%	18	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	18	1	1
29	Relleno Sanitario Cerro Montevideo	Pequeño	Sec.	14	84%	12	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	12	1	1
30	Relleno Sanitario San Pedro de Atacama	Pequeño	Sec.	9	84%	7	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	7	1	1
31	Relleno Sanitario Diego de Almagro	Pequeño	Sec.	7	84%	6	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	6	1	1
32	Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane	Pequeño	Húm.	5	84%	4	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	4	0,5	0,4
33	Relleno Sanitario Manual de Pica	Pequeño	Sec.	4	84%	4	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	4	0,5	0,4
34	Relleno Sanitario Puerto Ibañez	Pequeño	Húm.	4	84%	3	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	3	0,4	0,4
35	Centro de Tratamiento Eco Maule	Pequeño	Húm.	4	84%	3	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	3	0,4	0,4
36	Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufu	Pequeño	Húm.	2	84%	2	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	2	0,3	0,3
37	Relleno Sanitario Villa O'Higgins	Pequeño	Húm.	1	84%	1	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	1	0,1	0,1
38	Relleno Sanitario Camarones	Pequeño	Sec.	1	84%	0,5	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	0,5	0,1	0,1
39	Relleno Sanitario Manual de Ollagüe	Pequeño	Sec.	0,2	84%	0,2	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	0,2	0,1	0,1
40	Relleno Sanitario Camiña	Pequeño	Sec.	0,1	84%	0,1	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	0,1	0,03	0,03
				12.944		4.796			4.796	633	-234

Fuente: Elaboración propia

9.2.3.3 Costos del Escenario Distributivo 3: Por Tamaño y Clima

El Escenario Distributivo 3 introduce mayor diferenciación respecto a los escenarios anteriores. La asignación tecnológica asociada a la tecnología mínima para cumplir con el límite, debido a la mayor diferenciación para rellenos según tamaño y zona climática, hace que existan estas diferencias. Rellenos Medianos, en clima húmedo (límite 43% del BAU) requieren Activo + Antorcha en condiciones de operación exigentes (parámetros de eficiencia máximos). Rellenos Medianos en clima seco (límite 56% del BAU) podrían implementar Pasivo + Biofiltro + Biocobertura. Rellenos Pequeños (75-90% del BAU) podrían implementar Pasivo + Biocobertura. Esta diferenciación captura que los rellenos en zonas húmedas tienen mayor presión para reducir (el escenario les asigna límites más estrictos), lo que eleva sus requerimientos tecnológicos respecto a zonas secas.

Sin embargo, la tecnología costo-efectiva, como en todos los otros escenarios, sigue siendo Activo + Valorización (ACT_{VAL}) para los 40 rellenos, incluidos los pequeños. La cadena tecnológica Activo + Valorización genera ingresos que ninguna tecnología pasiva puede igualar, haciendo que su USD/tCO₂e neto sea siempre menor que otra tecnología a igual nivel de reducción.

A continuación, la Tabla 9-12, presenta en detalle, para cada relleno, su Límite de Emisión, la tecnología mínima y tecnología costo efectiva para cumplir con el límite y el Valor Presente bruto y neto asociado a este escenario distributivo.

Tabla 9-12 Resumen Costo ED3

N°	Nombre	Tamaño	Zona Clim.	BAU 2050 (ktCO ₂ e)	Factor %BAU	Límite (ktCO ₂ e)	Tech. mínima	Tech. CE (costo-ef.)	Emisión= Límite (ktCO ₂ e)	VAN Bruto CE (USD M)	VAN Neto CE (USD M)
1	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	Grande	Sec.	3.684	21%	774	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	774	137	-173
2	Relleno Sanitario Santa Marta	Grande	Sec.	1.323	21%	278	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	278	68	-43
3	Relleno Sanitario Santiago Poniente	Grande	Sec.	1.145	21%	241	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	241	62	-34
4	Relleno Sanitario El Molle	Grande	Sec.	673	30%	202	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	202	40	-10
5	Relleno Sanitario Los Angeles	Grande	Húm.	550	25%	138	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	138	36	-8
6	Relleno Sanitario Colihues La Yesca	Mediano	Sec.	634	56%	355	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	355	28	-2
7	Relleno Sanitario El Panul	Mediano	Sec.	577	56%	323	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	323	26	-1
8	Relleno Sanitario Cemar	Mediano	Húm.	500	43%	215	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	215	28	-2
9	Relleno Sanitario El Retamo	Mediano	Húm.	466	43%	200	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	200	27	-1
10	Relleno Sanitario Fundo Las Cruces	Mediano	Húm.	444	43%	191	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	191	26	-1
11	Relleno Sanitario La Laja	Mediano	Húm.	438	43%	188	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	188	26	-1
12	Relleno Sanitario Parque El Guanaco	Mediano	Húm.	392	43%	169	Activo + Antorcha	Activo + Valorización energ.	169	24	0,2
13	Relleno Sanitario San Pedro	Mediano	Sec.	392	56%	219	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	219	20	2
14	Relleno Sanitario Chaqueta Blanca	Mediano	Sec.	309	56%	173	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	173	17	3
15	Relleno Sanitario Santa Ines	Mediano	Sec.	113	56%	63	Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	63	9	3
16	Relleno Villarrica	Pequeño	Húm.	224	75%	168	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	168	9	3
17	Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte	Pequeño	Húm.	221	75%	166	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	166	9	3
18	CTI La Hormiga	Pequeño	Sec.	174	90%	156	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	156	4	2
19	Relleno Sanitario El Chulo	Pequeño	Sec.	134	90%	121	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	121	4	2
20	Relleno Sanitario Cerro Colorado	Pequeño	Sec.	119	90%	107	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	107	3	2
21	Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemar	Pequeño	Húm.	72	75%	54	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	54	4	2
22	Relleno Sanitario San Roque	Pequeño	Húm.	68	75%	51	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	51	4	2
23	Relleno Sanitario de Coipue	Pequeño	Húm.	60	75%	45	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	45	4	2
24	Relleno Sanitario Provincial del Huasco	Pequeño	Sec.	57	90%	51	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	51	2	1

N°	Nombre	Tamaño	Zona Clim.	BAU 2050 (ktCO ₂ e)	Factor %BAU	Límite (ktCO ₂ e)	Tech. mínima	Tech. CE (costo-ef.)	Emisión= Límite (ktCO ₂ e)	VAN Bruto CE (USD M)	VAN Neto CE (USD M)
25	Relleno Sanitario Las Quilas	Pequeño	Sec.	40	90%	36	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	36	2	1
26	Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue	Pequeño	Húm.	40	75%	30	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	30	3	2
27	Centro de Disposición Final de Residuos Solidos de Aysen (CDFRS-Aysen)	Pequeño	Húm.	24	75%	18	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	18	2	1
28	Relleno Sanitario Quebrada Ancha	Pequeño	Sec.	22	90%	19	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	19	1	1
29	Relleno Sanitario Cerro Montevideo	Pequeño	Sec.	14	90%	13	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	13	1	1
30	Relleno Sanitario San Pedro de Atacama	Pequeño	Sec.	9	90%	8	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	8	1	0,5
31	Relleno Sanitario Diego de Almagro	Pequeño	Sec.	7	90%	7	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	7	1	0,4
32	Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane	Pequeño	Húm.	5	75%	3	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	3	1	1
33	Relleno Sanitario Manual de Pica	Pequeño	Sec.	4	90%	4	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	4	0,4	0,3
34	Relleno Sanitario Puerto Ibañez	Pequeño	Húm.	4	75%	3	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	3	1	0,5
35	Centro de Tratamiento Eco Maule	Pequeño	Húm.	4	75%	3	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	3	1	0,5
36	Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufu	Pequeño	Húm.	2	75%	2	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	2	0,4	0,4
37	Relleno Sanitario Villa O'Higgins	Pequeño	Húm.	1	75%	1	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	1	0,2	0,2
38	Relleno Sanitario Camarones	Pequeño	Sec.	1	90%	0,5	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	0,5	0,1	0,1
39	Relleno Sanitario Manual de Ollagüe	Pequeño	Sec.	0,2	90%	0,2	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	0,2	0,04	0,04
40	Relleno Sanitario Camiña	Pequeño	Sec.	0,1	90%	0,1	Pasivo + Biocobertura	Activo + Valorización energ.	0,1	0	0
				12.944		4.794			4.794	630	-237

Fuente: Elaboración propia

9.2.4 Identificación de fuentes de financiamiento

El análisis de costos de los escenarios regulatorios debe complementarse con una identificación de posibles fuentes de financiamiento, considerando que las medidas de reducción de metano en rellenos sanitarios presentan perfiles de costo diferenciados. En particular, los escenarios asociados a captura, quema o valorización del biogás requieren inversiones iniciales relevantes en infraestructura, equipamiento y sistemas de operación y monitoreo. Sin embargo, algunas de estas alternativas pueden reducir sus costos netos en el tiempo mediante ingresos o ahorros operacionales, especialmente cuando el biogás capturado se valoriza energéticamente. Por esta razón, la principal barrera de implementación no necesariamente corresponde al costo total del ciclo de vida, sino a la disponibilidad de financiamiento para cubrir la inversión inicial.

Desde esta perspectiva, las fuentes de financiamiento deben analizarse de forma diferenciada según el tipo de intervención. Las medidas de menor complejidad pueden ser financiadas principalmente mediante presupuestos sectoriales, recursos municipales, fondos regionales o programas públicos de fortalecimiento institucional. En cambio, las alternativas que incorporan captura activa de biogás, quema controlada u otras formas de valorización energética requieren esquemas de financiamiento de mayor escala, combinando inversión pública, financiamiento bancario, instrumentos climáticos, ingresos por valorización energética y eventualmente mercados de carbono.

Para rellenos sanitarios de titularidad o responsabilidad municipal, una fuente relevante corresponde a los instrumentos de inversión pública canalizados a través de gobiernos regionales y municipios. En este grupo destaca el **Fondo Nacional de Desarrollo Regional (FNDR)**³⁰, administrado en el marco de la acción de **SUBDERE** y los gobiernos regionales, el cual puede financiar proyectos de infraestructura pública, desarrollo territorial y acción climática. Este tipo de financiamiento resulta especialmente pertinente para medidas cuya implementación se justifica por beneficios públicos, tales como reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, control de olores, disminución de riesgos operacionales, mejora de estándares sanitarios y contribución a metas regionales o comunales de cambio climático.

Asimismo, los proyectos de inversión pública asociados a rellenos sanitarios deben considerar su ingreso y evaluación en el **Sistema Nacional de Inversiones (SNI)**³¹. Este sistema no constituye por sí mismo una fuente de financiamiento, pero sí es un mecanismo habilitante para priorizar y justificar proyectos públicos. La incorporación del precio social del carbono en la evaluación social permite reconocer económicamente los beneficios de la reducción de emisiones de metano, mejorando la rentabilidad social de los proyectos y entregando una base metodológica para fundamentar la asignación de recursos públicos. Esto es particularmente relevante para alternativas cuyo retorno financiero privado es bajo o cero, como en el caso de aquellos rellenos

³⁰ <https://www.fondos.gob.cl/>

³¹ <https://sni.gob.cl/>

sanitarios de titularidad municipal, pero que generan beneficios climáticos y ambientales significativos.

Para rellenos sanitarios operados por concesionarios o empresas privadas, las fuentes de financiamiento más pertinentes corresponden a instrumentos de fomento productivo, financiamiento bancario y esquemas de *project finance*. La **Corporación de Fomento de la Producción (CORFO)**³² puede cumplir un rol relevante en etapas de innovación, pilotaje, escalamiento tecnológico, eficiencia energética o incorporación de tecnologías bajas en carbono. Banco Estado (u otra entidad bancaria), por su parte, puede operar como fuente de crédito para financiar inversiones iniciales, especialmente cuando los proyectos cuentan con flujos futuros identificables, tales como ingresos por venta de electricidad, biogás, biometano, certificados de reducción de emisiones o los pagos contractuales asociados a la operación del servicio.

Precisando en particular sobre el último punto, los ingresos futuros de los rellenos sanitarios de titulares privados estarán además sujetos a la negociación de las tarifas fijadas en sus contratos, por lo cual podrán traducir los costos de inversión y operación a los usuarios finales, consolidándolo como un costo social.

En las alternativas de captura activa con valorización energética del biogás, la inversión se orienta a generar ingresos por venta derivados del aprovechamiento energético del metano capturado, ya sea mediante electricidad, calor, biometano u otros usos energéticos. Este tipo de alternativa favorece la evaluación económica del proyecto frente a medidas basadas únicamente en la destrucción de metano, como la quema controlada, dado que incorpora flujos de ingreso que pueden reducir el costo neto de implementación y mejorar la recuperación de la inversión. No obstante, estos ingresos deben entenderse como una fuente de retorno sobre el activo financiado y no como financiamiento directo para cubrir el CAPEX inicial.

Adicionalmente, debe considerarse una restricción operativa relevante para proyectos de generación eléctrica en base a biogás. Durante las horas de mayor generación fotovoltaica, los bajos costos marginales del sistema pueden desplazar a las centrales de biogás, obligándolas a operar en mínimo técnico o reduciendo sus oportunidades de despacho. Por ello, para ser competitivas durante todo el día y aprovechar de manera más intensiva el biogás capturado, estas alternativas pueden requerir inversiones complementarias, como sistemas de almacenamiento con baterías, o BESS (Battery Energy Storage System, por sus siglas en inglés).

Además de las fuentes de financiamiento orientadas a cubrir la inversión inicial, los mecanismos de compensación y certificación de reducciones de emisiones pueden constituir una fuente potencial de ingresos por venta, permitiendo obtener retornos sobre la inversión realizada en proyectos de reducción de metano. En Chile, el Sistema de Compensación de Emisiones asociado al impuesto verde permite que sujetos gravados compensen emisiones mediante certificados

³² <https://www.corfo.gob.cl/sites/cpp/>

provenientes de proyectos que reduzcan emisiones de manera adicional, medible y verificable. En este contexto, los proyectos de captura y destrucción o valorización de metano en rellenos sanitarios podrían generar certificados transables, siempre que cumplan con los requisitos regulatorios, metodológicos y de verificación aplicables.

De forma complementaria, el desarrollo en otros sectores de la economía de normas de emisión de gases de efecto invernadero y sus mecanismos de compensación puede generar una nueva demanda por proyectos de reducción de emisiones. Para efectos de diseño normativo, esto resulta especialmente relevante, ya que una norma de emisión de metano para rellenos sanitarios podría incentivar tanto el cumplimiento directo mediante inversión en tecnologías de control como la generación de reducciones certificables.

A nivel internacional, los mecanismos multilaterales y de cooperación climática también pueden aportar financiamiento para programas de mayor escala o con alto potencial transformacional. El Fondo Verde del Clima puede ofrecer subvenciones, préstamos, garantías o capital para proyectos climáticos de impacto relevante, especialmente cuando estos contribuyen a una transición baja en carbono y generan beneficios ambientales y sociales. En el caso de rellenos sanitarios, este tipo de financiamiento podría ser pertinente para programas agregados o carteras de proyectos que agrupen varios sitios, municipios o regiones, aumentando la escala y reduciendo costos de transacción.

Adicionalmente, los mecanismos del Artículo 6 del Acuerdo de París pueden constituir una fuente potencial de ingresos futuros posterior a la inversión inicial, a través de la venta o transferencia de resultados de mitigación internacionalmente transferidos u otros esquemas de certificación de reducciones de emisiones. Bajo este enfoque, países o actores privados internacionales podrían adquirir reducciones generadas por proyectos implementados en Chile, contribuyendo a mejorar los retornos sobre la inversión realizada. Para que esta alternativa sea viable, los proyectos deben demostrar adicionalidad, contar con sistemas robustos de medición, reporte y verificación, y cumplir con las reglas de contabilidad climática correspondientes. En rellenos sanitarios, esta opción puede ser especialmente relevante para medidas de captura y destrucción de metano o valorización energética, debido al alto potencial de mitigación del metano en comparación con el dióxido de carbono.

También pueden considerarse instrumentos de deuda verde, bonos verdes o financiamiento sostenible, particularmente en proyectos desarrollados por operadores privados, empresas sanitarias, asociaciones municipales o gobiernos regionales con capacidad de estructuración financiera. En el caso municipal, la emisión directa de bonos puede enfrentar restricciones institucionales y financieras, por lo que su factibilidad debe evaluarse caso a caso. No obstante, el uso de deuda verde estructurada a través de vehículos regionales, alianzas público-privadas o concesionarios puede ser una alternativa para proyectos de mayor tamaño o para carteras agregadas de rellenos sanitarios.

La Figura 9-1 presenta de forma resumida las principales alternativas de financiamiento y generación de ingresos disponibles para la implementación de medidas en rellenos sanitarios, diferenciando entre instalaciones municipales y concesionadas o privadas.

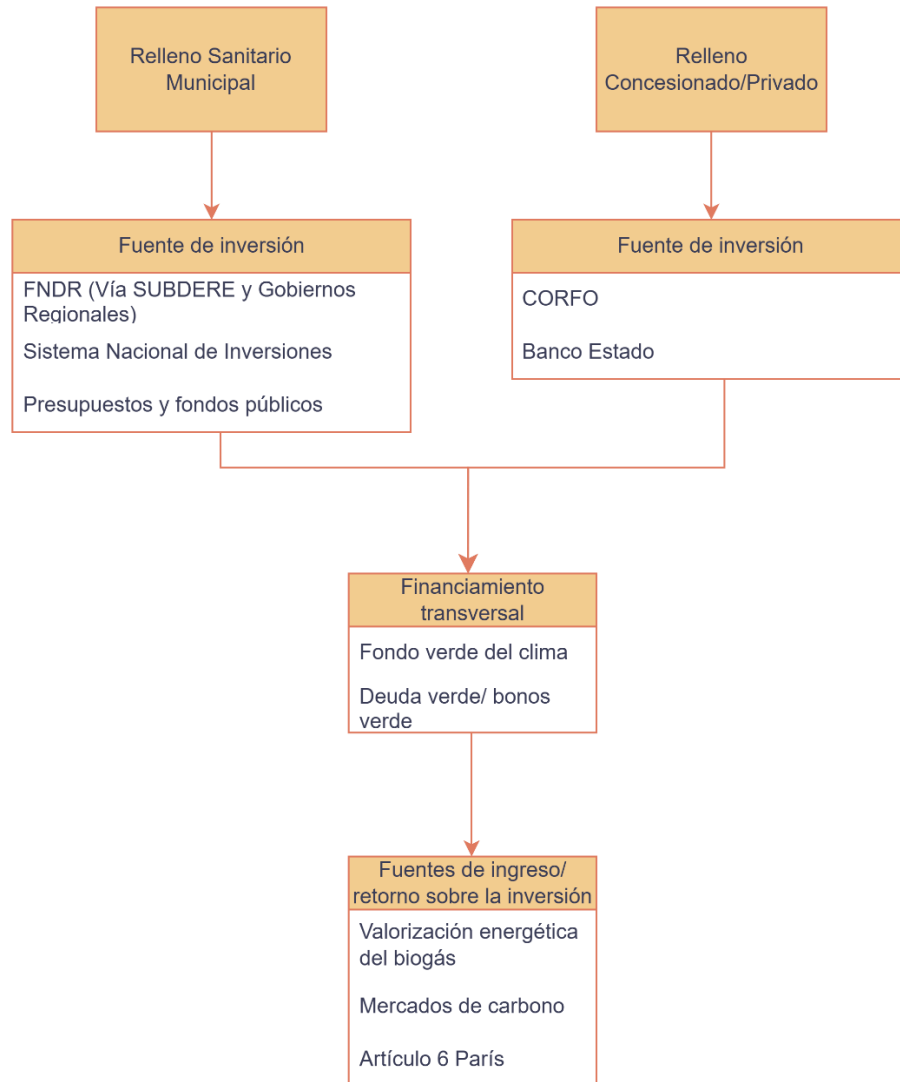


Figura 9-1 Alternativas de financiamiento para rellenos sanitarios

Fuente: Elaboración propia

9.3 Beneficios por el cumplimiento para la población e identificación de los co-beneficios para los titulares de las fuentes o sectores regulados

Los co-beneficios, considerados como beneficios adicionales a la reducción de emisiones de metano pueden identificarse tanto para la población como para los titulares de las fuentes o sectores regulados, y agruparse en beneficios ambientales, de salud pública y económicos.

Dentro de los co-beneficios ambientales, uno de los principales corresponde a la disminución del ozono troposférico (O_3). Al reducirse la cantidad de metano disponible en la atmósfera, disminuye también su participación en las reacciones fotoquímicas que, en presencia de NO_x , COV y radiación solar, favorecen la formación de ozono a nivel troposférico (CCAC, n.d.). Esta reducción puede generar efectos positivos sobre la salud de la población, la calidad de vida de la fauna silvestre y capacidad fotosintética de la vegetación, debido a que el ozono troposférico es un contaminante secundario asociado a impactos respiratorios, estrés oxidativo en plantas y disminución de la producción y calidad de los cultivos (Bermejo et al., n.d.).

Un aspecto relevante es que el metano rara vez se emite de forma aislada. En los rellenos sanitarios el biogás contiene, junto al metano, una mezcla de co-contaminantes —compuestos orgánicos volátiles (COV), amoníaco (NH_3), sulfuro de hidrógeno (H_2S), material particulado y precursores de ozono—, además de compuestos responsables de olores. Entre estos, el amoníaco actúa como precursor de material particulado fino secundario (MP_{2,5}), mientras que el sulfuro de hidrógeno se asocia a molestias por olores y a efectos respiratorios en la población cercana. Por ello, el fortalecimiento de los sistemas de captación y la combustión o el aprovechamiento del biogás no solo reducen las emisiones de metano, sino que también disminuyen la liberación de este conjunto de contaminantes, mejorando la calidad del aire local en el entorno del relleno. Adicionalmente, un mejor control del biogás reduce la probabilidad de incendios en el relleno, los que liberan carbono negro (forzante climático de vida corta), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) y material particulado fino. La magnitud de este co-beneficio depende del tipo y del estado operacional de cada instalación, ya que la composición de la pluma de emisiones difiere de manera importante entre un relleno adecuadamente gestionado y una instalación con manejo deficiente del biogás.

La mejora de la calidad del aire se traduce en beneficios directos para la salud de la población que habita en el entorno de los rellenos sanitarios. La menor exposición a ozono troposférico y a los co-contaminantes señalados se asocia con reducciones en la mortalidad prematura, en las consultas de urgencia y hospitalizaciones por causas respiratorias y cardiovasculares, en la carga de enfermedad medida en años de vida ajustados por discapacidad y en resultados adversos del embarazo. A escala global, el Global Methane Status Report 2025 (PNUMA) estima que la implementación plena de las medidas de abatimiento de metano podría evitar más de 180.000 muertes prematuras y cerca de 560.000 consultas de urgencia por asma al año hacia 2030, principalmente por la reducción del ozono troposférico. Dado que esta cifra considera solo los efectos asociados al ozono, subestima el beneficio total en salud de reducir las emisiones de las fuentes de metano, que comprende además los efectos de la pluma multicontaminante.

Estos beneficios en salud tienen, además, una dimensión distributiva relevante. Los rellenos sanitarios suelen emplazarse en las cercanías de comunidades de menores ingresos, por lo que las mejoras en la calidad del aire tienden a concentrarse en poblaciones históricamente más expuestas y vulnerables. Un análisis desagregado por sexo, edad y nivel socioeconómico

permitiría visibilizar esta distribución y fortalecer el caso de política pública para el control del metano, particularmente en territorios reconocidos por su alta carga ambiental acumulada.

Un co-beneficio adicional se vincula con el carácter del metano como forzante climático de vida corta, con una permanencia en la atmósfera de aproximadamente doce años, y elevado potencial de calentamiento. Por esta condición, su reducción constituye una de las pocas palancas capaces de disminuir tanto la magnitud como la duración de las olas de calor en el corto plazo, atenuando la carga sanitaria asociada a episodios de calor extremo: mayor mortalidad por calor, enfermedad cardiovascular y renal, y pérdidas de productividad laboral, que recaen de manera desproporcionada sobre las poblaciones más vulnerables. Este beneficio es particularmente relevante en territorios con alta exposición a olas de calor, donde la mitigación del metano contribuye simultáneamente a los objetivos climáticos y a la protección de la salud de la población frente al estrés térmico.

Otro co-beneficio ambiental corresponde a la reducción de riesgos de contaminación de suelos y cuerpos de agua. Si bien la norma se orienta al control de emisiones de metano, las mejoras necesarias en los sistemas de captación, conducción y manejo del biogás pueden incluir un fortalecimiento general de la operación del relleno sanitario. Esto puede contribuir a una mejor gestión de residuos y a la disminución de riesgos asociados a infiltraciones, escorrentías contaminadas y afectación de aguas superficiales o subterráneas, especialmente cuando las mejoras operacionales incluyen control de lixiviados, mantención de coberturas y manejo adecuado de las instalaciones.

Respecto de los co-beneficios económicos, se identifican beneficios asociados a la reducción de costos operacionales. En primer lugar, el biogás captado puede ser utilizado como recurso energético, ya sea para generación eléctrica, aprovechamiento térmico o sustitución parcial de combustibles convencionales (EPA, 2016b). Esto permite que los rellenos sanitarios reduzcan su dependencia de fuentes externas de energía y, en algunos casos, disminuyan los costos asociados al consumo energético. Asimismo, empresas o instalaciones cercanas podrían beneficiarse del uso del biogás como sustituto de combustibles de mayor precio, siempre que existan las condiciones técnicas y logísticas para su aprovechamiento (EPA, 2026). La estimación del co-beneficio económico asociado a los ingresos por generación eléctrica se incluye en el análisis de costos de cada escenario.

Además, la mejora en los sistemas de captación y manejo del biogás puede generar costos evitados para los titulares, al disminuir la probabilidad de riesgos operacionales asociados a la acumulación de gases, tales como ignición interna, incendios o explosiones. De esta forma, el control del metano no solo contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también puede mejorar la seguridad operativa y reducir gastos futuros en mantención correctiva, emergencias o daños en la infraestructura (EPA, 2026).

Finalmente, los co-beneficios en salud descritos se pueden valorizar económicamente. Los daños en salud evitados pueden valorizarse monetariamente mediante los enfoques de valor de la vida estadística, costo de enfermedad y pérdidas de productividad, e incorporarse —junto con los costos y ahorros privados de las medidas de captación y aprovechamiento del biogás— en un análisis costo-beneficio. A continuación, se presenta la Tabla 9-13 en la cual se plantean los co-beneficios considerados.

Tabla 9-13 Co-beneficios asociados a cumplimiento de medidas de reducción de metano

Categoría	Co-beneficio	Descripción	Beneficios principales
Ambiental	Disminución de ozono troposférico (O ₃)	La reducción de metano en la atmósfera reduce la generación de ozono troposférico, minorizando sus impactos asociados.	Población, fauna silvestre, vegetación, ecosistemas y sector agrícola.
	Reducción de riesgos de contaminación de suelos y aguas	El mayor control de biogás fortalece la operación general del relleno sanitario, reduciendo riesgos de infiltraciones, escorrentías contaminadas y afectación de aguas superficiales o subterráneas, especialmente si se complementan con control de lixiviados y mantención de coberturas.	Comunidades cercanas, ecosistemas y titulares de RS.
	Mejora de la calidad del aire local	La captación y combustión o aprovechamiento del biogás reduce, junto con el metano, un conjunto de co-contaminantes (COV, NH ₃ (precursor de MP2,5 secundario)), H ₂ S, material particulado y precursores de ozono) y los olores asociados a la operación; además, un mejor control reduce los incendios en el relleno, que liberan carbono negro, HAP y MP2,5.	Comunidades cercanas, población, ecosistemas.
Climático / Salud	Atenuación del calentamiento de corto plazo	Por su condición de forzante climático de vida corta, la reducción del metano disminuye el calentamiento de corto plazo y la carga sanitaria asociada a olas de calor, especialmente en territorios de alta exposición térmica.	Población, comunidades cercanas.
Salud	Reducción de la carga de enfermedad en la población	La menor exposición a ozono y co-contaminantes disminuye la mortalidad prematura, las consultas de urgencia respiratorias y cardiovasculares, los años de vida ajustados por discapacidad y los resultados adversos del embarazo, con beneficios concentrados en las comunidades aledañas.	Comunidades cercanas (en especial grupos vulnerables), sistema de salud.
Económico	Aprovechamiento energético del biogás	El biogás captado puede utilizarse para generación eléctrica, aprovechamiento térmico o sustitución parcial de combustibles convencionales, disminuyendo la dependencia de energía externa y los costos asociados al consumo energético	Titulares de RS, empresas locales e instalaciones cercanas
	Seguridad operativa	La mejora en los sistemas de captación y manejo del biogás reduce la acumulación de gases y, con ello, la probabilidad de ignición interna, incendios o explosiones, evitando gastos por emergencias, mantención correctiva o daños en infraestructura	Titulares RS, relleno sanitario, comunidades cercanas, ecosistemas

Fuente: Elaboración propia

9.4 Análisis comparativo entre los escenarios

El análisis comparativo se estructura en la Tabla 9-14 como un análisis de ventajas y desventajas de cada escenario para generar una discusión crítica entre éstos y lograr proponer el candidato ideal para la elaboración de la futura norma de emisión.

Tabla 9-14 Matriz de análisis comparativo entre escenarios de norma

Escenario normativo	Ventajas	Desventajas
Reducción proporcional uniforme, límite fijo con base 2050 (ED1xET1)	■ Máxima simplicidad regulatoria y de fiscalización. ■ Equidad formal: mismo % exigido a todos los rellenos. ■ Trayectoria sin escalones, predecible para inversión. ■ Acelera reducciones desde 2030, ahorra presupuesto de carbono temprano. ■ Señal regulatoria fuerte e inequívoca.	■ Ignora heterogeneidad técnica/económica entre rellenos. ■ Costo marginal de abatimiento muy alto en sitios pequeños o sin captura instalada. ■ Riesgo elevado de incumplimiento o cierre prematuro en sitios menos preparados. ■ Equidad formal ≠ equidad material: igual % no implica igual esfuerzo.
Diferenciado por tamaño del relleno, límite fijo con base 2050 (ED2xET1)	■ Reconoce que rellenos grandes tienen mejor capacidad técnica (captura biogás, valorización energética). ■ Concentra esfuerzo donde está la mayor masa emisora (Loma Los Colorados, Santa Marta, Stgo. Poniente concentran ~50% de las emisiones). ■ Costo-eficiente: aprovecha economías de escala en abatimiento. ■ Reduce riesgo de cierres en sitios pequeños/medianos.	■ Aumenta complejidad regulatoria (definición de umbrales y transiciones entre categorías). ■ Posibles incentivos perversos: mantenerse bajo el umbral de "Grande" para evitar mayor exigencia. ■ Sitios grandes podrían alegar trato desproporcionado. ■ Aún ignora factores climáticos y geográficos relevantes para generación de CH₄. ■ Carga inmediata desde 2030 es alta.
Diferenciado por zona climática y tamaño del relleno, límite fijo con base 2050 (ED3xET1)	■ Máxima pertinencia técnica: la generación de metano depende de temperatura y humedad (la zona Sur tiene menor tasa de degradación anaerobia). ■ Metas calibradas a realidad biogeoquímica del proceso. ■ Más justa desde el punto de vista físico-químico. ■ Reduce riesgo de incumplimiento donde el clima limita la captura.	■ Es la opción más compleja del set ET1: doble criterio puede generar muchas categorías. ■ Requiere zonificación climática consensuada y datos técnicos confiables. ■ Costos administrativos y de fiscalización elevados. ■ Disputas potenciales por sitios en zonas de transición climática. ■ Incentivo perverso: localizar nuevos rellenos en zonas de menor exigencia.
Reducción proporcional	■ Mantiene la simplicidad regulatoria de ED1.	■ Mayor consumo del presupuesto de carbono en el primer decenio.

Escenario normativo	Ventajas	Desventajas
uniforme, límite diferenciado 2030-2040 y 2041-2050 (ED1xET2)	- Reduce riesgo de cierres masivos en el corto plazo. - Mejor aceptabilidad política y empresarial por gradualidad. - Permite escalar inversión en captura/valorización.	- Salto regulatorio 2040 → 2041 puede generar "shock" abrupto. - Atrasa la señal de inversión en infraestructura de captura. - Persiste la inequidad material entre rellenos heterogéneos. - Incentiva postergar lo difícil.
Diferenciado por tamaño del relleno, límite diferenciado 2030-2040 y 2041-2050 (ED2xET2)	- Combina equidad por capacidad (tamaño) con gradualidad temporal. - Posiblemente la opción de mayor viabilidad política-económica. - Permite a las empresas planificar CAPEX escalonado. - Bajo riesgo de cierres tempranos.	- Doble complejidad: distribución por tamaño + escalón temporal. - Postergación puede consolidar compromiso tecnológico en grandes sitios. - Salto en 2041 puede gatillar tensiones contractuales con concesionarios. - Mayor uso de presupuesto de carbono en 2030s.
Diferenciado por zona climática y tamaño del relleno, límite diferenciado 2030-2040 y 2041-2050 (ED3xET2)	- Máxima pertinencia técnica con gradualidad temporal. - Calibra la exigencia a la biogeoquímica del proceso y da plazo de adecuación. - Mejor aceptación política en regiones climáticamente desfavorables. - Reduce riesgo de cierres en zona Sur.	- El escenario más complejo del set (triple criterio: clima × tamaño × período). - Difícil de fiscalizar, comunicar y aplicar judicialmente. - Riesgo de captura regulatoria por categorías muy específicas. - Incentivo a relocalizar nuevos rellenos a zonas de menor exigencia. - Mayor uso temprano del presupuesto de carbono.

Fuente: Elaboración propia

La diferencia evidente entre los enfoques temporales es que el fijar el límite de emisión en base a la reducción necesaria al año 2050 al momento de entrada en vigencia de la norma, es decir el año 2030, se maximiza el potencial ambiental y entrega señales fuertes de requerimiento de inversión, pero arriesga la viabilidad y cumplimiento debido a una reducción entre 304-313% durante la década 2030-2040. Por otro lado, el segundo enfoque con una aplicación escalonada de los límites de emisión calculados en base a los años 2030 y 2050, se sacrifica aproximadamente un 13% del potencial total de reducción con el fin de favorecer una política más sostenible, lo cual no pone en riesgo el cumplimiento de las metas sectoriales y mantiene alineamiento con la trayectoria de carbono neutralidad.

Luego de realizar el análisis de costos en cuanto a las diferentes formas de distribuir los límites de emisión y, por lo tanto, los esfuerzos de mitigación para cada relleno, se establece un resultado a nivel agregado que es prácticamente insensible a la elección: Los tres escenarios logran esencialmente la misma reducción sectorial al 2050 ($\approx 8.140 \text{ GgCO}_2\text{e/año}$), son consistentes con los objetivos de la norma y en todos ellos la tecnología más costo-efectiva es la misma: **Captura activa + Valorización energética**. La diferencia entre escenarios no está en si se

logra el objetivo, sino en cómo se distribuye el esfuerzo y qué tan viable es ese esfuerzo para cada relleno.

El Escenario Distributivo 1 asigna el mismo factor de reducción (37% del BAU) a todos los rellenos, lo que parece equitativo, pero en la práctica no lo es: obliga a los 25 rellenos pequeños — generalmente de titulares municipales, de baja capacidad financiera, ubicados en zonas donde el biogás disponible apenas justifica un sistema activo— a instalar el mismo nivel de infraestructura que Loma Los Colorados, por ejemplo. El costo total sectorial bajo el ED1 asciende a USD 513 M en CAPEX, unos USD 46-48 M más que en los demás escenarios, sin ningún beneficio adicional en reducción de emisiones. Esos USD 46-48 M representan el costo de forzar a rellenos pequeños a sobre cumplir un límite que podría alcanzarse con tecnologías de menor escala. Además, el VAN neto sectorial es el menos negativo de los tres (-\$109 M frente a -\$176 y -\$179 M), lo que indica que el costo financiero neto del cumplimiento es mayor bajo este esquema.

El Escenario Distributivo 3 presenta un potencial problema de redundancia en la segregación de los rellenos, dado que la metodología de cálculo de límites de emisión considera utilizar una proporción de la proyección de línea base (BAU), cuyo valor desde el año base se calcula utilizando la metodología del IPCC (ver Sección 4.3) e incorpora la diferenciación por zona climática. Por lo tanto, dado que se le aplica a cada relleno un límite en base a su propia emisión estimada, que ya considera una tasa de generación de metano inferior para aquellos ubicados en zonas secas, no parece necesaria otra diferenciación para distribuir la responsabilidad sectorial. Además, la metodología para determinar los límites no vincula actualmente variables climáticas.

Por lo tanto, según un análisis integral de ventajas y desventajas, incluyendo el análisis de costos de cada escenario, el “Escenario Distributivo 2: Diferenciado por tamaño del relleno” cumple con las características para ser el recomendado, por las siguientes razones:

1. Responde al reconocimiento de la principal variable que determina el esfuerzo de reducción requerido: la masa de residuos sólidos dispuestos (particularmente, su fracción orgánica), la cual presenta una composición variable según la caracterización de cada uno de los 40 rellenos sanitarios y tendrá una emisión de metano diferenciada según su zona climática de localización.
2. Es relativamente sencillo de explicar, comunicar e implementar, dado que genera una agrupación básica de las fuentes emisoras, pero de todas maneras individualiza el límite de emisión para cada futuro regulado en función de su propia capacidad de generación de biogás y, por ende, metano.
3. CAPEX total de USD 466 M y un VAN Neto de USD -234 M (prácticamente idéntico al del ED3, por lo cual se refuerza que esta alternativa no genera diferencias sustantivas), este escenario genera una menor carga financiera neta para el sector. La diferencia de USD 49 M de CAPEX respecto al Escenario Distributivo 1, es significativa, además de presentar un VAN Neto más atractivo en USD 67,5 M.

Los 25 rellenos pequeños que pueden cumplir con tecnología pasiva bajo este escenario deben contar con instrumentos de acompañamiento para transitar hacia sistemas activos en el mediano plazo, dado que estos son más costo-efectivo incluso para ellos, una vez que el financiamiento está disponible.

Considerando criterios ambientales, proporcionalidad técnica, viabilidad financiera y coherencia regulatoria, el Escenario Distributivo 2 resulta recomendable. Es el que tiene mayor sustento metodológico, el que genera la distribución de carga más justa y eficiente entre los 40 rellenos del sector y es relativamente fácil de explicar y comunicar.

Respecto al Escenario Temporal, se recomienda el Escenario Temporal Escalonado, con el objetivo de garantizar gradualidad regulatoria y alineamiento con la trayectoria de carbono neutralidad.

Finalmente, en el contexto del diseño de una norma de emisión y en línea con los criterios de gradualidad y justicia, de forma transversal a todo escenario, resulta razonable evaluar la eximición de aquellos titulares de rellenos sanitarios que cumplen con características especiales. En particular, en este caso, se hace referencia a aquellos que poseen un menor tamaño y que, además, son de titularidad municipal, por lo cual el financiamiento para cumplir con la futura regulación representa desafíos y complejidades significativas. En ese sentido, tomando también en consideración el criterio de umbral de entrada al SEA para rellenos sanitarios de atender a una población mayor o igual a 5.000 [habitantes] -o recibir a disposición una masa mayor o igual a 50 [t/día] de residuos sólidos industriales, es decir, 18.250 [t/año] (Ministerio del Medio Ambiente, 2013), como también el umbral de la propuesta de actualización del DS189 del MINSAL (ver Sección 7.1.5) para exigir un sistema de captura activa de biogás en aquellos rellenos sanitarios que atiendan a una población mayor o igual a 20.000 [habitantes] o que reciban una carga orgánica mayor o igual a 4.000 [t/año], es posible identificar 10 rellenos sanitarios que pertenecen a la agrupación “pequeños” (Sección 6.3.2 y Sección 6.4.4.2), pero que podrían recategorizarse como “micro rellenos” y que resultaría razonable eximirlos. Éstos, entre los años 2030 y 2050, suman un total de 454 [ktCO₂eq], correspondiente al 0,2% de las emisiones del período de aplicación de la norma y quedarán exentos de la aplicación de las exigencias de, al menos, la actualización del DS189/2005 del MINSAL.

10. Conclusiones

El presente estudio se enmarca en los artículos 14 y 15 de la Ley N° 21.455 (Ley Marco de Cambio Climático) y tuvo por objetivo proveer los insumos técnicos y económicos que permitan al Ministerio del Medio Ambiente (MMA) elaborar una norma de emisión de metano para rellenos sanitarios y su sistema de compensación, en coordinación con el Decreto Supremo N° 12/2024 y el Plan Sectorial de Mitigación (PSM) del Ministerio de Salud. Los siete objetivos específicos fueron abordados y cumplidos, con la salvedad de que el objetivo referido al Decreto Supremo N° 189 fue reformulado de común acuerdo con la Contraparte Técnica tras el cierre de su consulta pública, pasando de proponer antecedentes para su actualización a sistematizar el decreto ya actualizado para su análisis.

En materia de referencias regulatorias, el levantamiento recopiló veinte instrumentos provenientes de nueve países, complementados con entrevistas a autoridades de California, Quebec, Nueva Zelanda y Reino Unido. El análisis evidenció una convergencia internacional hacia exigencias tecnológicas de captura y control del biogás, esquemas robustos de monitoreo, reporte y verificación (MRV) y mecanismos de cumplimiento con sanciones, con referencias recurrentes a límites de concentración superficial del orden de 500 ppmv y eficiencias de destrucción superiores al 97%.

La caracterización del país identificó 110 sitios de disposición final —49 rellenos sanitarios, 36 vertederos y 25 basurales—, de los cuales 40 rellenos sanitarios se encuentran en operación y constituyen el universo del análisis normativo. Sobre esa base se reconstruyó la serie histórica de niveles de actividad entre 1950 y 2024 mediante un modelo en el *software Analytica* que integra datos del INGEI, SINADER, censos del INE y registros del SII, y se estimaron las emisiones anuales de metano con la metodología de Decaimiento de Primer Orden (FOD, Tier 2) del IPCC (2006/2019), proyectándolas hasta 2050. Dado que la confiabilidad de estas estimaciones depende de parámetros que se transfieren de referencias internacionales, se recomienda que el MMA, en su norma y guía de cumplimiento, permita que tanto tasas de oxidación como eficiencias de captura y destrucción puedan ser actualizadas con información nacional, habilitando un mecanismo formal para que los titulares puedan proponer parámetros calibrados localmente respaldados por campañas de medición.

Respecto de las soluciones tecnológicas, el informe organizó las medidas en tres grupos funcionales —mejoras en la eficiencia de captura del gas de relleno, dispositivos de control del biogás y tecnologías de incremento de la bio-oxidación del metano— con potenciales de reducción que se sitúan desde 32% con biocobertura, entre 50% y 70% por oxidación en biofiltros y hasta rangos de 95 a 99% en antorchas y motores. La captura activa con valorización energética se identifica como la alternativa más costo-efectiva para todos los tamaños de relleno, considerando que los ingresos por oferta de electricidad superan el costo operacional. Sin embargo, su alta inversión inicial excede la capacidad de endeudamiento de muchos rellenos de menor tamaño de titularidad municipal, lo que constituye su principal barrera de

implementación. Se recomienda que el MMA, en coordinación con SUBDERE y los gobiernos regionales, estudie la factibilidad de habilitar instrumentos de financiamiento a través del Fondo Nacional de Desarrollo Regional, créditos blandos, subsidios parciales al CAPEX o agregación de proyectos en carteras financiables, para la promoción de esta tecnología.

Para el diseño de los escenarios de norma de emisión, se asignaron metas de cada relleno sanitario según cinco escenarios: proporcional uniforme, por tamaño, y por zona climática y tamaño), temporales (límite fijo, escalonado y lineal) y de umbral de excedencia (estándar puro y flexible), anclados a presupuestos sectoriales de 6.400 ktCO₂eq al 2030 y 4.800 ktCO₂eq al 2050.

Los escenarios de norma convergen en una reducción sectorial prácticamente idéntica al 2050, del orden de 8.140 ktCO₂eq por año. El análisis concluye que el escenario proporcional uniforme fuerza a los rellenos de menor tamaño a un CAPEX de USD 515,4 millones, unos USD 49 millones superior a otros escenarios, mientras que el escenario diferenciado por tamaño alcanza el mismo resultado en emisiones a un costo menor de USD 466,0 millones e individualiza el límite según la capacidad de generación de cada sitio. Sobre esta base, el escenario recomendado, siguiendo el reglamento de normas de emisión vigente, es el escenario diferenciado por tamaño bajo un perfil temporal escalonado entre 2030-2040 y 2041-2050, que entrega gradualidad y previsibilidad de inversión.

De forma transversal, resulta interesante considerar eximir de cumplimiento de esta norma de emisión a un subgrupo de rellenos sanitarios y que se podrían clasificar como "micro rellenos". Estos corresponden a 10 rellenos de titularidad municipal, cuyas emisiones suman 454 ktCO₂eq en 2030-2050, equivalentes al 0,2% del período de aplicación. Esto también en consistencia con otras regulaciones que los eximen de obligaciones, como los umbrales de ingreso al SEIA en el DS40/2012 MMA para rellenos sanitarios o los umbrales de exigencia de sistemas de captura activa de biogás en la propuesta de actualización del DS189/2005 MINSAL.

El análisis del Decreto Supremo N° 189 actualizado permitió establecer una línea base, al sistematizar la obligación de extracción activa de biogás para rellenos sobre seis metros de altura y las eficiencias de destrucción de 99% en antorcha cerrada y 98% en valorización energética. Se identifica aquí una tensión regulatoria: por una parte, la propuesta de actualización del DS189/2005 del MINSAL establece una exigencia de captura y quema de lo máximo posible para cada regulado, con el objetivo de abordar riesgos sanitarios y de seguridad, y que se traduce en una obligación de mitigación del metano. Paralelamente, la futura norma de emisión fijará límites que mandatará a los regulados a alcanzar ciertas tasas de mitigación respecto a sus emisiones anuales. Dado este contexto normativo, los titulares de rellenos sanitarios deberán cumplir con la regulación más estricta dadas sus condiciones propias.

Se aprecia, que si el DS 189/2005 MINSAL obliga a la máxima captura quema posible a la totalidad de los rellenos, tal y como está escrito actualmente en su versión posterior a la consulta pública, se hace incompatible la participación de los rellenos sanitarios en mercados de carbono o

esquemas de transacción de emisiones (ETS) debido al criterio de adicionalidad, ya que cualquier mitigación técnicamente posible sería en cumplimiento del DS189. Esta limitación genera mayor rigidez para los regulados en el cumplimiento normativo, dado que elimina el componente de cumplimiento flexible que entrega el Art. 15 de la LMCC. Es relevante y necesario que se mantenga un nivel de captura y quema en el DS 189 de acuerdo a sus objetivos sanitarios y de seguridad, no obstante, resulta recomendable precisar este valor, que como mínimo permita cumplir con los objetivos del MINSAL, permitiendo eficiencia económica en el cumplimiento normativo. En caso de que este valor se encuentre definido, podría permitir la compatibilidad entre ambas regulaciones.

En cuanto a la fiscalización asociada a la propuesta de norma de emisión, este análisis propone un esquema en dos líneas, la inspección de la instalación de las tecnologías y el seguimiento sistemático del flujo y composición del biogás y de la eficiencia de oxidación, identificando a los operadores, la Superintendencia del Medio Ambiente y el MINSAL como actores relevantes. Un resultado central es que los equipos de medición no constituyen un costo adicional de fiscalización, pues ya están incorporados en el CAPEX y el OPEX de los sistemas de captura activa, mientras que el costo fiscal incremental se concentra en el andamiaje regulatorio del MRV. Dado que la norma de emisión y el Decreto Supremo N° 189 modificado recaen sobre los mismos datos, pero son fiscalizados por autoridades distintas, se recomienda integrar la información en un canal común de reporte, tomando como base el flujo y composición del biogás que ya exige la Resolución Exenta 431/2021 de la Superintendencia, de modo de evitar duplicidad de exigencias sobre los titulares y mantener la trazabilidad para cada autoridad.

Finalmente, el análisis técnico-económico, construido con curvas de costo por tecnología, confirma que el escenario recomendado proyecta reducciones que superan ampliamente la mitigación esperada de la Medida N°2 del PSM del sector Salud —44.900 ktCO₂eq acumulados para 2020-2050. De este modo, la norma de emisión propuesta no solo entrega los antecedentes técnicos y económicos requeridos por la Ley Marco de Cambio Climático, sino que se proyecta como un instrumento capaz de asegurar la contribución del sector rellenos sanitarios a la trayectoria de carbono neutralidad al 2050.

Más allá de los resultados anteriores, el diseño de la norma de emisión enfrenta un conjunto de desafíos conceptuales que, resultan importantes de tener a la vista al momento de su diseño final.

Un primer desafío, de carácter estructural, radica en el desacople entre la unidad en que se expresa la norma —una emisión anual, en ktCO₂eq por año— y la naturaleza física de las emisiones de un relleno sanitario. La emisión de un año determinado no depende únicamente de los residuos dispuestos ese año, sino de toda la masa orgánica acumulada desde el inicio de la operación, dinámica que el propio modelo de Decaimiento de Primer Orden (FOD) describe: la emisión corriente está dominada por la masa histórica y no por el flujo del año.

De lo anterior se desprende un segundo desafío: la base de cálculo sobre la cual se asigna la obligación. El cierre de un relleno plantea una regla de borde específica: cuando deja de recibir residuos, sus emisiones físicas continúan por décadas, por lo que el titular debe hacerse cargo de su pasivo ambiental, la integral de las emisiones futuras proyectadas, y solo podría transar como excedentes las reducciones netas una vez descontadas esas emisiones remanentes. Ello evita que un operador cierre el sitio y comercialice créditos sin responder por las emisiones posteriores al cierre.

Un tercer desafío se relaciona con la información imperfecta sobre los residuos históricos. La masa dispuesta antes de la entrada en vigencia de la norma tiene una historia de composición, manejo y cobertura solo parcialmente conocida, por lo que no admite la misma precisión de cálculo que los depósitos actuales. Esto podría sugerir una regla de transición diferenciada: aplicar un factor de generación (L_0) por defecto y conservador, del orden de un Tier 1 del IPCC, a la masa histórica, y un L_0 verificado —Tier 2 o Tier 3, con monitoreo de composición— a la masa depositada con posterioridad a la norma.

Un cuarto desafío atañe al período de verificación del cumplimiento. Las emisiones presentan variaciones interanuales significativas por factores climáticos, la precipitación altera la tasa de generación k , ineficiencias operacionales, fallas o mantención de los sistemas de captura, ampliación de la red de pozos, y de composición estacional de los residuos, de modo que verificar el cumplimiento en un único año podría introducir un ruido excesivo. Se recomienda evaluar entonces, verificar sobre un promedio móvil de al menos tres años, criterio que suaviza las fluctuaciones sin perder señal regulatoria y que es consistente con la práctica en normas de calidad del aire, por ejemplo. Este enfoque se articula, a su vez, con el esquema de MRV descrito, al definir la ventana temporal sobre la cual se contrastan la emisión medida y el límite asignado.

Un quinto desafío corresponde al diseño del mercado de reducciones y a su rol en la suavización temporal del esfuerzo sectorial. Dado que algunos rellenos podrán sobrecumplir antes de lo exigido por la trayectoria normativa, habilitar la transacción de sus reducciones en exceso hacia sitios que difieren su inversión permitiría distribuir la reducción en el tiempo al mínimo costo para el sector, en lugar de concentrarla en un escalón abrupto en el año de cumplimiento. Un mercado de este tipo entrega, además, una señal de precio que revela el costo marginal sectorial de abatimiento y, al permitir transar reducciones futuras esperadas, configura un instrumento financiero que facilita el acceso a capital para la inversión en captura activa, precisamente la barrera identificada para los rellenos municipales de menor tamaño. Ahora bien, la viabilidad de este mercado depende críticamente de resolver la tensión de adicionalidad ya señalada respecto del DS 189: solo si la exigencia sanitaria de captura y quema queda acotada a un valor definido será posible que las reducciones adicionales tengan existencia regulatoria y, con ello, valor transable.

11. Bibliografía

- Abichou, T., Chanton, J., Powelson, D., Escoriaza, S., Yuan, L., Anunsen, S., Fliegler, J., Morales, J., & Tyner, W. (2006). *FIELD PERFORMANCE OF BIOCELLS, BIOCOVERS, AND BIOFILTERS TO MITIGATE GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM LANDFILLS*. www.floridacenter.org
- BAAQMD. (2008). *Greenhouse Gas Mitigation: Landfill Gas and Industrial, Institutional and Commercial Boilers, Steam Generators and Process Heaters*.
- Banco Mundial. (2021). *Situación y Tendencias de la Fijación del Precio al Carbono 2021*. World Bank.
- Bermejo, V., Alonso del Amo, R., Cozar, S., & Rábago, I. (n.d.). *El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación*.
- Bortoletto, W. W., Pacagnella Junior, A. C., & Cabello, O. G. (2023). Exploring the scientific literature on clean development mechanisms: A bibliometric analysis. *Energy Policy*, 183. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113806>
- CalRecycle. (2020). *Short-lived Climate Pollutants (SLCP): Organic Waste Reductions*. <https://calrecycle.ca.gov/organics/slcp/>
- CARB. (2010). *Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfills Regulation*. <https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/landfill-methane-regulation>
- CARB. (2016). *Implementation Guidance Document for the Regulation to Reduce Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfills*. https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-07/LMR_ImplementationGuidance.pdf?utm_source=chatgpt.com
- CARB. (2017). *Short-Lived Climate Pollutant Reduction Strategy*. <https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/slcp-strategy-final#:~:text=The%20Short%2DLived%20Climate%20Pollutant,of%20black%20carbon%20by%202030.>
- CCAC. (n.d.). *OZONO TROPOSFÉRICO*. Retrieved April 28, 2026, from <https://www.ccacoalition.org/es/short-lived-climate-pollutants/tropospheric-ozone>
- Consejo de la Unión Europea. (1999). *Directiva 1999/31/EC*. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1999-81425>
- Department of Ecology. (2024a). *RCW LANDFILLS-METHANE EMISSIONS (Chapter 70A.540)*. <https://app.leg.wa.gov/RCW/default.aspx?cite=70A.540>
- Department of Ecology. (2024b). *WAC LANDFILL METHANE EMISSIONS (Chapter 173-408)*. <https://app.leg.wa.gov/wac/default.aspx?cite=173-408>
- Department of Environmental Quality. (2025). *Division 239 - Landfill Gas Emissions*. <https://secure.sos.state.or.us/oard/displayChapterRules.action?selectedChapter=80>
- Department of Public Health and Environment. (2020). *Colorado Greenhouse Gas Reporting and Emission Reduction Requirements*. <https://www.sos.state.co.us/CCR/DisplayRule.do?action=ruleinfo&ruleId=3325&deptID=16&agencyID=7&deptName=Department%20of%20Public%20Health%20and%20Environment&agencyName=Air%20Quality%20Control%20Commission&seriesNum=5%20CCR%201001-26>

- Department of the Environment. (2003). *The Landfill Regulations (Northern Ireland) 2003*. <https://www.legislation.gov.uk/nisr/2003/496/contents/made>
- Department of the Environment. (2004). *The Landfill (Amendment) Regulations (Northern Ireland) 2004*. <https://www.legislation.gov.uk/nisr/2004/297/contents>
- Department of the Environment Maryland. (2022). *COMAR 26.11.42 - Control of Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfills*. <https://www.maryland.gov/pages/search.aspx?q=methane%2c+landfills%2c+regulation&site=jvmcacnyjwo&name=Environment#gsc.tab=0&gsc.q=methane%2C%20landfills%2C%20regulation&gsc.page=1>
- Dever, S. A., Swarbrick, G. E., & Stuetz, R. M. (2011). Passive drainage and biofiltration of landfill gas: Results of Australian field trial. *Waste Management*, 31(5), 1029–1048. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.026>
- EH. (n.d.). *Caudalímetro Vortex Proline Prowirl F 200*. Retrieved www.cl.endress.com/7F2C
- EO. (2025, November 11). *Villa Alemana se adjudicó Inédita Planta Municipal de Compostaje*. https://www.observador.cl/villa-alemana-se-adjudico-inedita-planta-municipal-de-compostaje/?utm_source%20;https://insights-engine.refed.org/solution-database/centralized-composting?utm_source
- EPA. (n.d.). *Mitigación global de gases de efecto invernadero distintos del CO2: vertederos*. Retrieved April 23, 2026, from https://19january2017snapshot.epa.gov/global-mitigation-non-co2-greenhouse-gases/global-mitigation-non-co2-greenhouse-gases-landfills_.html?utm_source=chatgpt.com
- EPA. (1991). *Title 40-Protection of Environment Chapter I-Subchapter I-Solid Wastes*. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-I/part-258>
- EPA. (2004). *Research, Development, and Demonstration Permits for Municipal Solid Waste Landfills*.
- EPA. (2011). *AVAILABLE AND EMERGING TECHNOLOGIES FOR REDUCING GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS*.
- EPA. (2016a). *Environmental Guidelines Solid waste landfills*. <https://www.epa.nsw.gov.au/Publications/waste/solid-waste-landfill-guidelines-160259>
- EPA. (2016b). *U.S. EPA Landfill Methane Outreach Program and Landfill Gas Energy: Creating partnerships and renewable energy across the country*. www.epa.gov/lmop
- EPA. (2018). *Revisions to the Criteria for Municipal Solid Waste Landfills To Address Advances in Liquids Management*. <http://www.epa.gov/dockets/>
- EPA. (2024). *LFG Energy Project Development Handbook*.
- EPA. (2026, April 3). *Benefits of Landfill Gas Energy Projects*. <https://www.epa.gov/lmop/benefits-landfill-gas-energy-projects>
- Gobierno de Chile. (2020). *CONTRIBUCIÓN DETERMINADA A NIVEL NACIONAL (NDC) DE CHILE*. https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/08/NDC_2020_Espanol_PDF_web.pdf
- Gobierno de Chile. (2021a). *Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile*.
- Gobierno de Chile. (2021b). *Hoja de Ruta para un Chile circular al 2040*. 1–127.

- Gobierno de Chile. (2025). *Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales*.
- Hall, A. L., Potts, M. D., & Silve, W. L. (2022). *Near-term potential of organic waste management infrastructure for soil carbon sequestration in rangelands*.
- Huber-Humer, M., Gebert, J., & Hilger, H. (2008). Biotic systems to mitigate landfill methane emissions. *Waste Management and Research*, 26(1), 33–46. <https://doi.org/10.1177/0734242X07087977>
- ImplementaSur. (2024). *Evaluación general de alternativas para la mitigación de emisiones de metano de rellenos sanitarios*.
- IPCC. (2006a). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de GEI: Orientación* (Number 1).
- IPCC. (2006b). Volume 5, Chapter 3: Solid waste disposal. In *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. (pp. 1–40).
- IPCC. (2013a). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis - Full Report* (Number September 2013). http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI-12Doc2b_FinalDraft_All.pdf
- IPCC. (2013b). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis - Summary For Policy Makers* (Number September 2013).
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Kinman, R. N., Nutini, D. L., Walsh, J. J., Vogt, W. G., Stamm, J., & Rickabaugh, J. (1987). GAS ENHANCEMENT TECHNIQUES IN LANDFILL SIMULATORS. In *Waste Management & Research* (Vol. 5).
- Kriipsalu, M., Somani, M., Pehme, K., Tamm, O., Truu, J., Truu, M., & Orupold, K. (2023). Performance of biocover in controlling methane emissions from landfill: A decade of full-scale investigation. *Process Safety and Environmental Protection*, 172, 486–495. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.02.048>
- Melse, R. W., & Van Der Werf, A. W. (2005). Biofiltration for mitigation of methane emission from animal husbandry. *Environmental Science and Technology*, 39(14), 5460–5468. <https://doi.org/10.1021/es048048q>
- MESSER. (n.d.). *Metano. Propiedades principales*.
- METTLER TOLEDO. (n.d.). *GPro 500 TDL Series Compact Spectrometer with Versatile Process Adaptions*.
- MINENERGIA, PNUD, FAO, & GEF. (2011). *Manual de Biogás*.
- Minister of Sustainable Development. (2025a). *Regulation respecting a cap-and-trade system for greenhouse gas emission allowances* (Cap. Q-2, R.46.1). <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/en/document/cr/Q-2,%20r.%2046.1>
- Minister of Sustainable Development. (2025b). *Regulation respecting the landfilling and incineration of residual materials* (Cap. Q-2, r.19). <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/en/document/cr/q-2,%20r.%2019>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Estrategia Climática de Largo Plazo*.

- Ministerio de Hacienda. (2014). *Ley 20.780 - Reforma tributaria que modifica el sistema de tributación de la renta e introduce diversos ajustes en el sistema tributario*.
- Ministerio de Vivienda, C. y T. (2017). *DS N°1784 de 2017 - Colombia*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=84140>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2013). *Decreto 40: Aprueba reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental*.
- Ministry for the Environment. (2004). *Resource Management (National Environmental Standards for Air Quality) Regulations 2004 (SR 2004/309) (Number 1)*. <https://www.legislation.govt.nz/regulation/public/2004/0309/latest/whole.html#DLM286835>
- Ministry for the Environment. (2010). *Climate Change Response (Disposal Facilities) Regulations*. <https://environment.govt.nz/what-government-is-doing/cabinet-papers-and-regulatory-impact-statements/climate-change-response-disposal-facilities-regulations-2010/>
- MINSAL. (2008). *Decreto 189 Aprueba Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios*.
- MINSAL. (2024). *Proyecto Definitivo Plan Sectorial de Mitigación (PSM) del Ministerio de Salud*.
- MMA. (2016). *Ley 20.920 - Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje*. <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1090894>
- MMA. (2020). *ESTRATEGIA NACIONAL DE RESIDUOS ORGÁNICOS CHILE 2040*. <https://economiacircular.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/03/Estrategia-Nacional-de-Residuos-Organicos-Chile-2040.pdf>
- MMA. (2021). *Decreto 12 - Establece Metas de Recolección y Valorización y Otras Obligaciones Asociadas de Envases Y Embalajes*. (marzo), 2–9. <http://bcn.cl/2o0an>
- MMA. (2022). *Ley N°21.455 - Ley Marco de Cambio Climático*. 1–37. <http://bcn.cl/32l0z>
- MMA. (2023). *Decreto 4*.
- MMA. (2024). *Documento del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero Serie 1990-2022*.
- MMA. (2025). *Hoja de Ruta de Instrumentos de Precio y Mercado de Carbono*.
- Molina, J. (2020). Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos abre discusión sobre cobro de derechos de aseo e incrementar costo de disponer en relleno sanitario. *País Circular*. <https://www.paiscircular.cl/ciudad/estrategia-nacional-de-residuos-organicos-abre-discusion-sobre-cobro-de-derechos-de-aseo-e-incrementar-costode-disponer-en-relleno-sanitario/>
- NSW Government. (2010). *Handbook for the design, construction, operation, monitoring and maintenance of a passive landfill gas drainage and biofiltration system*. www.environment.nsw.gov.au
- Office of Parliamentary Counsellor. (2015). *National Greenhouse and Energy Reporting*. <https://www.legislation.gov.au/F2015L01637/latest/text>
- Prado, Ó. J., Gabriel, D., & Lafuente, J. (2009). Economical assessment of the design, construction and operation of open-bed biofilters for waste gas treatment. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2515–2523. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.022>

- PUCV. (2024). *ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARIOS Y ASIMILABLES GENERADOS A NIVEL MUNICIPAL EN CHILE*.
- ReFED. (n.d.). *Centralized Composting*. Retrieved April 26, 2026, from https://insights-engine.refed.org/solution-database/centralized-composting?utm_source
- Reinhart Debra, & Townsend Timothy. (2002). *The bioreactor landfill: its status and future*.
- Scheutz, C., Samuelsson, J., Fredenslund, A. M., & Kjeldsen, P. (2011). Quantification of multiple methane emission sources at landfills using a double tracer technique. *Waste Management*, 31(5), 1009–1017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.015>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003). *NOM-083-SEMARNAT*. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nom-083-semarnat-2003/>
- SEPA. (2003). *The Landfill (Scotland) Regulations 2003*. <https://www.legislation.gov.uk/ssi/2003/235/contents>
- SUBDERE. (2018). *Diagnóstico de la situación por comuna y por región en materia de RSD y asimilables*.
- SUBDERE. (2024). *Diagnóstico y Catastro Nacional de Residuos Sólidos Domiciliarios, Síntesis Nacional*.
- Swedish Environmental Protection Agency. (2004). *Landfilling of waste: Handbook 2004:2 with guidelines to the Ordinance (2001:512) on the Landfill of Waste*. https://www.ccacoalition.org/sites/default/files/resources//2%20Landfilling%20of%20Waste_Sweden.pdf
- Townsend Timothy. (1998). *Landfill Bioreactor Design & Operation*.
- Tribe, M. A., & Alpine, R. L. W. (1986). SCALE ECONOMIES AND THE “0.6 RULE.” In *Engineering Costs and Production Economics* (Vol. 10).
- UK Government. (2002). *The Landfill (England and Wales) Regulations 2002*. https://www.legislation.gov.uk/uksi/2002/1559/pdfs/uksi_20021559_en.pdf
- World Bank. (2023). *Handbook_Preparation_LandfillGas_to_EnergyProjects_LAC_Resize*.
- Zhang, G., Liu, K., Lv, L., Gao, W., Li, W., Ren, Z., Yan, W., Wang, P., Liu, X., & Sun, L. (2023). Enhanced landfill process based on leachate recirculation and micro-aeration: A comprehensive technical, environmental, and economic assessment. *Science of the Total Environment*, 857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159535>
- Zhang, S., Lv, S., Zhang, M., Liu, F., & Cheng, L. (2025). Mechanism of nitrous oxide emission reduction in constructed wetlands based on plant harvesting management. *Bioresource Technology*, 421. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.132128>
- Zhao Haokai. (2019). *Methane Emissions from Landfills*.

12. Anexos

12.1 Caracterización de regulaciones por países

La Tabla 12-1 y Tabla 12-2 presentan la caracterización de las regulaciones por países en dos partes, la caracterización completa se presenta en el anexo digital “NEMetano-Characterizacion_normas_internacionales.xlsx”. Específicamente la Tabla 12-1 muestra información general del instrumento como su resumen, las fuentes, contaminantes y límites de regulación, mientras que la Tabla 12-2 muestra la información de la monitoreo, reporte, verificación y fiscalización requeridas por las regulaciones.

12.1.1 Caracterización de regulación – Resumen, fuentes y contaminantes regulados

Tabla 12-1 Caracterización de regulaciones por países – Resumen, fuentes y contaminantes regulados

País	Año vig.	Nombre	Descripción resumen	Institución responsable	Fuentes reguladas	Contam. regul.	Unidad límite	Valor límite	Detalle límite	Otros KPIs ambientales
AU – NSW	2016	Environmental Guidelines: Solid Waste Landfills	Es una guía que ofrece orientación para la gestión ambiental de los vertederos en NSW, abordando distintas metodologías y estándares, para minimizar los impactos de un vertedero, en sus diversas formas y flujos de interacción con el medio ambiente.	EPA	Rellenos Sanitarios Municipales	CH ₄	ppmv	500	Ya establecido un sistema de extracción o colección de gases, se puede ocupar este límite para detectar emisiones a través del material de cobertura o emisiones fugitivas. La medición se debe hacer 5 cm sobre la superficie del vertedero. Las mediciones tienen que estar a 25 m de distancia entre ellas.	- Monitoreo de calidad de aguas (superficial o subterránea) - Almacenamiento de lixiviados y su monitoreo. - Olores, polvo, ruido y control escombros. - Además entrega límite de normativa de otros gases y límites de contaminantes de aguas.
							% v/v	1		
AU	2015	Nacional Greenhouse and Energy Reporting (Safeguard Mechanism)	Es una política federal que establece normas y métodos de gestión de emisiones para grandes generadores de GEI (100.000 ton CO ₂ eq). Así las actividades a las que aplique la norma se le estiman sus emisiones (baseline) y anualmente esta se debe reducir en un porcentaje que la norma también detalla en calcular. También dar créditos a los que estén muy por debajo de su línea base.	-Department of Climate Change, Energy, The Environmental and Water - Clean Energy Regulator	Grandes instalaciones emisoras de GEI, incluye minería, producción de aceites y gases, manufactura, transporte, manejo de residuos	GEI de protocolo de Kyoto (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs, PFCs, SF ₆ , NF ₃)	% del total de emisión en ton CO ₂ eq	4,9	Lo anterior no es precisamente un límite de emisión, sino que es el porcentaje que debe disminuir anualmente la línea base o límite de emisión aplicada para cada actividad.	Variables de producción de algunas industrias para medir emisiones. - Tasa de decaimiento en las emisiones totales para cumplir con normativa. - Indicadores de exposición y costo.
CA – QB	2005 2010	Regulation respecting the	Establece estándares para la recolección y remoción del biogás	Minister of Sustainable	Rellenos Sanitarios; Sistemas de	CH ₄ ; N ₂ ; O ₂ ; COV	% v/v	1,25%	Límite de Migración /Acumulación de CH ₄	Eficiencia de Destrucción de Compuestos Orgánicos:

		landfilling and incineration of residual materials (Cap. Q-2, R. 19)	producido en rellenos sanitarios diseñados (engineered landfills) para asegurar el cumplimiento de valores límite prescritos. Obliga a instalar sistemas, especifica estándares de destrucción (si no es valorizado) y fija límites de concentración de metano tanto dentro del sistema de recolección como en su migración al ambiente. Se complementa con reglas de reporte obligatorio y de cálculo de compensaciones por metano.	Development, Environment and Parks/Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques	recolección de biogás y dispositivos de bombeo; Equipos de destrucción térmica; Áreas de disposición final	CH ₄	ppmv	500	(Suelo/Edificaciones): No debe exceder el 25% de su límite explosivo inferior, o 1,25% en volumen. - Límite de Concentración Superficial de CH ₄ : Debe ser menor a 500 ppm en volumen (durante operación del dispositivo de bombeo). - El requisito de contar con dispositivo de bombeo y destrucción térmica aplica a rellenos con capacidad máxima mayor a 1.500.000 m ³ O que reciban 50.000 toneladas o más de residuos por año.	Debe destruir al menos 98% de compuestos orgánicos distintos del metano, o reducir la concentración a menos de 20 ppm equivalentes de hexano en volumen. - Nitrógeno (integridad del sistema): Menor a 20% en volumen (en componentes cerrados). - Oxígeno (integridad del sistema): Menor a 5% en volumen (en componentes cerrados).
CA – QB	2013	Regulation respecting a cap-and-trade system for greenhouse gas emission allowances (Cap. Q-2, R. 46.1)	Establece las reglas para la operación del sistema de comercio de emisiones (Cap-and-Trade System, CTS) con el fin de contribuir a las metas de reducción de GEI y mitigar el costo de reducir o limitar emisiones. Determina qué emisores deben cubrir sus emisiones, los términos de registro, las unidades válidas de emisión (unidades, créditos de compensación, créditos por reducción temprana) y las condiciones para su emisión, uso y comercio.	Minister of Sustainable Development, the Environment and the Fight Against Climate Change	Emisores obligatorios (umbral 25.000 tCO ₂ eq): Personas/municipalidades que operen una empresa en un sector listado en el anexo A del reglamento y que reporten emisiones anuales de GEI ≥ 25.000 tCO ₂ eq (excluyendo las emisiones del artículo 6.6 del Reglamento de Reporte). - Emisores voluntarios (umbral 10.000 tCO ₂ eq): Aquellos en sectores del anexo A del reglamento que reporten emisiones ≥ 10.000 tCO ₂ eq y que opten por registrarse.	CO ₂ ; CH ₄ ; N ₂ O; HFCs; PFCs; SF ₆	tCO ₂ -eq	25000	- Período de cumplimiento: El primero fue 2013-2014, y los posteriores tienen 3 años calendario a partir del 1 de enero de 2015. - Límite de uso de compensaciones: La cantidad total de créditos de compensación que un emisor puede usar no puede exceder el 8% de las emisiones de GEI a cubrir en el período. - Cobertura de emisiones: Un emisor sigue sujeto a cobertura hasta el 31 de diciembre posterior al tercer informe consecutivo en que sus emisiones estén bajo el umbral.	- Metas de intensidad: Los métodos de asignación dependen de la intensidad promedio de emisiones de GEI (tCO ₂ -eq por unidad de referencia) atribuidas a combustión, procesos fijos y otras emisiones. - Unidades de referencia: Unidades estándar de medición basadas en producción o materia prima usada (ej. MWh, ton de clinker). - Contenido del informe de emisiones: Debe incluir combustibles/materias primas utilizadas y volúmenes de producción para calcular contaminantes.
CO	2017	Decreto 1784 de 2017	Modifica y adiciona el Decreto 1077 de 2015 en lo relativo a las actividades complementarias de tratamiento y disposición final de residuos sólidos en el servicio público de aseo. Su objeto es	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio; Comisión de Regulación de	Relleno Sanitario	CH ₄ ; H ₂ S	No se especifica	No especifica un valor límite para la emisión de metano	-	Límite de explosividad. Monitoreo de calidad de lixiviados, DBO, DQO, sólidos suspendidos. Monitoreo de la vida útil. Monitoreo de

			reglamentar las condiciones bajo las cuales debe desarrollarse la actividad de disposición final de residuos sólidos, promoviendo la planificación, construcción y operación de sistemas de disposición final y tratamientos alternativos.	Agua Potable y Saneamiento Básico - CRA; Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.						compactación. Control de olores y vectores. Registro de parámetros meteorológicos.
EEUU – CA	2010	Landfill methane regulation (LMR)	Normativa sobre metano en vertederos (LMR) de California exige que los vertederos municipales de residuos sólidos reduzcan las emisiones de metano y otros contaminantes atmosféricos mediante la supervisión de emisiones y la captura del metano fugitivo, indica requisitos de cálculo, monitoreo, control y reporte.	California Air Resources Board (CARB)	Vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU) que hayan recibido residuos desde 1 de enero de 1977, existen excepciones.	CH ₄	ppmv ppmv (promedio)	► 500 o ► 25	► Norma de fugas en superficie, en que ningún punto en la superficie del vertedero debe emitir más a 500 ppmv, mediante monitoreo instantáneo de emisiones superficiales. ► Doble estándar de control, con límite medio espacial para detectar acumulaciones difusas de metano, en cuadrícula de 7,62 m (25 pies) si la media supera los 25 ppmv realizar ajustes, mediante monitoreo integrado de emisiones superficiales.	Entrevista: • Agua subterránea: monitoreo de pozos por parte de la State Water Resources Control Board para evitar migración de CH ₄ y COV a las aguas. • Aire: control de emisiones de COV/NMOC como co-beneficio de la captura de metano; reducción de olores como efecto colateral. • Suelo: preocupación reconocida, aunque sin parámetros específicos reportados en la normativa.
EEUU – CA	2017	Regulación SB 1383 (Short-Lived Climate Pollutants: Organic Waste Methane Emission Reduction)	Presenta diversas opciones para acelerar la reducción de emisiones de CCVC (carbono negro, metano y HFC) en California, incluyendo regulaciones, incentivos y otras actividades de apoyo al mercado.	California Air Resources Board (CARB)	Vertederos de residuos	► CH ₄ ► CN ► HFC	MMTCO ₂ e	► 71 ► 19 ► 24	► CH ₄ ; 40% reducción al 2030 vs 2013 (118 a 71 MMTCO ₂ e). ► CN; 50% reducción al 2030 vs 2013 (38 a 19 MMTCO ₂ e). ► HFC; 40% reducción al 2030 vs 2013 (40 a 24 MMTCO ₂ e).	• Reducir el nivel de eliminación de desechos orgánicos en 50% para 2020 y en 75% para 2025, respecto al nivel de 2014. • Recuperación del 20% de alimentos comestibles descartados para 2025.
EEUU – CO	2020	5 CCR 1001-26 – Regulation Number 6, Part A: Standards of Performance for New Stationary Sources	Regulación adoptada por la Colorado Air Quality Control Commission que establece estándares de desempeño para nuevas fuentes estacionarias, incluyendo los rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales (MSW Landfills). La norma incorpora por referencia los estándares federales de desempeño aplicables a rellenos sanitarios, que exigen control de	Comisión de Control de Calidad del Aire	Rellenos sanitarios de residuo	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs, PFCs, SF ₆ y NF ₃	NA	No establece valores, sino criterios técnicos y constructivos	Metas de reducción de GEI a nivel estatal: 26% de reducción para 2025; 50% de reducción para 2030; y 90% de reducción para 2050, en comparación con los niveles de 2005. Planes de calor limpio para distribuidoras de gas con más de noventa mil clientes: Reducir emisiones al menos un 4% en 2025 (de los cuales	Potencial de Calentamiento Global (GWP): una medida métrica utilizada para comparar las emisiones de varios GEI en función de su potencial de calentamiento global. -Reducciones de CO ₂ y GEI en porcentaje con respecto a las emisiones de referencia de 2005 (para el seguimiento de planes de

			emisiones de gas de vertedero, monitoreo, mantención de registros y reportes.						no más del 1% puede provenir de metano recuperado) y un 22% en 2030 (de los cuales no más del 5% puede provenir de metano recuperado), en relación con una línea base de 2015.	energía limpia). -Prohibiciones de HFCs: La Tabla 1 enumera sustancias y mezclas de HFC prohibidas para usos finales específicos y las fechas de prohibición. -Créditos de energía renovable (cantidad adquirida, transferida, vendida o retirada). Estimación de beneficios o co-beneficios para el medio ambiente y la comunidad (de proyectos de reducción de GEI). Reducciones de GEI proyectadas de aproximadamente 560 mil toneladas métricas de CO ₂ e en 2025 y 1.15 millones de toneladas métricas de CO ₂ e en 2030 (anticipadas por la eliminación gradual de HFC).
EEUU – EPA	1993	Criteria for municipal solid waste landfills	Se establecen criterios nacionales mínimos, según la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA), para todos los vertederos de residuos sólidos municipales (MSWLF), y según la Ley de Agua Limpia para los vertederos de residuos sólidos municipales utilizados para la eliminación de lodos. Incluye criterios de ubicación, operación, diseño, monitoreo, cierre, entre otros.	EPA (Environmental Protection Authority) NSW	Rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales (MSWLF)	CH ₄	%	25	El CH ₄ no debe exceder el 25% del límite explosivo inferior en estructuras de la instalación (excluyendo componentes del sistema de control o recuperación de gas). La concentración de CH ₄ no excede el límite explosivo inferior para metano en el límite de propiedad de la instalación	Los MSWLF no deben provocar una descarga de contaminantes en las aguas. Control de lixiviados, mediante un sistema de recolección.
EEUU – MD	2024	COMAR 26.11.42 – Control of Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfills (MSW Landfills)	Es un conjunto de enmiendas y nuevos requisitos reglamentarios adoptados en Maryland para derogar el COMAR 26.11.19.20 y establecer nuevos estándares con el fin de reducir las emisiones de gas metano de los vertederos de MSW en el estado. La acción incorpora disposiciones de las reglas federales 40 CFR 60,	Departamento de Medio Ambiente de Maryland	Vertederos de Residuos Sólidos Municipales (MSW Landfills). Se aplica a vertederos activos y cerrados que hayan aceptado residuos después del 8 de noviembre de 1987, y que cumplan con	Metano; Compuestos orgánicos no metánicos	ppmv	500 25	• Concentración de metano superficial (instantánea): 500 ppmv (excluyendo lecturas momentáneas no repetibles). • Concentración de metano superficial (integrada): Límite promedio de 25 ppmv. • Tasa de generación de metano (GCCS requerido): Mayor o igual a 8,548	- Los estándares y requisitos para abordar las emisiones de metano también controlarán las emisiones de Compuestos orgánicos no metánicos. - Monitoreo de Parámetros Adicionales en Puntos de Control y Gases Trazas

			(Estándares Nacionales de Emisión para Contaminantes Atmosféricos Peligrosos). Está destinado a ser equivalente o más estricto que los requisitos federales vigentes. Los requisitos clave incluyen el monitoreo de emisiones superficiales, la detección y reparación de fugas de gas, la presentación de informes y el mantenimiento de registros, y la instalación y operación de sistemas de control de emisiones (GCCS)		criterios de capacidad, edad y tasa de generación de metano.				toneladas por año. • Fuga de componentes (Component Leak): 500 ppmv o mayor requiere etiquetado y reparación. • Temperatura de boca de pozo (interior): Menos de 62.8°C (145°F).	
EEUU – OR	2021	Division 239 – LANDFILL GAS EMISSIONS	Esta división de las Reglas Administrativas del Estado de Oregon aplica a todos los vertederos en el estado que hayan recibido residuos sólidos después del 8 de noviembre de 1987. Su objetivo es la regulación y el control de las emisiones de gas de vertedero, principalmente metano, mediante la exigencia de la instalación y operación de un Sistema de Recolección y Control de Gas (GCCS), la realización de Monitoreo de Emisiones Superficiales (SEM) y el establecimiento de estándares de operación, monitoreo y reporte. La regulación está destinada a la aplicación federal y estatal.	Departamento de Calidad Ambiental de Oregon	Vertederos de Residuos Sólidos (Landfills), excluyendo aquellos ubicados en tierras tribales o federales que no están sujetas a la regulación del DEQ. Esto incluye tanto vertederos activos como cerrados, siempre que cumplan con los criterios de capacidad y edad.	Metano; Compuestos orgánicos no metánicos; monóxido de carbono	ppmv; ton/año;	500 25	• Tasa de Generación de Metano (MGR) para requerir GCCS: Mayor o igual a 664 toneladas métricas por año (732 tons/yr) o mayor o igual a 7,755 toneladas métricas por año (8,548 tons/yr), dependiendo de la edad y el estatus del vertedero. • Concentración de metano superficial (instantánea): 500 ppmv (excluyendo lecturas momentáneas no repetibles). • Concentración de metano superficial (integrada): Límite promedio de 25 ppmv. Fuga de componentes: Concentración de metano de 500 ppm o más • Temperatura de boca de pozo (interior): Menos de 62.8°C (145°F).	
EEUU – DC	2023	Chapter 70A.540 RCW LANDFILLS— METHANE EMISSIONS	Este capítulo establece requisitos para controlar y monitorear las emisiones de metano de los rellenos sanitarios municipales de residuos sólidos (municipal solid waste landfills). Regula la presentación de informes sobre residuos en el lugar (waste in place report) y el cálculo de la capacidad de entrada de calor de gas del relleno sanitario (landfill gas heat	Department of Ecology	Rellenos sanitarios municipales de residuos sólidos (activos y cerrados)	Metano	ppm	500 25	• Límites de Concentración de CH₄ en Superficie. Monitoreo instantáneo: 500 ppm por volumen (excluyendo lecturas momentáneas no repetibles). • Monitoreo integrado: Promedio de 25 ppm por volumen. Límites de Sistema/Dispositivo:	Umbral de Residuos en el Lugar (Waste in Place) Activo: Menos de 450.000 toneladas (requiere informe anual de residuos). Activo: Mayor o igual a 450.000 toneladas (requiere cálculo de capacidad de entrada de calor de gas). Cerrado: Mayor o igual a 750.000 toneladas (requiere

			input capacity). También detalla los requisitos para la instalación y operación de sistemas de recolección y control de gas, establece límites de concentración de metano en la superficie, y define los requisitos de monitoreo, mantenimiento de registros, presentación de informes y métodos de prueba.						• Fugas del sistema de recolección de gas: No debe exceder 500 ppm por volumen (medido como CH₄) en cualquier componente bajo presión positiva. • Eficiencia de destrucción de CH₄ (Flare): Al menos 99% en peso. • Eficiencia de destrucción de CH₄ (Dispositivo de recuperación de energía): Al menos 97% en peso • Fuga del sistema de tratamiento de gas: Tasa de fuga de CH₄ de 3% o menos por peso.	cálculo de capacidad de entrada de calor de gas). Capacidad de Entrada de Calor de Gas (Landfill Gas Heat Input Capacity). Umbral de instalación/cumplimiento del sistema de control: Mayor o igual a 3.000.000 BTU por hora recuperada.
EEUU – DC	2024	Landfill Methane Emissions	Normativa de emisión que regula el gas metano emitido por los rellenos sanitarios del estado de Washington. también regula la presencia de un sistema de colección y control de gases, para aquellos rellenos sanitarios que cumplan con ciertas características (pesaje recibido y capacidad de entrada de calor). Esta norma también describe las características de los rellenos afectos al cumplimiento.	- Departament of Ecology. - EPA	Rellenos Sanitarios Municipales	CH ₄	ppmv ppmv	500 25 (promedio por grilla)	- Ningún punto de la superficie del relleno sanitario debe tener mediciones superiores a 500 ppmv determinado por monitoreo instantáneo de superficie, o - No se supere un promedio de 25 ppmv medido por monitoreo integrado de emisión en superficie.	
ME	2003	Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003	Establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)	Sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos	CH ₄ Otros contaminantes regulados indirectamente o monitoreados incluyen CO ₂ (en biogás), pH, DBO ₅ , DQO y metales pesados (en lixiviados).	No especifica a unidad de límite de emisión para metano	No especifica un valor límite para la emisión de metano	Su enfoque principal es el control y el manejo de Biogás. Se debe garantizar la extracción, captación, conducción y control de biogás generado, si no existe sistema para su aprovechamiento se debe quemar.	► Lixiviados. ► Acuíferos. ► Operación y postclausura.

NZ	2011	Climate Change Response (Disposal facilities) regulation 2010	Esta normativa busca incluir a las instalaciones de disposición final a reportar de forma estandarizada sus emisiones y poder incluirlas en el esquema de mercado de emisiones	Ministry for the Environment	Instalación de Disposición Final	GEI (CH ₄ , CO ₂)	Sin información	No especifica un valor límite de emisión para el metano	Se presentan diversas metodologías para para estimar emisiones y la misma normativa recomienda hacer uso de Balance de masas para estimar. También presenta metodologías para disminuir emisiones y poder acreditar NZ ETS (relacionado al mercado de emisiones)	- Cantidad de residuos -Eficiencia y recolección de gases - Tasa de oxidación
NZ	2004	Resource Management (National Environmental Standards for Air Quality) Regulations 2004	Esta normativa establece estándares ambientales nacionales sobre la calidad del aire, considerando prohibiciones, restricciones sobre diversas actividades por su fuerte influencia de contaminantes en el aire. Esta norma se divide en grandes 2 capítulos: 1) Prohibiciones y Restricciones de descargas o emisiones. 2) Estándares de calidad del aire del medio ambiente.	Ministry for the Environment	-Vertederos -Quema de neumáticos; asfalto; alambre recubierto; aceite -Operaciones de incineración -Operaciones de incineración de residuos peligrosos -Quemadores de leña -Chimeneas abiertas	CH ₄ Otros contaminantes producidos por las actividades que aplica la regulación.	ppmv	5000	Este límite aplica para vertederos que tienen una capacidad total no menor a 1 millón de toneladas o que no contenga menos de 200.000 toneladas actualmente.	Norma otros contaminantes para calidad del aire Contaminante Límite CO 10 mg/m ³ (8h) NO ₂ 200 ug/m ³ (1h) O ₃ 150 ug/m ³ (1h) MP ₁₀ 50 ug/m ³ (24h) SO ₂ 350 ug/m ³ (1h)
UK – SC	2003	Landfill regulations (Escocia)	Reglamento que implementa en Escocia la Directiva Europea sobre Vertederos para implementar la Directiva 99/31/CE, establece requisitos para la autorización, operación, monitoreo y cierre de vertederos, con el fin de prevenir o reducir los efectos negativos de la eliminación de residuos en el medio ambiente y la salud humana.	Agencia de Protección Ambiental Escocesa (Scottish Environment Protection Agency, SEPA)	Vertederos de residuos, existen excepciones	► Gases de vertedero (CH ₄ , CO ₂ , otros)	Sin información	No establece valores, sino criterios técnicos y constructivos	El control de gases debe realizarse en cada sección del vertedero, se deben recoger y analizar muestras representativas. Además, la eficiencia del sistema de extracción de gases debe comprobarse periódicamente. Además, se establecen criterios de permeabilidad (k) y espesor de la barra geológica.	► Lixiviados. ► Emisiones al agua y al suelo asociadas a la gestión de vertederos.
UK – ENG/ GL	2002	Landfill regulations (Inglaterra y Gales)	Establece un régimen de control de la contaminación para los vertederos con el propósito de implementar la Directiva del Consejo 99/31/EC sobre residuos. Además, regula la clasificación de vertederos, los criterios de aceptación de residuos, requisitos de ubicación, operación, control, monitoreo, cierre y cuidados	Secretary of State (UK Government), fiscalizado por Environment Agency (EA) en Inglaterra	Vertederos de residuos, existen excepciones	► Gases de vertedero (CH ₄ , CO ₂ , H ₂ , otros)	NA	No establece valores, sino criterios técnicos y constructivos	El control de gases debe realizarse en cada sección del vertedero, se deben recoger y analizar muestras representativas. Además, la eficiencia del sistema de extracción de gases debe comprobarse periódicamente. Entrega características	► Lixiviados y aguas superficiales. ► Emisiones secundarias (olores, polvo, ruidos, aerosoles, incendios, plagas). ► Estabilidad estructural del vertedero.

			posteriores. Sustituye y modifica disposiciones de la legislación previa de residuos de 1994 y 2000.						requeridas para la barrera geológica, permeabilidad y espesor.	
UK – IRN	2003 2004	Landfill regulations (Irlanda del Norte)	Regulación establece un control de la contaminación en rellenos sanitarios, en el marco de la Directiva 99/31/EC. La regulación de 2003 establece criterios y procedimientos detallados para la aceptación de residuos en cada relleno sanitario, mientras que la del 2004 modifica el reglamento.	Department of the Environment, mientras que el Inspector Jefe es la autoridad de control	Vertederos de residuos, existen excepciones	► Gases de vertedero	mg/kg %	Varios	Entrega valores límites aplicables a residuos admisibles en vertederos para residuos inertes, tanto para lixiviados como para parámetros orgánicos	Entrega valores límites aplicables a residuos admisibles en vertederos para residuos inertes, tanto para lixiviados como para parámetros orgánicos
SE	2004	Manual 2004:2 con directrices sobre la Ordenanza (2001:512) relativa al vertido de residuos	Manual que busca orientar a las autoridades responsables de la concesión de licencias, la inspección, operadores, sobre la aplicación de la Ordenanza Sueca sobre Vertederos, cuyo objetivo es prevenir y reducir los efectos negativos que el vertido de residuos en la salud y medio ambiente.	Agencia de Protección Ambiental Sueca (Swedish Environmental Protection Agency, Swedish EPA)	Vertederos de residuos	► Gases de vertedero (CH ₄)	Sin información	No especifica un valor límite de emisión para el metano	Se debe asegurar que se recoja el gas de vertedero, planta de biogás con alta tasa de recolección de metano producido	► Lixiviados. ► Emisiones al agua y al suelo asociadas a la gestión de vertederos.
UE	1999	Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos	El objetivo general es garantizar una reducción progresiva del vertido de residuos, en particular de aquellos aptos para el reciclado u otra valorización. Además, establece requisitos operacionales y técnicos para prevenir o reducir los efectos negativos en el medio ambiente y en la salud humana.	Consejo de la Unión Europea	Vertederos de residuos	► Gases de vertedero (CH ₄ , CO ₂ , otros)	NA	No establece valores, sino criterios técnicos y constructivos	Entrega características requeridas para la barrera geológica, permeabilidad y espesor. La eficiencia del sistema de extracción de gases debe comprobarse periódicamente.	Reducción de residuos municipales biodegradables, alcanzando un 75%, luego 50% y 35% a 5, 8 y 15 años desde la fecha de inicio. Control de Lixiviados y emisiones al agua.

Fuente: Elaboración propia

12.1.2 Caracterización de regulación – Monitoreo, Reporte, Verificación y Fiscalización

Tabla 12-2 Caracterización de regulaciones por país – Monitoreo, Reporte, Verificación y Fiscalización

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
AU - NWS	Environmental Guidelines: Solid Waste	Monitoreo de emisiones superficiales: Se debe medir el CH ₄ en la atmósfera 5cm por encima de la superficie del relleno	Emisiones superficiales: Mensuales, o según lo modifique la EPA con base en la evaluación	Se debe notificar a la EPA prontamente si se detecta CH ₄ con concentraciones superiores al 1% v/v en	Si se exceden los umbrales de CH ₄ sub-superficial o en estructuras cerradas, se debe presentar un plan	La EPA puede obtener revisiones y auditorías independientes de la documentación de diseño y construcción (incluida la	No precisa sobre métodos de fiscalización, ya que es una guía, pero si menciona la importancia del monitoreo	NA

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
	Landfills	en áreas con cobertura intermedia o final, el monitoreo debe realizarse en un patrón de cuadrícula con espaciamiento de 25m. Monitoreo sub-superficial: Se debe establecer un programa de monitoreo de gas sub-superficial utilizado una red de pozos de monitoreo instalados alrededor del perímetro de las celdas de residuos para detectar la migración de gas fuera del sitio. Monitoreo de acumulación en estructuras: Monitoreo de CH₄ en todos los edificios y otras estructuras cerradas dentro de los 250m de los residuos depositados o almacenamiento de lixiviados. Monitoreo de emisiones de combustión: Monitoreo regular de la T° y el caudal volumétrico de las antorchas, y análisis de gases de escape de motores de combustión que utilizan gas de vertedero para la recuperación de energía.	de riesgos. Monitoreo sub-superficial: Trimestral, o la frecuencia justificada por una evaluación de riesgo específica del sitio. Acumulación en estructuras cerradas: Mensual, o frecuencias justificadas por una evaluación de riesgo específica del sitio. Monitoreo de biorreactores/sistemas microbiológicos: Trimestral para composición y flujo de gas, oxidación de CH₄, contenido de humedad y profundidad de agua de drenaje.	los pozos perimetrales y dentro de las 24hr si se detecta en estructuras cerradas. Se debe notificar a la EPA inmediatamente al tomar conocimiento de incidentes de contaminación de causen o amenacen daño material al medio ambiente, conforme a la Protection of the Environment Operations Act 1997.	para investigación y/o remediación a la EPA dentro de los 14 días siguientes a la notificación.	infraestructura de manejo y monitoreo de gas) para asegurar un alto y consistente estándar. Se debe contratar a un ingeniero de Garantía de Calidad de la Construcción (CQA), calificado y experimentado, independiente del contratista de construcción, para verificar y reportar todos los asuntos de CQA relacionados con las obras importantes del relleno, lo cual incluye la infraestructura de manejo y monitoreo de gas.		
AU	Nacional Greenhouse and Energy Reporting (Safeguard Mechanism)	Se debe realizar el monitoreo de la información necesaria para calcular sus emisiones cubiertas. En los rellenos sanitarios, el cálculo de la línea de base de emisiones requiere determinar el	No se especifica una frecuencia directa, sin embargo, toda la información de emisiones y producción es recopilada y reportada para un año financiero.	Los reportes son de forma anual.	El reporte debe contener los contaminantes que emite la actividad en cuestión en tCO₂eq, información de la producción de la actividad, variables de producción, y otros.	La verificación de un 3° es obligatoria para las instalaciones que superan el umbral de 1 millón de toneladas de CO₂e de emisiones cubiertas durante un año financiero. Además, los informes de auditoría deben incluir una	Reportes: Son informes que recopila información de las características y tipos de gases que emite la actividad. - Auditoría: Esta sucede si se sobrepasa el límite de 100.000 tCO₂eq o el límite que presente dado el	La fiscalización se basa en los reportes que envían las empresas dueñas de las actividades. - Los reportes deben ser de información recapitula en el año. - Las auditorías solo aplican a excedencia de la

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
		número de tCO ₂ e de las emisiones cubiertas de GEI que se emitirían si la captura y la oxidación no ocurrieran en la instalación, lo cual implica monitorear o calcular la cantidad de CH ₄ emitido. Además, las emisiones atribuibles a los residuos aceptados por el relleno sanitario antes de 1/7/2016 se consideran emisiones heredadas y no son emisiones cubiertas, lo que requiere un seguimiento de las fechas de aceptación de los residuos.				conclusión de seguridad razonable o una conclusión de seguridad razonable calificada sobre la corrección de las emisiones cubiertas y las variables de producción, estas auditorías las debe realizar un auditor registrado.	decaimiento aplicado.	norma.
CA - QB	Regulation respecting the landfilling and incineration of residual materials (Capítulo Q-2, r. 19)	Se debe monitorear la concentración de CH ₄ en el suelo y dentro de los edificios e instalaciones. -Durante el periodo de operación de un sistema de recolección con dispositivo de bombeo, debe monitorearse continuamente el flujo de biogás, la concentración de CH ₄ generada por los materiales residuales, y la concentración de N ₂ u O ₂ y la T° en cada drenaje y pozo húmedo. -También se monitorea la concentración de CH ₄ en la superficie de las áreas de disposición y la eficiencia de destrucción de los compuestos orgánicos distintos al CH ₄ (si se utiliza equipo de destrucción térmica).	Monitoreo de CH ₄ en el suelo y dentro de los edificios/instalaciones: Al menos 4 veces al año en intervalos distribuidos uniformemente. -Flujo de biogás y T° de destrucción (si aplica): Continuamente medido y registrado. -Concentración de CH ₄ generada, N ₂ /O ₂ y T° (drenajes/pozos húmedos): Al menos cada 3 meses. -Concentración de CH ₄ en la superficie: Si relleno recibe ≤100.000 ton/año al menos una vez al año y si el relleno recibe >100.000 al menos 3 veces al año (primavera, verano y otoño), la frecuencia	Flujo de biogás y temperatura de destrucción: Medidos y registrados continuamente. - Eficiencia de destrucción: Verificada al menos una vez al año. - Metano (Suelo/Edificaciones): Medido al menos 4 veces al año, distribuidas uniformemente. - Metano/Nitrógeno/Oxígeno (componentes del sistema): Medidos al menos cada 3 meses. - Metano (Superficie, Grandes Rellenos): Al menos 3 veces al año (primavera, verano, otoño).	Debe comunicarse electrónicamente mediante formulario en línea. Debe detallar cantidad de contaminantes, fuentes de emisión, volumen de producción y métodos de cálculo (incluyendo factores y referencias). Los reportes de GEI deben calcular emisiones en toneladas métricas de CO ₂ equivalente (GWP CH ₄ = 25). Los reportes deben basarse en los mejores datos disponibles. En rellenos, los resultados de medición y análisis deben aparecer en el informe anual. Los reportes de GEI deben ser verificados si el emisor está sujeto al sistema de	Todos los materiales y equipos utilizados para el sistema de biogás deben ser verificados por expertos independientes antes y durante la instalación, mediante pruebas de laboratorios o in situ. Las obras de desarrollo deben ser realizadas bajo la supervisión de expertos independientes. El operador debe enviar al Ministro los informes de los expertos independientes confirmando el cumplimiento de la instalación. Las muestras tomadas para medición de CH ₄ deben ser enviadas para análisis a laboratorios acreditados por el	Medición/Monitoreo: Medición continua de flujo y temperatura de destrucción. - Medición periódica de concentración de metano en suelo, edificaciones, drenajes y pozos húmedos. - Pruebas: Verificación anual de eficiencia de destrucción. - Evaluación de expertos: Presentación de informe de estado por expertos independientes para certificar cumplimiento en fase post-cierre (ej. concentración de metano bajo 1,25%).	La fiscalización se realiza en base al reporte del ente operador del relleno sanitario, cuyos resultados son entregados digitalmente. - Los resultados entregados por laboratorios acreditados respecto a las muestras tomadas por el operador, deben ser enviadas a no más tardar 30 días corridos desde que éstos son facilitados al ente operador del relleno sanitario.

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
			puede reducirse a 1 vez al año si después de un periodo mínimo de 2 años se demuestra cumplimiento.		Cap-and-Trade.	Ministro.		
CA - QB	Regulation respecting a cap-and-trade system for greenhouse gas emission allowances (Capítulo Q-2, r. 46.1)	Se debe establecer un plan de vigilancia y es responsable de recolectar la información necesaria para el seguimiento del proyecto. Se debe demostrar que los datos recolectados son reales y que se aplican procedimientos rigurosos de supervisión y mantenimiento de registros en el sitio del proyecto.	Flujo de gas, se debe medir de forma continua y registrarse cada 15min (o totalizado y registrado al menos diariamente), ajustado por T° y presión. Contenido CH ₄ , si no se utiliza un analizador continuo, el muestreo debe realizar de manera trimestral durante 4 periodos específicos del año (abr-may, jun-jul, ago-sep, oct-nov). Cada muestreo debe medir la concentración, el caudal y la T° ambiente durante 8 horas (continuas o en periodos más cortos). Estado operativo del dispositivo de control, debe ser monitoreado y documentado al menos una vez al día. Mantenimiento y calibración: Los medidores de flujo y analizadores se deben limpiar e inspeccionar trimestralmente, excepto de diciembre a marzo. La calibración o verificación de la precisión debe	Anual	Deben comunicarse electrónicamente vía formulario en línea. Basarse en los mejores datos disponibles que tenga el operador. El informe de GEI debe incluir la cantidad total de emisiones en tCO ₂ -eq y detallar actividades/procesos fuente de emisiones, incluyendo cantidades de combustible y materias primas. Debe estar firmado por el responsable que certifique la veracidad. Informes de GEI de emisores obligados deben ir acompañados de un informe de verificación.	Las solicitudes de emisión de créditos de compensación deben ir acompañadas de un informe de verificación. Para cuantificar las emisiones de GES, la verificación debe ser realizada por una 3° persona calificada y un miembro del Ordre des ingénieurs du Québec, que certifique que la cuantificación de la reducción de emisiones de GES y el escenario de línea base cumplen con la norma ISO 14064-2. Las auditorías financieras (que puede ser solicitada por el Ministro) deben ser realizadas por auditores externos e independientes de acuerdo con las normas de auditoría vigentes en Canadá.	- Verificación obligatoria: Informes anuales de emisiones de emisores CTS deben ser verificados por una organización independiente y acreditada (ISO 14065, ISO 17011).	Anual

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
CO	Decreto 1784 de 2017	El prestador es responsable del monitoreo, seguimiento y control técnico de las actividades de disposición final. El monitoreo de biogás es obligatorio, el control de gases se realiza para tomar medidas de control ante posibles altas concentraciones en el fondo del relleno y de los índices de explosividad. Se debe definir el sitio de muestreo de los gases producidos. ya sea en chimeneas o pozos de monitoreo. Además del monitoreo, la captura y quema tecnificada de gas debe realizarse en todas las categorías del relleno establecidas.	La frecuencia del monitoreo de biogás no se define en el decreto, sino que se realiza acorde a lo establecido en el reglamento operativo del relleno sanitario.	No se especifica una frecuencia directa de reporte a la autoridad, sin embargo, el reglamento operativo debe contener bitácoras y registros. La bitácora es el documento donde se registra diariamente y en detalle las actividades realizadas, el cumplimiento del reglamento operativo, inconvenientes y soluciones.	Los registros se llevan en Bitácoras, documentos en los que se consignan diariamente y en detalle: actividades realizadas, cumplimiento del Reglamento Operativo, inconvenientes, condiciones climáticas y cumplimiento de las medidas de control. La persona prestadora debe contar con la documentación mínima: Memorias de diseño, planos del diseño, planos récord, especificaciones técnicas, licencia ambiental, plan de manejo ambiental y Reglamento Operativo. El monitoreo de biogás requiere disponer de equipo con sonda para la medición de la concentración de gases y límites de explosividad, estos datos, junto con el sitio de muestreo, debe ser parte del registro.	No se menciona explícitamente la obligatoriedad de una verificación de la operación o del monitoreo de biogás por parte de un 3°, dado que la responsabilidad primaria del monitoreo, seguimiento y control técnico recae en la persona prestadora.	La persona prestadora tiene la responsabilidad de las actividades de monitoreo, seguimiento y control técnico.	NA; No se especifica la frecuencia de fiscalización por parte de la autoridad
EEUU - CA	Regulation on Methane in Landfills (LMR)	► Monitoreo de emisiones superficiales (instantáneo o integrado): En el instantáneo la concentración $CH_4 < 500$ ppmv y registrar cualquier lectura mayor a 200ppmv, el integrado considera el promedio de $CH_4 < 25$ ppmv.	► Monitoreo de emisiones superficiales (instantáneo o integrado): Trimestral, pero si se cumplen cuatro periodos trimestrales sin excedentes el monitoreo puede ser	Informe de monitoreo de superficie es trimestral, pero si se cumplen ciertas condiciones (cuatro periodos trimestrales sin excedentes) el monitoreo puede ser anual.	► Si RSU activo tiene menos de 450.000 ton se realiza informe: Para periodo entre 01/01 y 31/12 cada año, anual hasta alcanzar 450.000 ton o se presente una notificación de cierre.	No se especifica un requisito general de verificación por parte de un tercero para los monitoreos o reportes. Sin embargo, los planes de diseño deben ser preparados y certificados	La autoridad implementadora se encarga de implementar y hacer cumplir la regulación. Además, revisa y aprueba/desaprueba los Planes de Diseño y solicitudes de	No se especifica una frecuencia de fiscalización obligatoria para las inspecciones de la autoridad. Sin embargo, si se detectan excedencia durante cualquier inspección de cumplimiento realizada

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
		► Monitoreo de fugas: Los componentes bajo presión positiva se deben monitorear trimestralmente para detectar fugas. ► Monitoreo de Cabeza de Pozo: Medición de la presión manométrica de cada pozo para verificar que operan bajo vacío (presión negativa). ► Antorchas: Se debe monitorear la T° de combustión con dispositivo equipado con un registrador continuo.	anual. ► Monitoreo de fugas: Trimestralmente.	► Trimestral de concentraciones superficiales que no superen las 500 ppmv (instantáneo) o un límite de concentración de metano promedio de 25 ppmv (integrado) medido como metano. ► Anual si se cumplen las condiciones en "95469".	► Si RSU activo tiene igual o más de 450.000 ton, se debe calcular la capacidad de entrada de calor de gas de vertederos y debe presentar un informe: • Si <3 MMBTu/h recuperadas, recalcular y reportar anualmente hasta alcanzar 3 o su cierre. • Si ≥ 3 MMBTu/h, cumplir requisitos o demostrar mediante 4 monitoreos trimestrales consecutivos, la ausencia de concentraciones de metano ≥ 200 ppmv. Diseño de sistemas de recolección y control de gases y vertederos; Datos de monitoreo del sistema de recolección y control de gas; Datos de pruebas de rendimiento del sistema de recolección y control de gas; Datos relacionados con las emisiones.	por un ingeniero profesional.	Operaciones de Cumplimiento Alternativas. También, puede solicitar los registros y reportes. Los inspectores pueden realizar inspecciones, si se detecta una excedencia de CH ₄ en la superficie se considera una violación, pudiendo imponer multas por cualquier violación (por ejemplo, presentación tardía, incompleta o inexacta de cualquier reporte o plan). ► Monitoreo de emisiones superficiales (instantáneo o integrado): Con detectores de hidrocarburos. ► Monitoreo de fugas: En componentes bajo presión positiva. ► Monitoreo de Cabeza de Pozo: Medición de la presión del calibre. ► Prueba de fuente: Para determinar la eficiencia de reducción.	por un inspector, el sitio debe volver al monitoreo trimestral y a intervalos de 25pies (7,62m). ► Monitoreo de emisiones superficiales (instantáneo o integrado): Trimestral, puede reducirse a anualmente si no hay excedencia durante cuatro periodos de monitoreo trimestral consecutivos o si se demuestra que en últimos 3 años no hubo excedencias. ► Monitoreo de fugas: Trimestral. ► Monitoreo de Cabeza de Pozo: Mensual. ► Prueba de fuente de control de gas: Anual, puede reducirse a cada 3 años si se demuestra cumplimiento en tres pruebas consecutivas.
EEUU - CA	Regulación SB 1383 (Short-Lived Climate Pollutants: Organic Waste Methane Emission Reduction)	Las instalaciones u operaciones que aceptan residuos orgánicos mezclados o separados por la fuente deben medir la cantidad de residuos orgánicos recuperados y la cantidad enviada a eliminación. ► Revisión de rutas, como inspección visual de contenedores a lo largo de	Evaluaciones de residuos de contenedores grises: Trimestre, en instalaciones que reciben más de 500 ton a residuos sólidos de al menos una jurisdicción. Eficiencia de recuperación en instalaciones de procesamiento: Muestras compuestas	Los informes de los procesadores/transferidos se realiza trimestralmente. Para cada periodo de informe, las mediciones de muestreo deben realizarse durante al menos 10 días operativos consecutivos. Reportes Anuales de Jurisdicción: Primer	Reportes Anuales de Jurisdicción: Información sobre el tipo de servicio de recolección, números de generadores por servicio, resultados de monitoreo de contaminación, avances en educación y divulgación, supervisión de transportistas, implementación de requisitos de acciones de	Los operadores deben mantener registros de mediciones y entrenamiento de personal. La agencia de cumplimiento (EA) puede aprobar protocolos de medición alternativos si garantizan la misma precisión. En ciertos casos, se puede sustituir el muestreo obligatorio si el usuario	► Revisión de rutas, como inspección visual de contenedores a lo largo de la ruta de transporte para determinar la contaminación. ► Revisión de cumplimiento, como inspección de registros para verificar la suscripción a servicios de recolección. ► Revisión/mediciones de	Evaluaciones de residuos de contenedores grises: Trimestre, en instalaciones que reciben más de 500 ton a residuos sólidos de al menos una jurisdicción. Eficiencia de recuperación en instalaciones de procesamiento: Muestras compuestas durante 10 días operativos consecutivos por trimestre.

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
		la ruta de transporte para determinar la contaminación. ► Revisión de cumplimiento, como inspección de registros para verificar la suscripción a servicios de recolección. ► Revisión/mediciones de residuos, protocolo de muestreo para determinar la eficiencia de recuperación o el contenido orgánico en residuos.	durante 10 días operativos consecutivos por trimestre. Revisión de rutas, los servicios de recolección de 3 y 2 contenedores deben realizar monitoreo 2 veces al año para todos los contenedores.	reporte en 2022, luego se realiza anual el primero de agosto de cada año. Procesamiento/Reciclaje /Compostaje: Reportes trimestrales. Reporte de planificación de capacidad.	cumplimiento/fiscalización. Procesamiento/Reciclaje/Compostaje: Resumen trimestral de los pesos de residuos orgánicos recuperados y los residuos enviados a disposición, cantidad de alimentos recogidos por generadores.	final impone un estándar de calidad (incluido el muestreo) que cumpla o supere los requisitos de contaminación de materiales incompatibles, lo que implica una revisión externa.	residuos, protocolo de muestreo para determinar la eficiencia de recuperación o el contenido orgánico en residuos.	Revisión de rutas, los servicios de recolección de 3 y 2 contenedores deben realizar monitoreo 2 veces al año para todos los contenedores.
EEUU - CO	5 CCR 1001-26 – Regulation Number 6, Part A: Standards of Performance for New Stationary Sources	- Se establecen requisitos obligatorios de monitoreo para los propietarios y operadores de ciertas instalaciones, incluyendo rellenos sanitarios municipales. - Los propietarios u operadores de rellenos sanitarios deben calcular las emisiones de GEI según la Subparte C, si aplica, y Subparte HH de 40 CFR, Parte 98. - Monitoreo para Crédito: Para proyectos de CH₄ recuperado (biogás) destinados a generar créditos, se utiliza la metodología "Landfill Gas Destruction and Beneficial Use Projects" emitida por ACR, que especifica procedimientos de recolección de datos y monitoreo. - Mantenimiento de registros: La empresa debe	El cálculo de las emisiones de GEI debe realizarse por año. Para proyectos de CH ₄ recuperado, el protocolo ACR tiene requisitos de monitoreo continuo de los parámetros necesarios para cuantificar las reducciones, la frecuencia depende de los procedimientos detallados en el protocolo.	Anual, los propietarios/operadores deben presentar un informe de todas las emisiones de GEI del año calendario anterior. Los créditos de CH ₄ recuperado deben solicitarse dentro de 12 meses posteriores a la fecha en que se recuperó el CH ₄ del proyecto.	El reglamento define y exige el reporte de siete GEI: CO ₂ , CH ₄ , Óxido nítrico, HFCs, PFCs, Hexafluoruro de azufre, Trifluoruro de nitrógeno. Los GEI deben reportarse como constituyentes individuales (en toneladas métricas por año) y como emisiones agregadas en Dióxido de Carbono Equivalente. Alineación Federal: La División busca aprovechar las herramientas de reporte existentes de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA), como el e-GGRT, y los protocolos del 40 CFR Parte 98 (la Regla de Reporte Obligatorio de GEI) para minimizar la carga y garantizar la coherencia.	Verificación para Crédito: La verificación es obligatoria si la empresa busca obtener créditos de CH ₄ recuperado. La verificación de las reducciones de GEI debe ser realizada por un organismo acreditado para llevar a cabo la verificación del tipo de proyecto bajo el Programa de Acreditación para Cuerpos de Validación/Verificación de Gases de Efecto Invernadero (GHGVVB) del ANSI Nacional Accreditation Board (ANAB).	Corrección de errores sustantivos. Mantenimiento de registros. Verificación de créditos de metano recuperado. Sistema de acreditación y seguimiento. Planes de mitigación de emisiones de HFC. Declaraciones de divulgación. Certificación.	- Frecuencia de retención: Los registros deben mantenerse durante cinco (5) años a partir de la fecha de presentación del informe anual de GEI. - Plazo de notificación: Si una entidad descubre errores sustantivos, debe notificar a la División por escrito dentro de los cinco (5) días hábiles posteriores al descubrimiento. - Plazo de corrección: Un informe revisado que corrija los errores debe presentarse dentro de los cuarenta y cinco (45) días posteriores al descubrimiento de los errores o a la notificación de los mismos por parte de la División. - Frecuencia: La certificación debe incluirse en el informe de GEI que se presenta anualmente. La mayoría de los informes

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
		mantener registros de la documentación de respaldo, incluidos los datos operativos y los cálculos de emisiones de GEI, se deben mantener los registros durante 5 años a partir de la fecha de presentación del informe.						anuales vencen a más tardar el 31 de marzo del año posterior al año calendario cubierto. Reporte de Proyectos de Reducción: El fabricante debe completar proyectos de reducción de GEI dentro del estado (si es necesario para la mitigación). Un informe de finalización para cada proyecto debe presentarse a la División a más tardar noventa (90) días después de que se complete el proyecto.
EEUU - EPA	Criteria for municipal solid waste landfills	Los propietarios u operadores de MSWLF deben implementar un programa de monitoreo de metano de rutina para garantizar que se cumplan los límites de concentración.	La frecuencia mínima será trimestral. Sin embargo, el tipo y la frecuencia del monitoreo se determinan según factores como: condiciones del suelo; condiciones hidrogeológicas e hidráulicas que rodean la instalación; ubicación de las estructuras de la instalación.	Si se detectan niveles de CH ₄ que exceden los límites especificados, el propietario u operador debe: notificar de inmediato al Director del Estado; dentro de 7 días posteriores a la detección, se debe colocar en el Registro Operativo los niveles de CH ₄ detectados y una descripción de las medidas ejecutadas para proteger la salud humana; dentro de 60 días posterior a la detección, se implementa un plan de remediación para las liberaciones de CH ₄ , con una copia del plan en el Registro y la notificación al Director de que el plan se ha implementado	Los reportes poseen los resultados del monitoreo de gas y el plan de remediación requerido, ambos deben registrarse y retenerse en el Registro Operativo de la instalación o en una ubicación aprobada por el Director. El plan de remediación describe la naturaleza, el alcance del problema y la solución propuesta.	No se requiere explícitamente la verificación por parte de un tercero independiente para los datos de monitoreo de metano o los planes de remediación de gas. Mientras que sí se requiere un ingeniero profesional para certificar el cierre/post-cierre completo, además en las aguas subterráneas se requiere un científico de aguas subterráneas.	La fiscalización se establece principalmente a través de mecanismos de control de cumplimiento y consecuencias por incumplimiento. Se basa en un modelo en que el operador es responsable de la vigilancia continua y la certificación profesional. Mientras que la autoridad supervisa, administra el cumplimiento, revisa y aprueba los planes.	No especifica una frecuencia rutinaria de inspecciones o fiscalizaciones en el sitio por parte de la autoridad.

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
EEUU - MD	COMAR 26.11.42 – Control of Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfills (MSW Landfills)	Monitoreo de emisiones superficiales (instantáneo o integrado). Monitoreo de pozos: Incluye presión manométrica, T°, contenido de nitrógeno y oxígeno del gas de vertedero. Monitoreo de Componentes del GCCS: Detección de fugas en componentes que contienen gas de vertedero y están bajo presión positiva. Pruebas de desempeño: Pruebas de destrucción de CH ₄ en dispositivos de control de gas. Monitoreo de Gas a la Entrada del Sistema de Control/Tratamiento: Se requiere un dispositivo de medición de caudal de gas y un dispositivo para registrar el flujo y el desvío para 15min.	Monitoreos superficiales: Trimestral, puede ser anual si no hay excedencias después de cuatro trimestres consecutivos para rellenos cerrados o inactivos. Monitoreo de pozos: Mensual. Fugas de componentes: Trimestre. Pruebas de desempeño: Anual, puede ser cada 3 años si se demuestra cumplimiento consecutivo. Flujo de gas: Registro cada 15min o inspección mensual del sello de seguridad.	- Reportes Semianuales: Obligatorios, se presenta al MDE por el propietario/operador por el final del mes siguiente al periodo de 6 meses. - Reportes Anuales: Obligatorios (Reporte Anual general y Reporte de Residuos en el Lugar (WIP)), se presenta al MDE a más tardar el 15 de marzo del año siguiente. - Reportes de tasa de generación de CH₄: Anualmente (si es menor a 732 ton/año) o un reporte inicial dentro de 90 días de la entrada en vigencia de la regulación. - Reporte de prueba de desempeño: Dentro de 30d después de completar cada prueba.	Los reportes se deben mantener por al menos 5 años. Deben incluir información detallada sobre tiempos de inactividad, fugas, ubicaciones (con coordenadas de al menos 4 metros de precisión en grados decimales con cinco decimales), acciones correctivas, velocidades del viento y resultados de las pruebas. La información debe enviarse al Gerente del Programa de Cumplimiento de Calidad del Aire de MDE. S	Certificado de diseño: El plan de diseño del Sistema de Captura y Control de Gas (GCCS) debe ser preparado y certificado por un ingeniero profesional. Pruebas de desempeño: El propietario/operador realiza las pruebas de desempeño anuales (o trimestrales) utilizando métodos de prueba específicos.	Departamento de Medio Ambiente de Maryland (MDE). -Revisión y aprobación de documentación: El MDE revisa y aprueba planes de diseño del sistema de captura y control de gas, planes de cumplimiento alternativos, y análisis de acciones correctivas. -Inspecciones de cumplimiento: Se realizan inspecciones de cumplimiento y si se detectan excedencias durante estas inspecciones, la frecuencia de monitoreo del operador debe volver a ser trimestral. -El MDE puede solicitar información adicional para verificar datos reportados, como la tasa de generación de CH ₄ .	Monitoreo de emisiones superficiales (instantáneo e integrado): trimestral. Si un vertedero activo no tiene un Sistema de Recolección y Control de Gas (GCCS) y su tasa de generación de metano se encuentra entre 732 y 8,548 toneladas por año: debe realizar monitoreo SEM instantáneo durante cuatro trimestres consecutivos. Para los vertederos cerrados o inactivos: que no presenten excedencias en cuatro trimestres consecutivos, la frecuencia puede reducirse a anual. Si durante el monitoreo anual se detecta cualquier excedencia del límite especificado, el monitoreo debe volver a ser trimestral. Monitoreo de componentes GCCS: inspección trimestral de fugas de metano en equipos con gas bajo presión. Bocas de pozo: cada pozo se mide mensualmente (presión, temperatura, oxígeno y nitrógeno). Los termómetros deben calibrarse anualmente.

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
								Pruebas de rendimiento: equipos de control de gas se prueban cada año; si cumplen en tres pruebas seguidas, el intervalo pasa a cada 3 años. Monitoreo mejorado: empieza 7 días después de que el gas del vertedero supere 62.8 °C. Se mide CO semanalmente; si 4 semanas seguidas están bajo 100 ppmv, el control pasa a mensual
EEUU - OR	Division 239 – LANDFILL GAS EMISSIONS	Monitoreo de emisiones superficiales, que incluye monitoreo instantáneo (para detectar lecturas de 500 ppmv o más) e integrado. Monitoreo del cabezal de pozo, con medición de presión, T°, entre otros. Monitoreo continuo de la T° (para combustiones cerrados) y del flujo de gas (para antorchas y dispositivos de recuperación de energía). Monitoreo mejorado de T°, si la T° del gas del relleno supera los 62,8°C.	Emisiones superficiales instantáneas: Trimestral para rellenos activos y anualmente para rellenos cerrados o inactivos. Las nuevas mediciones luego de una lectura superior a 200ppmv o 500ppmv deben ocurrir dentro de 10 o 120 días dependiendo del n° de excedencias consecutivas. Monitoreo del cabezal de pozo: Mensual. Fugas de componentes: Trimestral. Flujo de gas: Registros de la tasa de flujo de gas cada 15 minutos. Monitoreo mejorado de T°: Semanalmente, pudiendo ser mensual bajo ciertas condiciones.	- Reportes Semianuales: Obligatorios para los dueños u operadores sujetos a la división. - Reporte Anual de Residuos en el Lugar (Waste-In-Place Report): Anual, a más tardar el 1 de marzo. - Reporte Anual de Generación de Metano (MGR): Anual, a más tardar el 15 de marzo, si la tasa se mantiene por debajo del umbral de activación. - Reporte de Cierre (Closure Notification): Dentro de los 30 días posteriores a la aceptación final de residuos. - Reporte de Exceso de SEM Instantáneo: Dentro de los 30 días posteriores al cuarto trimestre consecutivo de monitoreo que no detecta excedencias.	Los registros de todos los datos de cumplimiento deben mantenerse por al menos 5 años. El DEQ puede requerir el uso de los requisitos de reporte electrónico de 40 C.F.R. para ciertas instalaciones. Los reportes deben incluir documentación detallada, ubicaciones geográficas de las mediciones (coordenadas en grados decimales con al menos cinco decimales) y registros fotográficos digitales en el sitio de monitoreo.	Los informes deben estar certificados por el propietario u operador en cuanto a la veracidad y precisión de la información. Además, el Plan de Diseño del sistema de recolección de gas debe ser preparado y certificado por un ingeniero profesional.	Prueba de Rendimiento: La autoridad exige que los dispositivos de control demuestren la eficiencia de destrucción de CH₄ (generalmente al menos el 99%). Inspección y Auditoría: La autoridad puede realizar auditorías durante el monitoreo anual o durante cualquier inspección de DEQ. Revisión de Informes: DEQ revisa los Informes Semianuales y Anuales de Cumplimiento, así como los Informes de Tasa de Generación de CH₄. Registros: La autoridad exige que se mantengan registros durante al menos 5 años de los registros.	Pruebas de rendimiento: La prueba inicial debe completarse dentro de 180 días después del inicio de la operación, las pruebas posteriores de rendimiento deben realizarse cada 3 años o cada 5 años, según los estándares que se cumplan.

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
EEUU - DC	Chapter 70A.540 RCW LANDFILLS — METHANE EMISSIONS	Los propietarios/operadores de rellenos sanitarios con sistemas de recolección y control de gas deben monitorear la superficie del relleno sanitario, el sistema de control de gas y cada cabezal de pozo individual. El monitoreo de la superficie se realiza mediante mediciones instantáneas o integradas de emisiones de superficie. Se requiere la medición de la concentración de CH ₄ utilizando un detector de hidrocarburos, también, se mide la presión manométrica en los cabezales de pozo.	Anual, para el recálculo de la capacidad de entrada de calor del gas (si está por debajo de 3M BTU/h). Cuatro periodos de monitoreo trimestral consecutivos para demostrar que no se requiere un sistema de recolección y control de gas. Las pruebas de fuente para dispositivos de control de gas deben realizarse al menos una vez cada cinco años si el dispositivo está en cumplimiento. Si el dispositivo no cumple, la prueba se debe realizar una vez por año hasta que dos pruebas consecutivas muestren cumplimiento. En caso de una superación de límites, la ubicación debe ser remonitoreada dentro de los 10 días calendario.	Informe de residuos en el lugar (Waste in place report): Anual. Informe de capacidad de entrada de calor de gas: Anual (si es menor a 3.000.000 BTU/hr). Informe Anual (para rellenos grandes): Anual (para el período del 1 de enero al 31 de diciembre, presentado durante el año calendario subsiguiente). Notificación de cierre: Dentro de los 30 días posteriores al cese de la aceptación de residuos. Informe de remoción de equipo: Dentro de los 30 días posteriores al taponamiento o remoción del sistema. Prueba de Fuente: No menos de una vez cada cinco años (si cumple); no menos de una vez al año (si no cumple, hasta dos pruebas consecutivas muestren cumplimiento).	Los registros relacionados con monitoreo, pruebas, operaciones del relleno sanitario y sistemas de control deben ser mantenidos. Los registros deben ser proporcionados al Departamento o autoridad local dentro de cinco días hábiles de una solicitud. La fecha de presentación de los informes anuales será establecida por reglas adoptadas por el departamento. La ubicación de cada excedencia de metano debe estar claramente marcada e identificada en un mapa topográfico, dibujado a escala, que muestre las rejillas de monitoreo y el sistema de recolección de gas.	La fuente no contiene información de una verificación por parte de tercero. Todas las obligaciones de reporte, monitoreo y demostración de cumplimiento se dirigen al Departamento de Ecología o a la autoridad local.	Departamento o la autoridad local; Medición de Metano: Monitoreo instantáneo o integrado de la superficie del relleno sanitario, y monitoreo de cada pozo individual para determinar la presión manométrica; Medición de Metano: Uso de un detector de hidrocarburos u otro instrumento equivalente aprobado para medir la concentración de metano en la superficie y para medir fugas.; Pruebas de Fuente (Source Test): Se debe realizar una prueba de fuente para cualquier dispositivo de control de gas; Acción Correctiva: El propietario u operador debe tomar medidas correctivas (ej. mantenimiento o reparación de la cubierta, o ajustes de vacío del pozo) dentro de 10 días calendario de una excedencia medida.; Penalidades: Las violaciones pueden incurrir en una sanción civil.	La fuente no especifica una frecuencia rutinaria o programada para la fiscalización por parte de la autoridad par gases. Los métodos de fiscalización hacen referencia a la solicitud de registro o imposición de multas antes eventos o incumplimiento.
EEUU - DC	Landfill Methane Emissions	Monitoreo de emisiones superficiales (instantáneo o integrado). Monitoreo de equipos del sistema de control de gas (EJ: dispositivos de monitoreo de T° y caudal de gas para antorchas	Monitoreo de emisiones superficiales: Trimestral para toda la superficie del relleno sanitario, si un relleno sanitario cerrado no tiene excedencias en 4	Reporte inicial de residuos in situ. Se realiza una vez para el registro ya entrada en vigencia la norma. Luego se actualiza anualmente para los rellenos que correspondan.	Reporte inicial de residuos in situ la realizan todos los rellenos que haya recibido residuos desde el 1 de enero de 1992 deber hacer el reporte. Luego deberá renovar anualmente el	La normativa requiere que el plan de diseño del Sistema de Recolección y Control de Gas sea preparado y certificado por un ingeniero profesional. No se especifica un	La fiscalización se realiza por los monitoreos y notificaciones de superación de límites, además por reportes. - Todo relleno que presente un Plan de colección y control de	Monitoreo trimestral de la superficie del relleno (instantáneo o integrado). - Monitoreo trimestral al equipo de colección y control de gases.

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
		cerradas). Monitoreo de fugas de componentes que contienen gas de relleno. Monitoreo de la presión de boca de pozo.	periodos trimestrales consecutivos, puede monitorear anualmente. Monitoreo de fugas de componentes: Trimestral. Monitoreo de boca de pozo: Mensualmente. Pruebas de fuente para dispositivos de control: Al inicio dentro de los 180 días posterior del inicio, después no menos de una vez cada 5 años, a menos de que el dispositivo esté fuera de cumplimiento, en cuyo caso debe ser una vez por año hasta que haya 2 pruebas consecutivas conformes.	- Reporte inicial de capacidad de calor de entrada (HIC), este reporte también es una vez cuando entra en vigencia la norma y es solo para los rellenos que cumplen con características de pesaje. Luego este reporte se actualiza anualmente simplemente como reporte de HIC. - Reporte de excedencia de los límites de emisión. - Reporte anual, que dependiendo de las características del relleno sanitario puede contener los reportes ya mencionado, según corresponda.	reporte los rellenos activos que tengan menos de 450.000 ton de residuos. - Reporte de inicial de HIC. Este reporte lo deben presentar aquellos rellenos activos que tengan más de 450.000 ton de residuos o aquellos rellenos cerrados que tengan 750.000 ton o más de residuos. Este reporte se debe renovar anualmente y dejará de presentarlo si el relleno tiene más de 3 MBTU/h de HIC o si el relleno se declara cerrado. Para los rellenos que presentan más de 3MBTU/h de HIC deben demostrar que las emisiones de metano no sobrepasan las 200 ppmv luego de monitorear 4 trimestres consecutivos usando monitoreo instantáneo en superficie. Si no se miden 200 ppmv de metano se deben recalcular los HIC, para ver si aplica a los reportes anteriores. Si los supera deberá tener un plan de colección y control de gases con monitoreo y que no debe exceder los límites descritos en el campo de "valor límite de emisión".	requisito general para verificaciones realizadas por un 3° para el cumplimiento continuo.	gases debe tener un plan de monitoreo en superficie (instantáneo o integrado) que debe realizar de forma trimestral. También el plan de monitoreo debe ser actualizado trimestralmente por cualquier modificación que intervenga en el procedimiento. - Se debe notificar al departamento encargado o a la autoridad local si resulta una excedencia en la lectura de emisión.	- Monitoreo mensual al cabezal de pozo.

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
ME	Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003	El operador debe elaborar un programa de monitoreo de biogás, que forma parte del programa de monitoreo ambiental del sitio. El objetivo es conocer el grado de estabilización de los residuos y detectar migraciones del biogás fuera del predio.	El monitoreo ambiental incluye un conjunto de acciones para la verificación periódica. El programa de monitoreo debe mantenerse vigente por un periodo de al menos 20 años durante el mantenimiento de posclausura.	Informe mensual de actividades del control de los impactos ambientales, incluye registros del monitoreo de biogás, lixiviados y acuíferos.	La empresa debe llevar un Control de Registro de incluya la generación y manejo de lixiviados y biogás. El programa de monitoreo de biogás debe incluir parámetros de composición, explosividad y flujo de biogás. El Manual de Operaciones debe incluir un programa de monitoreo ambiental de biogás. Informe mensual de actividades, generados por el sitio. Los documentos de soporte para la fiscalización incluyen Actas Circunstanciadas e Informes Técnicos.	La evaluación de conformidad (PEC) se lleva a cabo por Unidades de Verificación (UV), que son personas físicas o morales debidamente acreditadas y aprobadas. La UV emite un Dictamen de Verificación que certifica el cumplimiento de la NOM, la UV seleccionada no debe tener relación comercial ni ser empleada por el propietario, responsable, constructor o proyectista.	Los métodos incluyen el reconocimiento de los Dictámenes de Verificación emitidos por las UVs. Durante las visitas de verificación realizadas por la UV, se constata visualmente el grado de cumplimiento, se levantan Actas circunstanciadas y se generan informes técnicos. ► Monitoreo de biogás: Para conocer el grado de estabilización de los residuos y detectar migraciones fuera del predio, el programa deberá especificar los parámetros de composición, explosividad y flujo de biogás. ► Monitoreo de lixiviado: Para conocer su pH, DBO5, DQO y metales pesados. ► Monitoreo de Acuíferos: Para contar con puntos de muestreo que respondan a las condiciones particulares del sistema de flujo hidráulico. ► Evaluación de la	La evaluación de la conformidad se lleva a cabo a petición de parte, del responsable del sitio. La verificación puede realizarse por etapas, módulos, partes o ampliaciones de un sitio. La frecuencia de fiscalización no se especifica, sin embargo, las Unidades de Verificación deben entregar o enviar a la autoridad competente un informe de los dictámenes de verificación emitidos dentro de los primeros veinte días siguientes al vencimiento de cada trimestre del año.

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
							Conformidad (PEC). La verificación la realizan Unidades de Verificación (UV), incluye inspección visual y revisión de la documentación.	
NZ	Climate Change Response (Disposal facilities) regulation 2010	Las empresas (participantes de DF) deben reportar las emisiones bajo la Ley, la metodología implica el cálculo de emisiones y la medición directa requiere que se midan las emisiones reales utilizando equipos basados en campo. Los participantes de DF con sistemas de recolección de gas de vertederos miden el flujo de gas mediante medidores. Si los participantes de DF solicitan un Factor de Emisiones Único (UEF), se requiere muestreo y prueba.	Los sistemas de recolección de gas de vertedero realizan evaluaciones de la eficiencia de la recolección de forma rutinaria. La medición directa implica la determinación continua de las emisiones a partir de muestras y modelos. Si se opta por un UEF (para determinar la composición de residuos), se requiere al menos 2 estudios de composición de residuos cada año.	Anual	Los reportes deben tener los registros de emisiones, por estimación por balance de masa o por medición directa	Los participantes de las instalaciones de disposición de residuos (DF) que deseen aplicar un Factor de Emisiones Único (UEF) deben buscar la verificación requerida en las regulaciones antes de que se presente la solicitud para su consideración. Dicha verificación o una estimación de eficiencia de recolección de gas se basaría en una evaluación de que las pruebas y los cálculos han seguido el estándar o método aplicable.	A través de reportes anuales de emisiones y de cantidad de residuos. La fiscalización y el cumplimiento de las regulaciones se llevarán a cabo bajo la Parte 4 de la ley, que establece las disposiciones relativas a infracciones y sanciones.	Anuales
NZ	Resource Management (National Environmental Standards for Air Quality) Regulation 2004	La empresa debe diseñar y operar un sistema de recolección de gas para garantizar que cualquier descarga de gas desde la superficie del vertedero no exceda las 5.000 ppm de CH ₄ . Si el gas es quemado, el sistema de principal debe contar con un indicador de T° permanente y puntos de muestreo adecuados para permitir la realización de pruebas de emisión.	No hay información específica sobre la frecuencia requerida para el monitoreo de CH ₄ en la superficie o la frecuencia con la que se deben registrar las T° del flare.	No posee información específica sobre la frecuencia del reporte para el control de gases de vertedero. Existe, aviso público de incumplimiento de estándares: El consejo regional debe reportar cualquier superación de norma y debe mantener el aviso por al menos 1 vez al mes. - Solicitud de circunstancias excepcionales: El consejo	En las Solicitud de circunstancias excepcionales se puede ignorar la culpabilidad de la superación de los estándares. Sin embargo, no se puede ignorar el hecho de superación de norma por lo que de todas formas se debe hacer el aviso público.	No se menciona explícitamente la obligación de verificación de 3° para el cumplimiento de los gases de vertedero.	El método se basa en que el titular cuente con el equipamiento correcto en el sistema de colección de gas, debe cumplir con ciertas características de antorcha, temperatura tiempo de retención del gas y un sistema de ignición automático.	NA

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
				también debe avisar si la superación de la norma es por alguna circunstancia excepcional a más tardar 3 meses dada la superación de la norma.				
UK-SC	Landfills regulations (Escocia)	Para controlar la acumulación y migración del gas de vertedero se deben tomar medidas de control apropiadas. El gas debe ser tratado y, en medida de lo posible, utilizado. El gas de vertedero que no pueda ser utilizado para producir energía debe ser quemado. El monitoreo de gases debe incluir CH₄, CO₂, O₂, H₂S, H₂ y otros gases según sea necesario.	El monitoreo se debe llevar a cabo mensualmente	El operador debe informar anualmente sobre los resultados del monitoreo, o con la frecuencia que SEPA lo requiera.	El operador es responsable de supervisar y analizar los gases del vertedero y los lixiviados, así como las aguas subterráneas. Incluir los tipos y cantidades de residuos dispuestos, entregar bases de datos agregados y demostrar el cumplimiento de las condiciones.	Las operaciones analíticas de control y monitoreo, así como los análisis de muestras representativas, deben ser realizadas por laboratorios competentes. La normativa no exige explícitamente la verificación, auditoría o certificación de informes por parte de un 3° independiente ajeno a la operación y a la autoridad (SEPA).	Inspecciones iniciales y periódicas para el monitoreo de lixiviados, aguas superficiales y gases. Inspección visual de residuos en la entrada y depósito. Procedimientos de control y monitoreo establecidos en el Anexo 4 (volumen/composición de lixiviados y aguas superficiales; emisiones de gases y presión atmosférica).	Fase Operacional: • Volumen / Composición de lixiviados: Mensual / Trimestral. • Volumen y composición de agua superficial: Trimestral. • Emisiones de gases (CH₄, CO₂, O₂, H₂S, H₂, etc): Mensual. Fase After-Care: • Volumen / Composición de lixiviados: Cada seis meses. • Volumen y composición de agua superficial: Cada seis meses. • Emisiones de gases (CH₄, CO₂, O₂, H₂S, H₂, etc): Cada seis meses.
UK-ENG/GL	Landfills regulations (Inglaterra y Gales)	El operador debe llevar a cabo procedimientos de control y monitoreo establecidos en el Anexo 3. Esto incluye el monitoreo de gas para CH₄, CO₂, O₂, H₂S, H₂, etc. El operador de vertederos que reciben residuos biodegradables deben tomar medidas apropiadas para controlar la acumulación y migración del gas de vertedero. El gas debe ser recogido,	Fase Operación: El monitoreo de posibles emisiones de gas y presión atmosférica debe ser realizada mensualmente. El CH₄ y otros gases deben monitorearse regularmente. Fase After-Care: El monitoreo de CH₄ requiere cada 6 meses. Además, la eficiencia del sistema de	Anualmente, el operador informa a la EA los tipos y cantidad de residuos dispuestos, además de los resultados del programa de monitoreo del Art. 14 y 15.	Se debe tener registro de la cantidad, características, origen, fechas, los resultados del programa de monitoreo con bases de datos agregados.	No se menciona explícitamente la obligación de verificación de 3°. Se establece que el control de calidad de las operaciones analíticas del monitoreo y los procedimientos de control debe ser realizado por laboratorios competentes.	Inspecciones iniciales y periódicas para el monitoreo de lixiviados, aguas superficiales y gases. Inspección visual de los residuos a la entrada y depósito por parte del operador. Procedimientos de control y monitoreo establecidos en el Anexo 3 (volumen/composición de lixiviados, volumen/composición de aguas superficiales,	Fase Operacional: • Volumen / Composición de lixiviados: Mensual / Trimestral. • Volumen y composición de agua superficial: Trimestral. • Emisiones de gases (CH₄, CO₂, O₂, H₂S, H₂, etc): Mensual. Fase After-Care: • Volumen / Composición de lixiviados: Cada seis meses. • Volumen y composición

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
		tratado, y en la medida de lo posible, utilizado; el gas que no pueda ser utilizado para producir energía debe ser quemado.	extracción de gas debe verificarse regularmente.				emisiones de gases y presión atmosférica).	de agua superficial: Cada seis meses. • Emisiones de gases (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ S, H ₂ , etc): Cada seis meses.
UK-IRN	Landfills regulations (Irlanda del Norte)	El operador debe llevar a cabo procedimientos de control y monitoreo establecidos en el Anexo 3. El monitoreo de gases se debe realizar en cada sección del vertedero, los parámetros incluyen las emisiones potenciales de gas y la presión atmosférica. Los gases a monitorear son CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ S, H ₂ y otros. El biogás debe ser recolectado de todos los vertederos que reciben residuos biodegradables, tratado y, si es posible, utilizado (o quemado si no puede ser utilizado para producir energía).	Fase Operación: Monitoreo Mensual. Fase After-Care: Cada seis meses.	Anual, el operador informa mínimo una vez al año los resultados del monitoreo.	Se reporta los tipos y cantidades de residuos dispuestos, y los resultados del programa de monitoreo con bases de datos agregados. Además, de otros datos del registro de residuos como cantidades, características, origen, entre otros.	Las operaciones de muestreo y análisis de control y monitoreo deben ser realizadas por laboratorios competentes. El muestreo y las pruebas deben ser realizados por personas e instituciones independientes y calificadas. Sin embargo, los productores/operadores pueden realizar el muestreo y las pruebas si existe supervisión suficiente por personas independientes y calificadas y si se aplica un sistema de aseguramiento de calidad con verificación independiente periódica.	Inspecciones iniciales antes del inicio de las operaciones, inspecciones visuales de los residuos a la entrada y punto de depósito, pruebas y muestreos de residuos. La autoridad puede incluir condiciones específicas en el permiso de vertedero relativas a los procedimientos de monitoreo y control, requerir al operador que lleve a cabo medidas correctivas si los procedimientos de control y monitoreo revelan efectos ambientales adversos significativos, determinar el periodo razonable durante el cual el operador sigue siendo responsable del monitoreo y control posterior al cierre, realizar una inspección final in situ antes del cierre definitivo del vertedero, y requerir reportes con los resultados del monitoreo.	Fase Operacional: • Volumen / Composición de lixiviados: Mensual / Trimestral. • Volumen y composición de agua superficial: Trimestral. • Emisiones de gases (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ S, H ₂ , etc): Mensual. Fase After-Care: • Volumen / Composición de lixiviados: Cada seis meses. • Volumen y composición de agua superficial: Cada seis meses. • Emisiones de gases (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ S, H ₂ , etc): Cada seis meses. Se requiere una inspección inicial por parte del Inspector Jefe antes de que el operador comience la disposición, también se requiere una inspección final in situ antes del cierre definitivo. No se especifica una frecuencia fija para las fiscalizaciones de rutina por parte de la autoridad.
SE	Manual 2004:2 con directrices sobre la Ordenanza	La empresa debe recoger el gas de vertedero en los vertederos que aceptan residuos biodegradables. Durante la operación, el	No se especifica una frecuencia directa, sin embargo, las evaluaciones de la eficiencia de la planta	No se especifica una frecuencia directa para el reporte de datos de gas. Sin embargo, los planes de acondicionamiento y	Los planes de acondicionamiento o cierre deben incluir la información sobre la gestión del gas recogido,	No se menciona explícitamente la verificación del monitoreo del gas de vertedero por parte de un 3°. El proceso	La autoridad evalúa y aprueba los planes de acondicionamiento o cierre, decidiendo si las medidas propuestas	No se especifica una frecuencia directa para las inspecciones de rutina, las inspecciones son parte del proceso de aprobación de

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
	(2001:512) relativa al vertido de residuos	operador debe tomar muestras y realizar mediciones del gas de vertedero, los sistemas de gas deben diseñarse para tener una alta tasa de recogida de CH ₄ producido y prevenir fugas al aire. El operador debe realizar evaluaciones periódicas para determinar si se necesita expandir la planta de gas o mejorar su eficiencia, si es necesario, puede instalarse una capa oxidante de CH ₄ para manejar el gas y prevenir la emisión de CH ₄ .	deben realizarse regularmente. El monitoreo y control debe realizarse durante la fase after-care por al menos 30 años o por un periodo más largo que determine la autoridad de inspección.	cierre deben incluir información sobre las actividades de automonitoreo y los programas de control presentados a la autoridad.	la forma en que se realizan las actividades de automonitoreo, incluyendo los programas de control, y sugerencias para el muestreo, monitoreo y otros controles considerados necesarios. El reporte teórico del potencial de gas debe complementarse con investigaciones de campo, como las pruebas de bombeo, para verificar los resultados.	de supervisión y aprobación recae en la autoridad de inspección.	(incluyendo la gestión del gas) son suficientes. La autoridad puede requerir que se completen los planes, o emitir una orden si un plan no es aprobado o presentado, y puede exigir investigaciones del vertedero utilizando el Capítulo 26 del Código Ambiental. Además, la autoridad también decide la duración de la fase after-care.	planes. La autoridad debe aprobar la cubierta final del vertedero antes de que se considere cerrado. Anual. Evaluación periódica para determina si es necesario ampliar una planta de biogás o mejorar su eficiencia de recolección de metano producido.
UE	Directiva 1999/31/CE relativa al vertido de residuos	El operador debe llevar a cabo un programa de control y monitoreo según el Anexo III, las medidas se adoptan para controlar la acumulación y migración del gas de vertedero. El gas de vertedero deberá ser capturado de todos los vertederos que reciban residuos biodegradables, y debe ser tratado y utilizado (o quemado si no puede ser utilizado para producir energía). En el post-cierre, el operador es responsable de monitorear y analizar el gas de vertedero, el monitoreo debe ser representativo de cada sección del vertedero.	Para las emisiones de gas y la presión atmosférica, la frecuencia es mensual durante la fase de operación. En el post-cierre, la frecuencia del monitoreo de gas es cada seis meses. La eficiencia del sistema de extracción de gas debe verificarse regularmente. La frecuencia de muestreo se puede adaptar en función de la morfología de los residuos del vertedero, y esto debe especificarse en el permiso.	Anual, sobre los tipos y cantidades de residuos eliminados, los resultados del programa de monitoreo según los Art.12, 13 y el anexo III	Se debe tener registro sobre los tipos y cantidades de residuos vertidos, los resultados del programa de seguimiento, los resultados de informes de monitoreo con bases de datos agregados. El operador deberá notificar a la autoridad sobre cualquier efecto ambiental adverso significativo revelado por los procedimientos de control y monitoreo.	No especifica una verificación formal por parte de un 3° para los resultados generales del monitoreo de gases. Sí se requiere que el control de calidad de las operaciones analíticas de los procedimientos de control y monitoreo se lleve a cabo por laboratorios competentes.	Procedimientos de control y monitoreo establecidos en el Anexo 3 (volumen/composición de lixiviados, volumen/composición de aguas superficiales, emisiones de gases y presión atmosférica). Inspección visual de los residuos a la entrada y depósito.	No especifica frecuencia de fiscalización rutinaria específica para la autoridad competente durante la operación. La autoridad toma decisiones y quiere medidas correctivas cuando el operador notifica efectos ambientales adversos significativos. Fase Operacional: • Volumen / Composición de lixiviados: Mensual / Trimestral. • Volumen y composición de agua superficial: Trimestral. • Emisiones de gases (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ S, H ₂ , etc): Mensual. Fase After-Care: • Volumen / Composición de lixiviados: Cada seis

País	Nombre	Monitoreo	Frecuencia de monitoreo	Frecuencia de reporte	Características del reporte	Verificación	Métodos de fiscalización	Frecuencia de fiscalización
								meses. • Volumen y composición de agua superficial: Cada seis meses. • Emisiones de gases (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ S, H ₂ , etc): Cada seis meses."

Fuente: Elaboración propia

12.2 Sitio de disposición identificados 2023

Tabla 12-3 Sitios de disposición identificados 2023

ID	Nombre Sitio	Estado Sitio	Tipo Sitio	Region
1	Relleno Sanitario Santa Inés	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de TARAPACÁ
2	Vertedero Municipal Pozo Almonte	En Operación	Vertedero	REGIÓN de TARAPACÁ
3	Relleno Sanitario Manual de Pica	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de TARAPACÁ
4	Basural de Huara	En Operación	Basural	REGIÓN de TARAPACÁ
5	Relleno Sanitario Camiña	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de TARAPACÁ
6	Relleno Sanitario Chaqueta Blanca	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de ANTOFAGASTA
7	Relleno Sanitario Cerro Colorado	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de ANTOFAGASTA
8	Relleno Sanitario Quebrada Ancha	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de ANTOFAGASTA
9	Vertedero Municipal de Mejillones	En Operación	Vertedero	REGIÓN de ANTOFAGASTA
10	Relleno Sanitario San Pedro de Atacama	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de ANTOFAGASTA
11	Vertedero de Taltal	En Operación	Vertedero	REGIÓN de ANTOFAGASTA
12	Vertedero Municipal de Sierra Gorda	En Operación	Vertedero	REGIÓN de ANTOFAGASTA
13	Relleno Sanitario Manual de Ollagüe	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de ANTOFAGASTA
14	Relleno Sanitario El Chulo	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de ATACAMA
15	Relleno Sanitario Provincial del Huasco	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de ATACAMA
16	Relleno Sanitario Cerro Montevideo	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de ATACAMA
17	Relleno Sanitario Diego de Almagro	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de ATACAMA
18	Basural Municipal de Chañaral	En Operación	Basural	REGIÓN de ATACAMA
19	Relleno Sanitario El Panul	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de COQUIMBO
20	Vertedero El Incienso	En Operación	Vertedero	REGIÓN de COQUIMBO
21	Vertedero Quebrada El Mollaco	En Operación	Vertedero	REGIÓN de COQUIMBO
22	Vertedero Fundo Caracas	En Operación	Vertedero	REGIÓN de COQUIMBO
23	Vertedero Quebrada Lo Gallardo	En Operación	Vertedero	REGIÓN de COQUIMBO

ID	Nombre Sitio	Estado Sitio	Tipo Sitio	Region
24	Vertedero El Queñe	En Operación	Vertedero	REGIÓN de COQUIMBO
25	Vertedero Cerro Manchado	En Operación	Vertedero	REGIÓN de COQUIMBO
26	Vertedero Sector Casas Blancas	En Operación	Vertedero	REGIÓN de COQUIMBO
27	Vertedero El Higueral (Maitencillo)	En Operación	Vertedero	REGIÓN de COQUIMBO
28	Vertedero Quebrada El Gallo	En Operación	Vertedero	REGIÓN de COQUIMBO
29	Relleno Sanitario El Molle	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de VALPARAÍSO
30	Relleno Sanitario San Pedro	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de VALPARAÍSO
31	CTI La Hormiga	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de VALPARAÍSO
32	Vertedero Cabildo	En Operación	Vertedero	REGIÓN de VALPARAÍSO
33	Vertedero Vai a Ori	En Operación	Basural	REGIÓN de VALPARAÍSO
34	Botadero Municipal Juan Fernández	En Operación	Basural	REGIÓN de VALPARAÍSO
35	Relleno Sanitario Colihues La Yesca	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN DEL LIBERTADOR GENERAL BERNARDO O'HIGGINS
36	Relleno Sanitario Las Quilas	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN DEL LIBERTADOR GENERAL BERNARDO O'HIGGINS
37	Relleno Sanitario El Retamo	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN DEL MAULE
38	Relleno Sanitario Parque El Guanaco	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN DEL MAULE
39	Relleno Sanitario San Roque	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN DEL MAULE
40	Centro de Tratamiento Eco Maule	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN DEL MAULE
41	Relleno Sanitario Los Ángeles	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN DEL BIOBÍO
42	Relleno Sanitario Cemarç	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN DEL BIOBÍO
43	Vertedero Licura Mulchén	En Operación	Vertedero	REGIÓN DEL BIOBÍO
44	Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN DEL BIOBÍO
45	Relleno Villarrica	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de LA ARAUCANÍA
46	Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de LA ARAUCANÍA
47	Vertedero Los Nevados	En Operación	Vertedero	REGIÓN de LA ARAUCANÍA
48	Vertedero Municipal El Manzano	En Operación	Vertedero	REGIÓN de LA ARAUCANÍA
49	Vertedero de Cunco	En Operación	Vertedero	REGIÓN de LA ARAUCANÍA
50	Vertedero Municipal de Lonquimay	En Operación	Basural	REGIÓN de LA ARAUCANÍA
51	Relleno Sanitario de Coipue	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de LA ARAUCANÍA
52	Vertedero Municipal de Traiguén	En Operación	Basural	REGIÓN de LA ARAUCANÍA
53	Vertedero Fundo Traiguén	En Operación	Vertedero	REGIÓN de LA ARAUCANÍA
54	Vertedero de Ercilla	En Operación	Vertedero	REGIÓN de LA ARAUCANÍA
55	Vertedero Curaco	En Operación	Vertedero	REGIÓN de LOS LAGOS
56	Relleno Sanitario La Laja	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de LOS LAGOS
57	Vertedero Municipal Punahuel	En Operación	Basural	REGIÓN de LOS LAGOS
58	Vertedero Municipal de Quellón	En Operación	Basural	REGIÓN de LOS LAGOS
59	Vertedero Municipal Dalcahue	En Operación	Vertedero	REGIÓN de LOS LAGOS
60	Vertedero Municipal de Quemchi	En Operación	Basural	REGIÓN de LOS LAGOS
61	Vertedero Municipal de Hualaihué	En Operación	Basural	REGIÓN de LOS LAGOS

ID	Nombre Sitio	Estado Sitio	Tipo Sitio	Region
62	Vertedero Municipal de Chaitén-Basural Península Comau	En Operación	Basural	REGIÓN de LOS LAGOS
63	Vertedero Municipal de Quinchao	En Operación	Vertedero	REGIÓN de LOS LAGOS
64	Vertedero Municipal de Chonchi	En Operación	Vertedero	REGIÓN de LOS LAGOS
65	Vertedero Municipal Puqueldón	En Operación	Vertedero	REGIÓN de LOS LAGOS
66	Vertedero Municipal de Curaco de Vélez	En Operación	Vertedero	REGIÓN de LOS LAGOS
67	Basural de Palena	En Operación	Basural	REGIÓN de LOS LAGOS
68	Vertedero Municipal de Queilén	En Operación	Vertedero	REGIÓN de LOS LAGOS
69	Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufú	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de LOS LAGOS
70	Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemarc	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
71	Centro de Disposición Final de Residuos Sólidos de Aysén	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
72	Vertedero Puerto Bertrand	En Operación	Vertedero	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
73	Vertedero Municipal Cisnes	En Operación	Vertedero	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
74	Relleno Sanitario Puerto Ibáñez	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
75	Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
76	Relleno Sanitario Melinka	En Operación	Basural	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
77	Vertedero La Tapera	En Operación	Vertedero	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
78	Relleno Sanitario Villa O'Higgins	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
79	Vertedero Lago Verde	En Operación	Basural	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
80	Vertedero La Junta de Cisnes	En Operación	Vertedero	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
81	Vertedero Municipal Puerto Raúl Marín	En Operación	Vertedero	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
82	Vertedero Municipal Puerto Gaviota	En Operación	Basural	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
83	Vertedero Municipal Puerto Gala	En Operación	Basural	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
84	Centro de Gestión Residuos Sólidos Cochrane-Tortel	Por Operar	Relleno Sanitario	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
85	Vertedero Chile Chico	En Operación	Basural	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
86	Vertedero Mallín Grande	En Operación	Basural	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
87	Vertedero Puerto Guadal	En Operación	Basural	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
88	Relleno Sanitario Bahía Murta	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de AYSÉN DEL GENERAL CARLOS IBÁÑEZ DEL CAMPO
89	Vertedero Municipal Leñadura	En Operación	Vertedero	REGIÓN de MAGALLANES Y de LA ANTÁRTICA CHILENA
90	Vertedero Natales	En Operación	Basural	REGIÓN de MAGALLANES Y de LA ANTÁRTICA CHILENA
91	Vertedero Municipal de Porvenir	En Operación	Basural	REGIÓN de MAGALLANES Y de LA ANTÁRTICA CHILENA
92	Vertedero Municipal de Cabo de Hornos	En Operación	Basural	REGIÓN de MAGALLANES Y de LA ANTÁRTICA CHILENA
93	Vertedero Municipal de Primavera	En Operación	Basural	REGIÓN de MAGALLANES Y de LA ANTÁRTICA CHILENA
94	Vertedero Timaukel	En Operación	Basural	REGIÓN de MAGALLANES Y de LA ANTÁRTICA CHILENA
95	Relleno Sanitario Loma Los Colorados	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN METROPOLITANA de SANTIAGO
96	Relleno Sanitario Santa Marta	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN METROPOLITANA de SANTIAGO
97	Relleno Sanitario Santiago Poniente	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN METROPOLITANA de SANTIAGO
98	Vertedero Municipal de Popeta	En Operación	Vertedero	REGIÓN METROPOLITANA de SANTIAGO
99	Vertedero de Morrompulli	En Operación	Vertedero	REGIÓN de LOS RÍOS

ID	Nombre Sitio	Estado Sitio	Tipo Sitio	Region
100	Vertedero Quebrada Encantada	En Operación	Vertedero	REGIÓN de ARICA Y PARINACOTA
101	Relleno Sanitario Camarones	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN de ARICA Y PARINACOTA
102	Vertedero General Lagos	En Operación	Basural	REGIÓN de ARICA Y PARINACOTA
103	Relleno Sanitario Fundo Las Cruces	En Operación	Relleno Sanitario	REGIÓN DEL ÑUBLE
104	Construcción Relleno Sanitario para la Comuna de Pozo Almonte	Por Operar	Relleno Sanitario	REGIÓN de TARAPACÁ
105	Construcción Relleno Sanitario Comuna de Huará	Por Operar	Relleno Sanitario	REGIÓN de TARAPACÁ
106	Construcción Relleno Sanitario Camiña	Por Operar	Relleno Sanitario	REGIÓN de TARAPACÁ
107	Centro de Tratamiento Integral de RSD de Alto Hospicio	Por Operar	Relleno Sanitario	REGIÓN de TARAPACÁ
108	RS Comuna de Sierra Gorda	Por Operar	Relleno Sanitario	REGIÓN de ANTOFAGASTA
109	Construcción Relleno Sanitario Comuna de Chañaral	Por Operar	Relleno Sanitario	REGIÓN de ATACAMA
110	Relleno Sanitario Los Ríos	Por Operar	Relleno Sanitario	REGIÓN de LOS RÍOS

Fuente: Elaboración propia en base a SUBDERE (2024)

12.3 Límites de Emisión: Escenario Distributivo E1 - Reducción Proporcional Uniforme

Tabla 12-4 Límites Escenario Distributivo E1*

Nombre Relleno	Emision_2030 (ktCO2e)	Límite_2030 (ktCO2e)	Tasa_Reducccion _2030 (%)	Emision_2050 (ktCO2e)	Límite_2050 (ktCO2e)	Tasa_Reducccion _2050 (%)
Relleno Sanitario Loma Los Colorados	2796	1963	30%	3.684	1.366	63%
Relleno Sanitario Santa Marta	966	678	30%	1.323	491	63%
Relleno Sanitario Santiago Poniente	815	572	30%	1.145	425	63%
Relleno Sanitario El Molle	391	275	30%	673	250	63%
Relleno Sanitario Los Angeles	470	330	30%	550	204	63%
Relleno Sanitario Colihues La Yesca	431	302	30%	634	235	63%
Relleno Sanitario El Panul	307	216	30%	577	214	63%
Relleno Sanitario Cemarac	425	298	30%	500	185	63%
Relleno Sanitario El Retamo	346	243	30%	466	173	63%
Relleno Sanitario Fundo Las Cruces	310	218	30%	444	165	63%
Relleno Sanitario Parque El Guanaco	280	196	30%	392	146	63%
Relleno Sanitario San Pedro	224	157	30%	392	145	63%
Relleno Sanitario Chaqueta Blanca	137	96	30%	309	115	63%
Relleno Sanitario Santa Ines	102	71	30%	113	42	63%
Relleno Sanitario La Laja	273	192	30%	438	162	63%
Relleno Villarrica	198	139	30%	225	83	63%
Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte	146	103	30%	222	82	63%
CTI La Hormiga	99	69	30%	174	64	63%

Nombre Relleno	Emission_2030 (ktCO2e)	Límite_2030 (ktCO2e)	Tasa_Reduccion _2030 (%)	Emission_2050 (ktCO2e)	Límite_2050 (ktCO2e)	Tasa_Reduccion _2050 (%)
Relleno Sanitario El Chulo	77	54	30%	134	50	63%
Relleno Sanitario Cerro Colorado	57	40	30%	119	44	63%
Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemarc	45	32	30%	72	27	63%
Relleno Sanitario San Roque	44	31	30%	68	25	63%
Relleno Sanitario de Coipue	43	30	30%	60	22	63%
Relleno Sanitario Provincial del Huasco	33	24	30%	57	21	63%
Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue	30	21	30%	40	15	63%
Relleno Sanitario Las Quilas	24	17	30%	40	15	63%
Centro de Disposición Final de Residuos Solidos de Aysen	12	9	30%	24	9	63%
Relleno Sanitario Quebrada Ancha	10	7	30%	22	8	63%
Relleno Sanitario Cerro Montevideo	8	6	30%	14	5	63%
Relleno Sanitario San Pedro de Atacama	4	3	30%	9	3	63%
Relleno Sanitario Diego de Almagro	3	2	30%	7	3	63%
Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane	3	2	30%	5	2	63%
Relleno Sanitario Manual de Pica	2	2	30%	4	2	63%
Relleno Sanitario Puerto Ibañez	2	2	30%	4	1	63%
Centro de Tratamiento Eco Maule	3	2	30%	4	1	63%
Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufu	2	1	30%	2	0,8	63%
Relleno Sanitario Villa O'Higgins	0,4	0,3	30%	0,8	0,3	63%
Relleno Sanitario Manual de Ollagüe	0,1	0,1	30%	0,2	0,1	63%
Relleno Sanitario Camiña	0,2	0,2	30%	0,1	0	63%
Relleno Sanitario Camarones	0,3	0,2	30%	0,6	0,2	63%

* Cada escenario distributivo se separa en tres escenarios temporales

Fuente: Elaboración propia

12.4 Límites de Emisión: Escenario Distributivo E2 - Diferenciado por Tamaño del Relleno

Tabla 12-5 Límites Escenario Distributivo E2*

Nombre Relleno	Tamaño	Emission_2030 (ktCO2e)	Límite_2030 (ktCO2e)	Tasa_Reduccion _2030 (%)	Emission_2050 (ktCO2e)	Límite_2050 (ktCO2e)	Tasa_Reduccion _2050 (%)
Relleno Sanitario Loma Los Colorados	Grande	2.796	1.621	42%	3.684	847	77%
Relleno Sanitario Santa Marta	Grande	966	560	42%	1.323	304	77%
Relleno Sanitario Santiago Poniente	Grande	815	473	42%	1.145	263	77%
Relleno Sanitario El Molle	Grande	391	227	42%	673	155	77%
Relleno Sanitario Los Angeles	Grande	470	273	42%	550	127	77%

Nombre Relleno	Tamaño	Emision_2030 (ktCO2e)	Límite_2030 (ktCO2e)	Tasa_Reducccion _2030 (%)	Emision_2050 (ktCO2e)	Límite_2050 (ktCO2e)	Tasa_Reducccion _2050 (%)
Relleno Sanitario Colihues La Yesca	Mediano	431	366	15%	634	298	53%
Relleno Sanitario El Panul	Mediano	307	261	15%	577	271	53%
Relleno Sanitario Cemarc	Mediano	425	361	15%	500	235	53%
Relleno Sanitario El Retamo	Mediano	346	294	15%	466	219	53%
Relleno Sanitario Fundo Las Cruces	Mediano	310	263	15%	444	209	53%
Relleno Sanitario Parque El Guanaco	Mediano	280	238	15%	392	184	53%
Relleno Sanitario San Pedro	Mediano	224	191	15%	392	184	53%
Relleno Sanitario Chaqueta Blanca	Mediano	137	116	15%	309	145	53%
Relleno Sanitario Santa Ines	Mediano	102	86	15%	113	53	53%
Relleno Sanitario La Laja	Mediano	273	232	15%	438	206	53%
Relleno Villarrica	Pequeño	198	198	0%	225	189	16%
Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte	Pequeño	146	146	0%	222	186	16%
CTI La Hormiga	Pequeño	99	99	0%	174	146	16%
Relleno Sanitario El Chulo	Pequeño	77	77	0%	134	113	16%
Relleno Sanitario Cerro Colorado	Pequeño	57	57	0%	119	100	16%
Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemarc	Pequeño	45	45	0%	72	61	16%
Relleno Sanitario San Roque	Pequeño	44	44	0%	68	57	16%
Relleno Sanitario de Coipue	Pequeño	43	43	0%	60	50	16%
Relleno Sanitario Provincial del Huasco	Pequeño	33	33	0%	57	48	16%
Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue	Pequeño	30	30	0%	40	34	16%
Relleno Sanitario Las Quilas	Pequeño	24	24	0%	40	34	16%
Centro de Disposición Final de Residuos Solidos de Aysen	Pequeño	12	12	0%	24	20	16%
Relleno Sanitario Quebrada Ancha	Pequeño	10	10	0%	22	18	16%
Relleno Sanitario Cerro Montevideo	Pequeño	8	8	0%	14	12	16%
Relleno Sanitario San Pedro de Atacama	Pequeño	4	4	0%	9	7	16%
Relleno Sanitario Diego de Almagro	Pequeño	3	3	0%	7	6	16%
Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane	Pequeño	3	3	0%	5	4	16%
Relleno Sanitario Manual de Pica	Pequeño	2	2	0%	4	4	16%
Relleno Sanitario Puerto Ibañez	Pequeño	2	2	0%	4	3	16%
Centro de Tratamiento Eco Maule	Pequeño	3	3	0%	4	3	16%
Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufu	Pequeño	2	2	0%	2	2	16%
Relleno Sanitario Villa O'Higgins	Pequeño	0,4	0,4	0%	0,8	0,6	16%
Relleno Sanitario Manual de Ollagüe	Pequeño	0,1	0,1	0%	0,2	0,2	16%
Relleno Sanitario Camiña	Pequeño	0,2	0,2	0%	0,1	0,1	16%
Relleno Sanitario Camarones	Pequeño	0,3	0,3	0%	0,6	0,5	16%

* Cada escenario distributivo se separa en tres escenarios temporales

Fuente: Elaboración propia

12.5 Límites de Emisión: Escenario Distributivo E3 - Diferenciado por Zona Climática y Tamaño del Relleno

Tabla 12-6 Límites Escenario Distributivo E3*

Nombre Relleno	Tamaño	RM	K_Org	Emision_2030 (ktCO2e)	Límite_2030 (ktCO2e)	Tasa_Reducccion _2030 (%)	Emision_2050 (ktCO2e)	Límite_2050 (ktCO2e)	Tasa_Reducccion _2050 (%)
Relleno Sanitario Loma Los Colorados	Grande	RM	Seco	2.796	1.398	50%	3.684	774	79%
Relleno Sanitario Santa Marta	Grande	RM	Seco	966	483	50%	1.323	278	79%
Relleno Sanitario Santiago Poniente	Grande	RM	Seco	815	407	50%	1.145	241	79%
Relleno Sanitario El Molle	Grande	Otros	Seco	391	274	30%	673	202	70%
Relleno Sanitario Los Angeles	Grande	Otros	Humedo	470	282	40%	550	138	75%
Relleno Sanitario Colihues La Yesca	Mediano	NA	Seco	431	431	0%	634	355	44%
Relleno Sanitario El Panul	Mediano	NA	Seco	307	307	0%	577	323	44%
Relleno Sanitario Cemarc	Mediano	NA	Humedo	425	399	6%	500	215	57%
Relleno Sanitario El Retamo	Mediano	NA	Humedo	346	325	6%	466	200	57%
Relleno Sanitario Fundo Las Cruces	Mediano	NA	Humedo	310	291	6%	444	191	57%
Relleno Sanitario Parque El Guanaco	Mediano	NA	Humedo	280	263	6%	392	169	57%
Relleno Sanitario San Pedro	Mediano	NA	Humedo	224	211	6%	392	168	57%
Relleno Sanitario Chaqueta Blanca	Mediano	NA	Seco	137	137	0%	309	173	44%
Relleno Sanitario Santa Ines	Mediano	NA	Seco	102	102	0%	113	63	44%
Relleno Sanitario La Laja	Mediano	NA	Seco	273	273	0%	438	245	44%
Relleno Villarrica	Pequeño	NA	Humedo	198	198	0%	225	168	25%
Centro de Manejo de Residuo Malleco Norte	Pequeño	NA	Humedo	146	146	0%	222	166	25%
CTI La Hormiga	Pequeño	NA	Seco	99	99	0%	174	156	10%
Relleno Sanitario El Chulo	Pequeño	NA	Seco	77	77	0%	134	121	10%
Relleno Sanitario Cerro Colorado	Pequeño	NA	Seco	57	57	0%	119	107	10%
Centro de Manejo de Residuos Coyhaique - Cemarc	Pequeño	NA	Humedo	45	45	0%	72	54	25%
Relleno Sanitario San Roque	Pequeño	NA	Humedo	44	44	0%	68	51	25%
Relleno Sanitario de Coipue	Pequeño	NA	Humedo	43	43	0%	60	45	25%
Relleno Sanitario Provincial del Huasco	Pequeño	NA	Seco	33	33	0%	57	51	10%
Relleno Sanitario Intercomunal Arauco-Curanilahue	Pequeño	NA	Seco	30	30	0%	40	36	10%
Relleno Sanitario Las Quilas	Pequeño	NA	Humedo	24	24	0%	40	30	25%
C. de Disposición Final de Residuos Solidos de Aysen	Pequeño	NA	Humedo	12	12	0%	24	18	25%
Relleno Sanitario Quebrada Ancha	Pequeño	NA	Seco	10	10	0%	22	19	10%
Relleno Sanitario Cerro Montevideo	Pequeño	NA	Seco	8	8	0%	14	13	10%

Nombre Relleno	Tamaño	RM	K_Org	Emission_2030 (ktCO2e)	Límite_2030 (ktCO2e)	Tasa_Reducccion _2030 (%)	Emission_2050 (ktCO2e)	Límite_2050 (ktCO2e)	Tasa_Reducccion _2050 (%)
Relleno Sanitario San Pedro de Atacama	Pequeño	NA	Seco	4	4	0%	9	8	10%
Relleno Sanitario Diego de Almagro	Pequeño	NA	Seco	3	3	0%	7	7	10%
Relleno Sanitario Municipalidad de Cochrane	Pequeño	NA	Humedo	3	3	0%	5	3	25%
Relleno Sanitario Manual de Pica	Pequeño	NA	Seco	2	2	0%	4	4	10%
Relleno Sanitario Puerto Ibañez	Pequeño	NA	Humedo	2	2	0%	4	3	25%
Centro de Tratamiento Eco Maule	Pequeño	NA	Humedo	3	3	0%	4	3	25%
Centro de Tratamiento Integral de RSD de Futaleufu	Pequeño	NA	Humedo	2	2	0%	2	2	25%
Relleno Sanitario Villa O'Higgins	Pequeño	NA	Humedo	0,4	0,4	0%	0,8	0,6	25%
Relleno Sanitario Manual de Ollagüe	Pequeño	NA	Seco	0,1	0,1	0%	0,2	0,2	10%
Relleno Sanitario Camiña	Pequeño	NA	Seco	0,2	0,2	0%	0,1	0,1	10%
Relleno Sanitario Camarones	Pequeño	NA	Seco	0,3	0,3	0%	0,6	0,5	10%

* Cada escenario distributivo se separa en tres escenarios temporales

Fuente: Elaboración propia

12.6 Calibración de parámetros a y b de costos por tecnología

12.6.1 Metodología

La metodología utilizada corresponde a una calibración simple de la ecuación general de costos de inversión. La Ecuación 9-1 estima el CAPEX de cada medida o tecnología en función de la mitigación anual esperada, incorporando un coeficiente de escala y un factor de escala específico para cada combinación tecnológica. En términos generales, la relación se expresa en la Ecuación 9-1, donde el CAPEX se mide en millones de dólares estadounidenses (USD M), la mitigación anual en $\text{ktCO}_2\text{eq/año}$, el coeficiente de escala representa el costo asociado por unidad de mitigación ($\text{USD M/ktCO}_2\text{eq/año}$), y el factor de escala corresponde a un parámetro adimensional que captura economías o deseconomías de escala según la tecnología evaluada.

Para estimar los parámetros de la ecuación general de costos, la relación original fue transformada a una forma lineal mediante la aplicación del logaritmo natural, tal como se presenta en la Ecuación 9-2. Esta transformación permite expresar la relación entre CAPEX y mitigación anual como una regresión lineal, donde la variable dependiente corresponde a $\ln(\text{CAPEX})$ y la variable independiente a $\ln(\text{Mitigación anual})$.

Para la obtención de CAPEX y reducciones anuales para alimentar la calibración se usaron estimaciones de costos con la calculadora LFG-Cost asociado con reducciones estimadas con el modelo propio de emisiones, datos de proyectos del MDL que en su mayoría entrega datos de costos de inversión y las reducciones medias asociadas. También se utilizan otras fuentes como los artículos científicos e informes de investigación, sobre modelos construidos de las tecnologías y evaluados económicamente.

Se extrajeron los valores de CAPEX y mitigación anual, y posteriormente se aplicó $\ln(x)$ a ambas variables. Luego, estos valores transformados fueron graficados para cada combinación tecnológica, permitiendo estimar una ecuación de tendencia mediante regresión lineal. En esta forma log-lineal, la pendiente de la regresión corresponde al factor de escala, mientras que el intercepto permite obtener el coeficiente de escala al aplicar la transformación inversa exponencial.

12.6.2 Captura activa

12.6.2.1 Captura activa con antorcha

Para la calibración de la captura activa con antorcha se recopilieron 15 datos en total, 6 datos provenientes de la estimación de costos del LFG-Cost modificado a la realidad nacional (precio de compra y venta de la energía eléctrica) con sus respectivas estimaciones de reducción de emisiones usando el modelo propio de emisiones con factores de reducción propios del programa también modificados a la realidad nacional (tasas de captura menores a las

recomendadas por la EPA); y 9 datos de proyectos del MDL en los cuales se encuentran costos de inversión y las reducciones medias anuales.

Los 6 datos evaluados en el LFG-Cost son estimaciones modelo de tamaños de relleno: para rellenos que reciben 60kt residuos/año, 120kt residuos/año, 235kt residuos/año, 350kt residuos/año, 500kt residuos/año y 800kt residuos/año.

Los 9 datos de proyectos de MDL se consideraron los siguientes: Agrupación 1, Agrupación 2, SDF Coronel, SDF Cosmito, SDF El Molle, SDF El Panul, SDF Fundo Las Cruces, SDF Lepanto y SDF Santa Marta (en su primer proceso de créditos evalúa solo quema por eso se considera en este apartado y no en valorización).

Luego se hizo un proceso de revisión de los proyectos del MDL para ver si eran representativos sus valores o no. Después de esta revisión se descartaron 8 de los 9 proyectos, y solo quedando el de Santa Marta, esto debido a que algunos proyectos realizaban estimación de reducción para sitios de disposición final ya cerrados en los que aumentaba de gran manera la cantidad de pozos, lo que hace que el CAPEX aumente en sobremedida respecto a sus reducciones, que ya eran bajas por ser un sitio con su vida útil ya terminada, incluso siendo en algunos casos son vertederos cerrados, sitios que cuentan con otra capacidad de generación de metano. Otros también se descartaron debido a que el proyecto total considera la extracción y quema no de un solo sitio sino la combinación de estos (2 o 3 sitios) lo que también altera el costo de inversión. Todos estos criterios para eliminar estos puntos de MDL es que no están alineados a la estimación que se hace en el LFG-Cost, que es evaluar un proyecto de reducción de emisiones dentro de la vida útil del propio relleno sanitario y con características propias de un relleno sanitario y no de un vertedero.

Como resultado de este proceso de revisión es que para la curva de calibración se consideran los 6 puntos del LFG-Cost y 1 punto de MDL (Santa Marta) que sigue la lógica de proyecto evaluado, obteniendo la Figura 12-1. Se observa un $b = 0,818$ y un $\ln(a) = -3,58$, alcanzando un $R^2 = 99,24\%$.

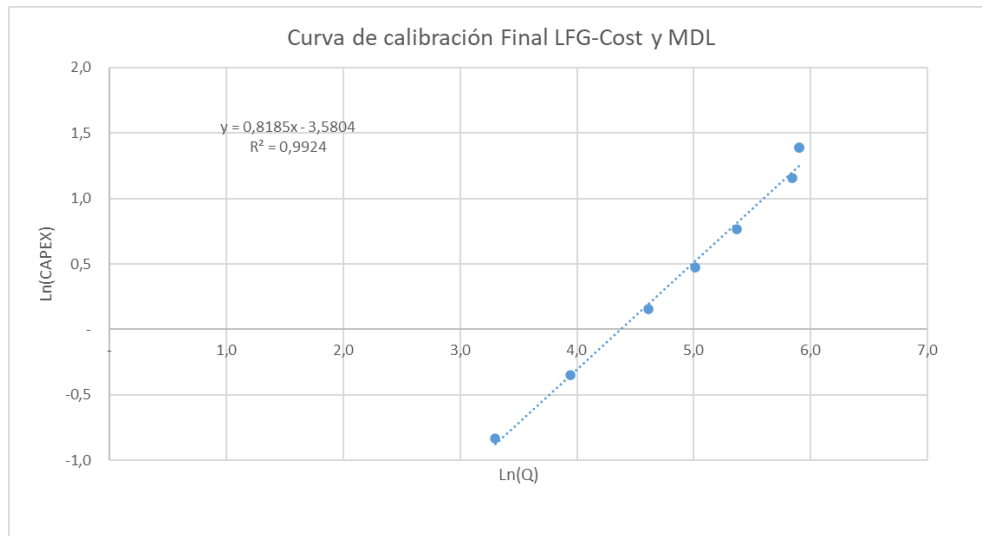


Figura 12-1 Curva de calibración captura activa con antorcha

Fuente: Elaboración propia

12.6.2.2 Captura activa con valorización

Para la calibración de la captura activa con valorización (eléctrica) se consideraron 30 datos o puntos para elaborar la curva, 24 datos son evaluaciones realizadas por el programa LFG-Cost para rellenos: relleno que reciben 10 kt de residuos/año, 30 kt de residuos/año, 60 kt de residuos/año, 120 kt de residuos/año, 235 kt de residuos/año, 350 kt de residuos/año, 500 kt de residuos/año y 800 kt de residuos/año. Para cada tamaño de relleno se evaluó tecnología de Motor Grande, Motor Chico y Microturbina.

También se revisaron 6 proyectos del MDL, SDF Copiulemu, SDF El Empalme, SDF El Guanaco, SDF El Retamo, SDF Loma los Colorados y SDF Los Ángeles.

Para este apartado también se hizo una revisión de los proyectos de valorización del MDL y también se realizó una limpieza de los proyectos evaluados por el LFG-Cost. Por el lado de los proyectos del MDL se decidió no considerar los proyectos de SDF Copiulemu y SDF El Empalme por ser sitio que tienen valorización térmica y no eléctrica, por lo que no van acorde a los proyectos evaluados en el LFG-Cost, que son de valorización eléctrica.

Por el lado de la revisión de los proyectos evaluados por el LFG-Cost, se descartan algunos debido a que para algunas tecnologías se recomiendan³³ ciertas potencias que no se logran con algunos tipos de rellenos (para tecnologías Motor Grande idealmente que se logre una potencia instalada sobre 800 kW premisa que con rellenos pequeños no se puede lograr), para Motores Chicos se recomienda potencia instalada bajo 800 kW y Microturbina bajo 1MW.

³³ Es una recomendación que hace el propio programa, al igual que para Motor Chico y Microturbina.

Como resultado de esta revisión solo se consideran 14 proyectos del LFG-Cost y 4 proyectos del MDL, resultando en la curva de calibración presentada en la Figura 12-2. Se observa un $b = 0,677$ y un $\ln(a) = -0,79$, alcanzando un $R^2 = 93,48\%$.

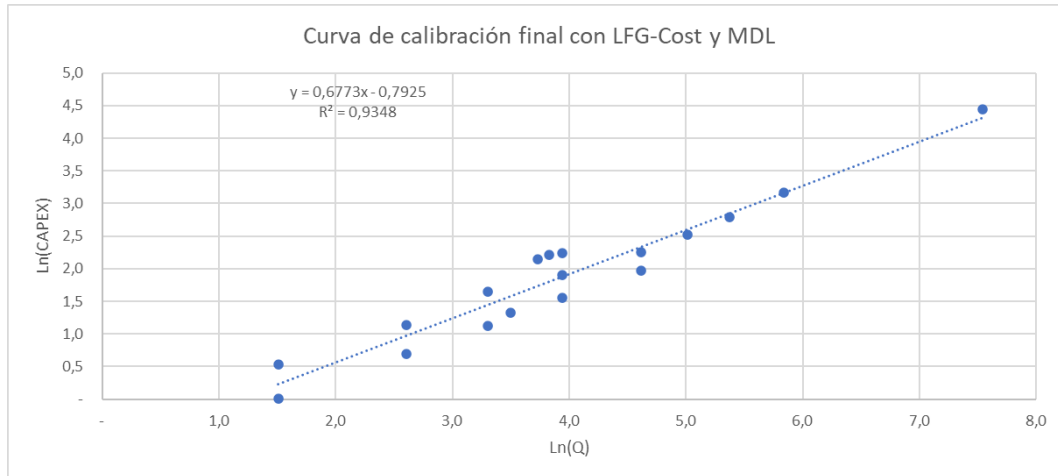


Figura 12-2 Curva de calibración captura activa con valorización

Fuente: Elaboración propia

12.6.3 Captura pasiva

Para la calibración de la captura pasiva se utilizaron los estudios (Prado et al., 2009), (NSW Government, 2010) y (Melse & Van Der Werf, 2005), de los cuales se recuperan 8 datos en total, con sus respectivas estimaciones de reducción de emisiones y sus CAPEX. Desde el estudio de (Prado et al., 2009) se obtienen valores asociados a 400 m³ y 20.000 m³/h flujo de biogás, aplicados a residuos agrícolas, estiércol de cerdo, carbón activado, entre otras. Mientras que desde (Melse & Van Der Werf, 2005) se obtienen tres iteraciones al varias la mitigación y sus metros cúbicos.

Como resultado de esta revisión solo se consideran los 8 valores identificamos, resultando en la curva de calibración presentada en la Figura 12-3. Se observa un $b = 0,211$ y un $\ln(a) = -2,86$, alcanzando un $R^2 = 60,2\%$.

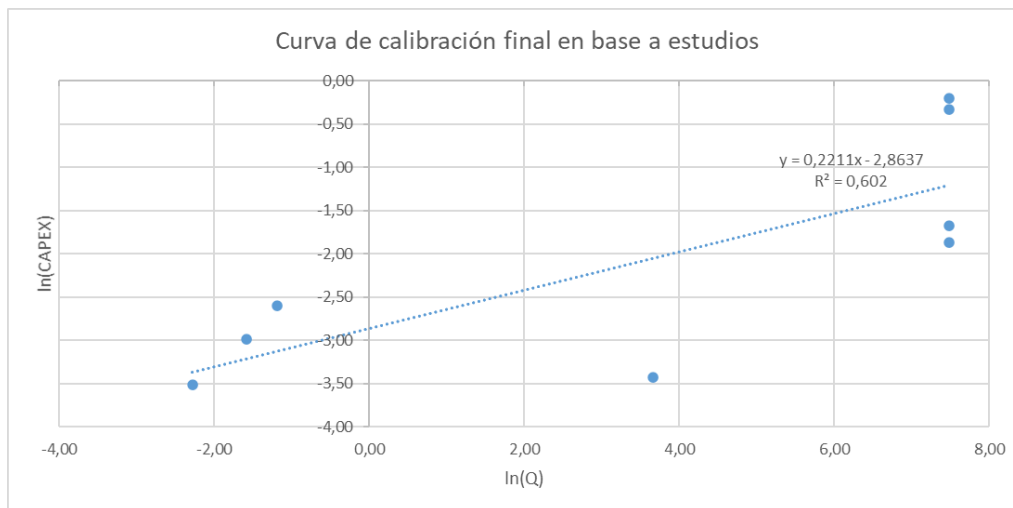


Figura 12-3 Curva de calibración captura pasiva

Fuente: Elaboración propia

12.6.4 Resumen parámetros de calibración

Por último, la Tabla 12-7 presenta un resumen de los parámetros de calibración obtenidos para las distintas cadenas tecnológicas, tanto activas como pasivas. Los distintos datos identificados, sus correcciones y resultados obtenidos se encuentra disponible en el anexo digital “NEMetano-Factores_Calibracion_Costos.xlsx”.

Tabla 12-7 Resumen parámetros calibración

Tecnología	a	b	R ²	OPEX (%/año)	Vida Útil (año)	Incremento Biocobertura
Pasivo + Biocobertura	0,057	0,221	60%	18%	20	0,11
Pasivo + Biofiltro	0,057	0,221	60%	18%	20	-
Pasivo + Biofiltro + Biocobertura	0,057	0,221	60%	18%	20	0,11
Activo + Antorcha	0,028	0,818	99%	13%	20	-
Activo + Valorizacion	0,453	0,677	93%	3%	20	-
Activo + Antorcha + Biocobertura	0,028	0,818	99%	13%	20	0,154
Activo + Valorizacion + Biocobertura	0,453	0,677	93%	3%	20	0,154

Fuente: Elaboración propia en base a “NEMetano-Factores_Calibracion_Costos.xlsx”

De esta manera, la ecuación de tendencia estimada para cada grupo tecnológico permite calibrar los parámetros específicos de la ecuación general de costos. Los resultados de esta calibración se presentan en Sección 9.2.1.3, entre la Ecuación 9-3 a la Ecuación 9-12, donde se expresan respecto al coeficiente de escala y el factor de escala.