

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA  
MARÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**VALPARAÍSO - CHILE**



**“IMPACTO AMBIENTAL DE UNA PLANTA  
PROCESADORA DE RESIDUOS SÓLIDOS  
URBANOS CON VALORIZACIÓN  
ENERGÉTICA”**

**DANIEL CRISTÓBAL ESCALA JARA**

**TRABAJO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL**

**PROFESOR GUÍA:**

**RAFAEL MENA YANSSEN**

**PROFESOR CORREFERENTE:**

**LUIS GUZMÁN BONET**

**OCTUBRE-2021**

## Resumen

Chile ha adquirido compromisos internacionales en pos de mejorar el actual tratamiento de residuos y mitigar acciones que conlleven a una alta generación de los gases de efecto invernadero (GEI). Para esto se ha promulgado la ley 20.920, la cual se relaciona con los objetivos planteados en la “Política nacional de residuos 2018-2030”.

En este informe se estimó que la disposición final de residuos aporta significativamente a las emisiones de GEI a nivel nacional (incluyendo las absorciones de CO<sub>2</sub> por parte del sector “Usos de la tierra, cambios en el uso de la tierra y silvicultura” (UTCUTS), siendo su principal origen el relleno sanitario.

El objetivo principal de este informe es identificar las diferencias a nivel de emisiones entre el tratamiento de residuos sólidos urbanos por medio de una planta de tratamiento de RSU con valorización energética y el sistema más usado actualmente en Chile (rellenos sanitarios). Además, se propone para la planta de tratamiento de RSU con valorización energética una capacidad nominal proporcional al porcentaje de RSU que no podrían ser valorizados mediante reutilización o reciclaje.

Para la estimación de compuestos proveniente de la planta valorizadora se utilizaron los datos proporcionados por la empresa “WTE Araucanía” en su estudio de impacto ambiental (esta empresa ha ingresado un proyecto que se encuentra en proceso de calificación en el SEA) y también se utilizó la información contenida en el informe “Valorización energética de residuos urbanos en España y Andorra: huella de carbono y comparativa con depósito en vertedero” (G-Advisory, 2021) encargado por la “Asociación de Empresas de Valorización Energética de Residuos Urbanos” (AEVERSU) para estimar la huella de carbono. La obtención de datos para la estimación de emisiones proveniente de relleno sanitario (RS) fue una extrapolación basada en el estudio “Estimación de los factores de emisión”. (Instituto de investigaciones electricas, 2007)

Dicha comparación arrojó resultados que favorecen al tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) mediante plantas valorizadoras con recuperación energética, se estimó que la elección de este método podría representar una disminución en la emisión de GEI.

Las plantas valorizadoras energéticamente emiten gases de combustión que contienen compuestos tóxicos al medio ambiente, si estos gases pasan por un tratamiento adecuado no representan ningún peligro y cumplen con la normativa europea para la concentración de emisión de dichos compuestos.

Finalmente se propuso una capacidad nominal para una potencial planta, identificando el porcentaje de residuos que por su materialidad no podrían ser valorizables mediante el uso de otras técnicas.

# Contenido

|   |    |
|---|----|
| Resumen.....  | 2  |
| 1. Introducción .....   | 6  |
| 2. Objetivos .....  | 7  |
| 2.1. Objetivo general .....   | 7  |
| 2.2. Objetivos específicos.....   | 7  |
| 3. Antecedentes .....   | 8  |
| 3.1. Manejo de los desechos sólidos urbanos.....  | 8  |
| 3.1.1. Historia.....  | 8  |
| 3.1.2. Técnicas actualmente utilizadas para el manejo de RSU en Chile.....                    | 10 |
| 3.2. Entorno nacional .....   | 15 |
| 3.2.1. Caracterización de RSU en Chile.....   | 16 |
| 3.2.2. Política de gobierno residuos .....  | 19 |
| 3.2.3. Situación actual para la disposición de RSU V región.....                              | 20 |
| 3.3. Consecuencias del actual manejo de RSU .....   | 22 |
| 3.3.1. Contaminación atmosférica.....   | 22 |
| 3.3.2. Contaminación visual .....   | 27 |
| 3.3.3. Contaminación de subsuelos .....   | 27 |
| 3.3.4. Propagación de enfermedades y vectores.....  | 28 |
| 4. Plantas incineradoras de residuos sólidos urbanos.....                                     | 29 |
| 4.1. Tecnologías existentes.....  | 29 |
| 4.1.1. Incineradores de parrilla.....   | 30 |
| 4.1.2. Lechos fluidizados.....  | 31 |
| 4.1.3. Pirólisis y gasificación .....   | 32 |
| 5. Posibles plantas incineradoras por implementar en Chile.....                               | 34 |
| 5.1. WTE Araucanía.....   | 34 |
| 5.1.1. Información general .....  | 34 |
| 5.1.2. Descripción de procesos.....   | 35 |
| 5.1.3. Concentración de emisiones a la atmosfera durante condiciones de operación normal..... | 52 |
| 6. Emisiones WTE vs Rellenos sanitarios.....  | 55 |
| 6.1. Emisiones de compuestos.....   | 55 |
| 6.1.1. Planta incineradora .....  | 55 |
| 6.1.2. Relleno sanitario.....   | 56 |
| 6.2. Emisiones de GEI.....  | 56 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 6.2.1. | Emisión CO2 equivalente RS .....  | 57 |
| 6.2.2. | Emisión CO2 equivalente planta incineradora con valorización energética ..... | 58 |
| 6.3.   | Comparación de emisiones.....   | 60 |
| 7.     | Elección incineradora para tratamiento de RSU Chile.....                      | 61 |
| 7.1.   | Capacidad nominal .....   | 61 |
| 7.2.   | CO2 equivalente emitido vs electricidad generada .....                        | 63 |
| 8.     | Conclusiones .....  | 64 |
| 9.     | Bibliografía .....  | 67 |

## Índice de Figuras

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 3.1  | Gráfico número de instalaciones de eliminación (Comision nacional del medio ambiente (CONAMA), 2010, pág. 56) ..... | 9  |
| Figura 3.2  | Diagrama funcionamiento de un relleno sanitario (Ceamse).....   | 11 |
| Figura 3.3  | Diagrama Planta de compostaje (Gencat).....   | 13 |
| Figura 3.4  | Gráfico porcentaje de Residuos no peligrosos valorizados Chile 2015-2018. (MMA, 2020) .....                         | 14 |
| Figura 3.5  | Gráfico Residuos valorizados 2018 por categoría. (MMA, 2020).....   | 15 |
| Figura 3.6  | Gráfico generación de residuos por origen y región (MMA, 2019, pág. 69).....  | 16 |
| Figura 3.7  | Gráfico porcentajes de generación RSU por región (Elaboración propia) .....   | 17 |
| Figura 3.8  | Gráfico composición de RSD en la RM (Elaboración propia) .....  | 18 |
| Figura 3.9  | Fotografía Contenedores de colores para distintos tipos de residuos (Recemsa) .....                                 | 18 |
| Figura 3.10 | Gráfico Porcentaje de cobertura SDF V región (elaboración propia).....  | 22 |
| Figura 3.11 | Gráfico ktCO2eq por sector, 2016. (Elaboración propia).....   | 23 |
| Figura 3.12 | Gráfico Balance general GEI 2016. (Elaboración propia).....   | 24 |
| Figura 3.13 | Gráfico Porcentaje de emisiones CH4 por sector, año 2016. (Elaboración propia).....                                 | 25 |
| Figura 3.14 | Gráfico comparación aportes GEI. (Elaboración propia) .....   | 26 |
| Figura 3.15 | Imagen infiltración de lixiviados. (Desatascoscubacas) .....  | 28 |
| Figura 4.1  | Diagrama funcionamiento de parrillas oscilantes. (López Camacho, 2018, pág. 36).....                                | 30 |
| Figura 4.2  | Diagrama distintos sistemas de parrilla según avance. (MMA y medio rural marino , 2011, pág. 45).....               | 31 |
| Figura 4.3  | Diagrama componentes principales de un lecho fluidizado (MMA y medio rural marino , 2011, pág. 45).....             | 32 |
| Figura 5.1  | Imagen localización potencial planta WTE Araucanía (Bioaqua, 2017, págs. 8, C, 1)...                                | 35 |
| Figura 5.2  | Diagrama Zonas clasificadas por proceso en planta WTE. (Bioaqua, 2017, págs. 4, C, 4) .....                         | 36 |
| Figura 5.3  | Diagrama Zona de recepción planta WTE Araucanía, (Bioaqua, 2017, págs. 9, C, 4)....                                 | 37 |
| Figura 5.4  | Foto Referencial zona de recepción WTE. (Bioaqua, 2017, págs. 14, C2) .....   | 38 |
| Figura 5.5  | Diagrama Foso de recepción en planta WTE España. (Bioaqua, 2017, págs. 16, C2) ....                                 | 39 |
| Figura 5.6  | Foto Transporte de residuos en foso de recepción WTE China. (Bioaqua, 2017, págs. 17, C2).....                      | 40 |
| Figura 5.7  | Diagrama Ubicación (en rojo) PTR. (Bioaqua, 2017, págs. 18, C2) .....   | 41 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.8 Diagrama horno de parrilla tipo. (Neuwahl, Cusano, Gómez Benavides, Holbrook, & Roudier, 2019, pág. 37)..... | 43 |
| Figura 5.9 Diagrama Paso de gases de combustión por caldera acuotubular. (Bioaqua, 2017, págs. 22, C4).....             | 44 |
| Figura 5.10 Diagrama Ciclo Rankine en planta WTE Araucanía. (Bioaqua, 2017, págs. 21, C4) ...                           | 45 |
| Figura 5.11 Imagen representación gráfica “acción de carbón activado”. (Bioaqua, 2017, págs. 29, C4).....               | 46 |
| Figura 5.12 Fotografía Molécula de carbón activado en polvo (PAC). (LDXsolutions) .....                                 | 46 |
| Figura 5.13 Diagrama Producto “Scrubber”. (The Spray Nozzle people) .....   | 47 |
| Figura 5.14 Diagrama Baño de agua para ceniza de fondo. (Bioaqua, 2017, págs. 38, C4) .....                             | 49 |
| Figura 5.15 Diagrama funcionamiento de Bag filter, (REDECAM productos).....   | 50 |
| Figura 5.16 Diagrama Sello SPS. (REDECAM productos).....  | 51 |
| Figura 5.17 Diagrama sistema limpieza Bi-jet. (REDECAM productos).....  | 51 |
| Figura 5.18 Gráfico Concentración compuestos presentes en GC 1. (Elaboración propia).....                               | 52 |
| Figura 5.19 Gráfico Concentración compuestos presentes en GC 2. (Elaboración propia).....                               | 53 |
| Figura 5.20 Gráfico Concentración dioxinas y furanos presentes en GC 1. (Elaboración propia) ...                        | 53 |
| Figura 7.1 Pirámide invertida de la jerarquización en el tratamiento de residuos. (MMA).....                            | 62 |
| Figura 7.2 Gráfico Posible tratamiento de RSU en RM. (Elaboración propia).....  | 63 |
| Figura 8.1 Gráfico Tratamiento de residuos según tipo de recuperación y disposición. (Eurostat, 2018) .....             | 66 |

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 3.1 Síntesis nacional de RSU generados y población atendida considerando población flotante. (SUBDERE, 2019, pág. 19) .....               | 15 |
| Tabla 3.2 Sitios de disposición final en la V región (Elaboración propia).....  | 21 |
| Tabla 3.3 Emisiones de GEI (kt CO <sub>2</sub> eq por sector, serie 1990-2016. (MMA, 2018).....   | 23 |
| Tabla 3.4 Emisiones de CH <sub>4</sub> (kt CO <sub>2</sub> eq) por sector, serie 1990-2016. (MMA, 2018, pág. 76) .....                          | 25 |
| Tabla 3.5 Emisiones de GEI sector Residuos (kt CO <sub>2</sub> eq) por categoría, serie 1990-2016. (MMA, 2018, pág. 461).....                   | 26 |
| Tabla 4.1 Resumen de las técnicas de tratamiento térmico para los principales tipos de residuos (MMA y medio rural marino , 2011, pág. 41)..... | 29 |
| Tabla 5.1 Descripción de actividades por zona en planta WTE Araucanía. (Elaboración propia) ...   | 36 |
| Tabla 5.2 Concentraciones de compuestos presentes en GCT. (Bioaqua, 2017, págs. 34, C4) .....   | 54 |
| Tabla 6.1 Emisión de compuestos modelada en base a concentración UE. (Romero & Rubbio, 2019) .....  | 55 |
| Tabla 6.2 Características del biogás. (Paredes Rosario & Baca López, 2005, pág. 4).....   | 56 |
| Tabla 6.3 PCG para GEI. (MMA, 2018, pág. 59) .....  | 57 |
| Tabla 6.4 Emisiones totales 2016 por DRS. (Elaboración propia).....   | 58 |
| Tabla 6.5 Factor de emisiones directas. (Elaboración propia) .....  | 59 |
| Tabla 6.6 Factor emisiones evitadas. (Elaboración propia).....  | 59 |
| Tabla 6.7 Emisiones de GEI por tecnología. (Elaboración propia).....  | 60 |
| Tabla 7.1 Resumen valorización energética España. (Elaboración propia) .....  | 64 |

# 1. Introducción

El gran desafío que presenta el correcto manejo de los RSU es qué hacer con estos para minimizar el impacto ambiental que generan las técnicas actuales, para ello se busca un equilibrio entre las posibilidades ideales y las condiciones culturales que permiten el desarrollo de estas. Oníricamente hablando la generación de basura debe ser 0 pero culturalmente no estamos preparados o “educados” para llevar esto a cabo. Se ha escuchado hablar de no utilizar plásticos de un solo uso, pero en muchos casos no es posible encontrar un sustituto que cumpla con las virtudes sanitarias y el bajo costo de estos envases (dependiendo de la aplicación). Cabe mencionar que se están endureciendo las normas y controles con respecto a los residuos, estableciendo metas de reciclaje y valorización, además de introducir instrumentos de gestión ambiental como la responsabilidad extendida del productor (REP).

Existe una sinergia de la cual cada vez más empresas se van haciendo parte con la idea de ofrecer productos “verdes” en el mercado.

Retomando la problemática podemos dividir en dos grandes categorías la disposición de residuos:

- Disposición de residuos orgánicos
- Disposición de residuos inorgánicos

La disposición de residuos orgánicos en ambientes con baja concentración de oxígeno genera GEI, a su vez la disposición de residuos inorgánicos, plásticos en su mayoría (en residuos sólidos urbanos), debido a sus características es muy largo el proceso de degradación, de esta manera la acumulación masiva de este material crece y crece con los años. Durante el proceso de degradación de los plásticos se genera una variedad de sustancias químicas, las cuales terminan en el medio ambiente y muchas veces debido a la misma degradación, se forman partículas de micro plástico que son fácilmente digeridas por los animales pudiendo estos morir debido a la obstrucción de sus intestinos o vías respiratorias. También las toxinas liberadas por la degradación del plástico son absorbidas por los animales, llegando a todos los participantes de la cadena trófica incluso a nosotros. Por otro lado, el plástico al ser degradado en el ambiente aporta a la generación de GEI (Royer, Ferrón, Wilson, & Karl, 2018).

Por esta razón es imperante buscar una solución rápida y sostenible que mitigue las consecuencias ambientales de la disposición de RSU, mientras se trabaja en educar a la población y cumplir las metas de valorización y reutilización. Actualmente existen proyectos orientados al correcto manejo de los residuos, dentro de estos encontramos las plantas “Waste to energy” (WTE). Este tipo de plantas propone aprovechar los residuos por su poder calorífico, pudiendo generar energía eléctrica

o térmica como producto, el principal atractivo de estas plantas son las bajas emisiones como resultado de la combustión, ya que se utiliza una serie de filtros y sistemas de captación contra los componentes tóxicos. Es más, existen muchas plantas WTE a lo largo del mundo ubicadas en los centros urbanos de cada país y cumpliendo con estrictas normativas de emisiones. Gracias al reducido espacio que ocupan y la baja peligrosidad, además de poder acoplarse de manera armoniosa a la ciudad, es que estas plantas son aceptadas por un alto porcentaje de la sociedad. Al comparar con los rellenos sanitarios (RS) que son el principal sitio de disposición final (SDF) que se ocupa actualmente en Chile, se observa una ventaja importante, ya que los RS no podrían estar ubicados cerca de una población, emiten olores a su alrededor y generalmente no se realiza una labor exhaustiva en cuanto a eliminación de vectores, sin mencionar que una falla en la membrana protectora inferior podría contaminar millones de litros de agua potable.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivo general

Analizar el impacto medio ambiental de una planta procesadora de residuos sólidos urbanos con valorización energética enfocándose en el aporte a los GEI. Analizando el impacto ambiental y considerando como línea base el actual aporte a estos mismos de los actuales rellenos sanitarios.

### 2.2. Objetivos específicos

- Justificar la tecnología “adecuada” para la incineración de RSU en el contexto nacional.
- Estimar la capacidad nominal adecuada para una planta procesadora de RSU en Chile.
- Estimar el aporte del sector Residuos a las emisiones de GEI.
- Establecer relación entre la energía generada y las emisiones de GEI.
- Comparar la emisión de GEI producidos en vertederos vs los producidos en una planta incineradora de RSU.
- Generar conclusiones.

## 3. Antecedentes

### 3.1. Manejo de los desechos sólidos urbanos

La disposición de residuos sólidos urbanos es una problemática que lleva muchos años acompañando a las civilizaciones organizadas, pero no es hasta la década del 40 en que se empieza a controlar esta actividad.

#### 3.1.1. Historia

A principios de 1900 existían 6 métodos más comúnmente utilizados para la disposición final de los desechos sólidos, estos eran:

- Arrojar al agua
- Arrojar al suelo
- Enterrar con arado en el suelo
- Alimento para porcinos
- Reducción
- Incineración

Estos métodos aceptados en el pasado conllevaron distintos problemas para la población, algunos de ellos: aparición de moscas, ratas y extensión de enfermedades como la triquinosis entre otros.

En 1940 en la ciudad de Nueva York se implementó el método de relleno sanitario, el cual debía ser un modelo para implementar en comunidades de todos tamaños, esto no fue implementado de la manera correcta por las municipalidades, a pesar de esto se siguió trabajando y realizando campañas más agresivas con la finalidad de acabar con los vertederos convencionales. En 1965 el congreso de los Estados Unidos realizó la siguiente declaración:

(...) Que los métodos ineficaces e inadecuados de disposición de desechos sólidos resultan en paisajes arruinados, crean serios riesgos a la salud pública, incluyendo polución del aire y los recursos hídricos, peligro de accidentes y aumento de enfermedades transmitidas por roedores e insectos, tienen un efecto adverso sobre los valores de la tierra, crean molestias públicas, dicho de otra manera interfieren con la vida y desarrollo de la comunidad [...]. Que la falla o incapacidad para recuperar y reusar tales materiales económicamente resulta en desperdicio innecesario y deterioro de los recursos naturales. (Little, 1972)

Entre los años 1940 y 1970 surge la llamada “Gestión iluminada” la cual principalmente se centra en lo económico controlando la generación, almacenamiento, recolección, transferencia y transporte, procesamiento y disposición final haciendo énfasis en los efectos ambientales y en la salud de la población (paráfrasis). (Vesco, 2006)

Posteriormente en la década del 70 se propone darles un uso a los residuos generados o explorar las opciones de reciclaje, disminuyendo de esta manera el volumen en los rellenos y la generación. Esta propuesta termino por sentar las bases de lo que se experimentó en la década del 90, específicamente en la Cumbre de Río en el 92 hay todo un capítulo del “Manejo ecológicamente racional de los residuos sólidos”, los postulados señalados en este capítulo sirvieron para concluir en la Cumbre de Johannesburgo 2002 los siguientes puntos de interés:

- Minimización de la generación.
- Maximización de la reutilización, el reciclado y su comerciabilidad.
- Ampliación del alcance de los servicios relacionados con los residuos.
- Tecnologías de eliminación, tratamiento y disposición final ambientalmente adecuadas, que incluyan recuperación de energía.

Con respecto a lo que ha acontecido en las últimas décadas en nuestro país, lo más destacable es que para el año 2005 el 60% de los residuos sólidos urbanos terminaban en rellenos sanitarios, no así en 1995 el 100% de los residuos iban a vertederos y basurales, de los cuales muchos no contaban con autorización, pudiendo cumplir o no con las condiciones sanitarias adecuadas. (MMA, 2018)

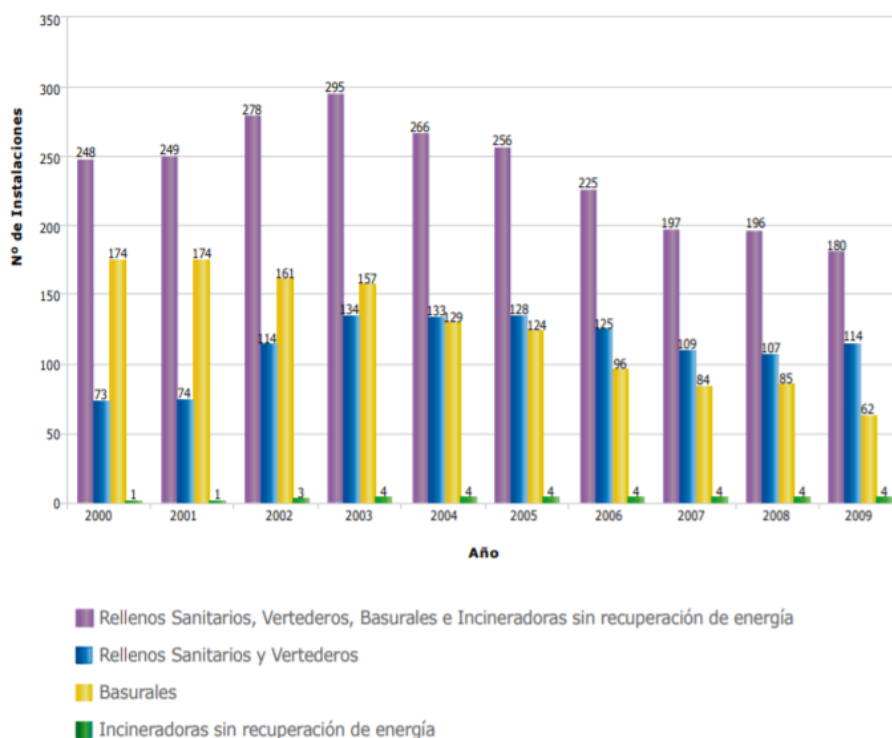


Figura 3.1 Gráfico número de instalaciones de eliminación (Comision nacional del medio ambiente (CONAMA), 2010, pág. 56)

En el gráfico se puede observar la tendencia a la disminución continua de basurales y un alza en la cantidad de rellenos sanitarios entre el año 2000 y 2009.

Es en 2005 que fue aprobada la política de gestión integral de residuos sólidos en nuestro país, la cual formulaba un plan o estrategia previniendo la generación y en caso de no ser posible esto promover la reutilización, reciclaje, valorización energética, tratamiento y disposición final (en ese orden) con el fin de proteger la salud de la población y el entorno ambiental. Dentro del plan de acción para 2010 de esta política se plantearon objetivos específicos:

- Crear sistemas de información para la gestión de los residuos sólidos.
- Minimizar los riesgos sanitarios y ambientales producidos por el mal manejo de residuos sólidos.
- Armonizar y completar el marco regulatorio.

(Comisión nacional del medio ambiente (CONAMA), 2010, pág. 6)

Para el 2010 se creó el ministerio del medio ambiente (MMA) reemplazando a la comisión nacional del medio ambiente y en paralelo se creó el servicio de evaluación ambiental (SEA), el cual tiene como principal objetivo administrar el sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA), por este sistema deben pasar todos los proyectos nacionales antes de su implementación, determinando si estos cumplen con la legislación ambiental vigente y si se hacen cargo de los potenciales impactos ambientales que generen.

Gracias a estas iniciativas, sistemas y gestiones es que se crea la “Política Nacional de Residuos 2018-2030” buscando un enfoque de economía circular y mejorar el manejo de los residuos mediante una gestión sostenible de los recursos naturales. Como objetivos se busca educar a la población sobre la gestión y valorización de residuos, buscando un cambio de conducta. Además, principalmente fomentar la aplicación de jerarquía en el manejo de residuos y asegurar el acceso a infraestructura para el manejo ambientalmente racional de residuos en todo el territorio nacional. (MMA, 2018)

### 3.1.2. Técnicas actualmente utilizadas para el manejo de RSU en Chile

#### 3.1.2.1. Disposición de RSU

A la fecha la disposición de RSU en Chile consta de 3 opciones:

- Rellenos sanitarios

Instalación de eliminación de residuos sólidos en la cual se disponen residuos sólidos domiciliarios y asimilables, diseñada, construida y operada para minimizar molestias y riesgos para la salud y la

seguridad de la población y daños para el medio ambiente, en la cual las basuras son compactadas en capas al mínimo volumen practicable y son cubiertas diariamente, cumpliendo con las disposiciones del presente reglamento. (Minsal, 2005)

Básicamente y lo más utilizado en Chile es realizar una excavación a la cual se le debe impermeabilizar el fondo para evitar filtraciones de líquidos provenientes de los residuos. Debe contar con un sistema de extracción de líquidos y gases (según sea el caso), pozo de control para tomar muestras de las napas subterráneas y sistema de control para vectores como roedores y moscas. Algunas medidas de seguridad son el disponer de un terreno que no sea susceptible a derrumbes y filtraciones, cercar la zona, cumplir con las distancias mínimas permitidas entre el relleno sanitario y comunidades, plantaciones y cursos de agua o captaciones existentes.

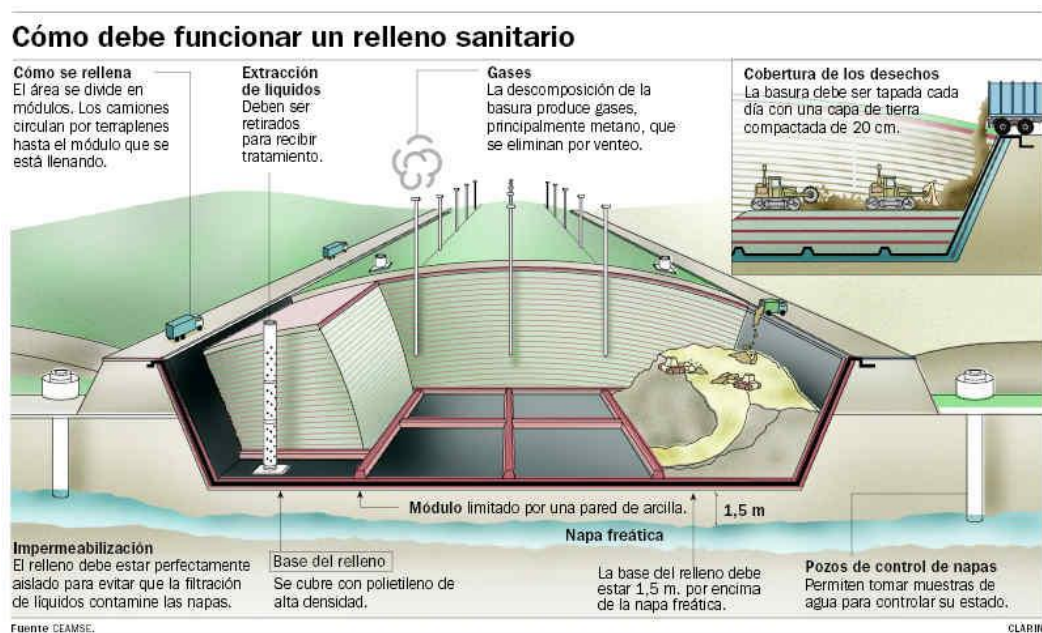


Figura 3.2 Diagrama funcionamiento de un relleno sanitario (Ceamse)

A pesar de estos esfuerzos por cumplir con los requisitos del reglamento, es inevitable que los accidentes ocurran y más aún el manejo de rellenos sanitarios a nivel nacional normalmente comprende extraer los gases producidos por la descomposición directamente al ambiente.

- Vertederos

Cumplen con la Res. N°2444 de 1980. A diferencia de los rellenos sanitarios, estos cumplen con una normativa más “blanda”, la cual no incluye; impermeabilizar el terreno, recuperar los gases ni lixiviados y realizar un control de las napas subterráneas cercanas.

Las principales normas son:

- Ubicación fuera del límite urbano, a más de 300 metros de cualquiera vivienda o local habitable y a más de 600 metros, de toda población o grupo de viviendas,

establecimientos de fabricación o comercio de alimentos y fuentes de suministro de agua.

- El terreno debe ser seco, no expuesto a inundaciones ni al lavado o arrastre de basuras a cursos o masas de agua. Estará cerrado en todo su contorno hasta una altura de 1,80 metros de manera de impedir el ingreso de personas o animales.
- Al abandonarse de manera transitoria o definitiva se debe sanear el sitio, aplanando la basura y cubriéndola con una capa de tierra compactada de 30 o 60 cm (dependiendo del abandono transitorio o definitivo)
- La basura con contenido putrescible debe quedar cubierta con una capa de tierra al final de cada día de trabajo.
- Realizar un control de insectos y ratas, para evitar su proliferación.

- Basurales o vertederos ilegales

A pesar de estar presentes en Chile, los basurales no cumplen con ninguna normativa. Generalmente son sitios eriazos donde se vierte de manera directa al suelo los residuos sólidos. Esto conlleva problemas medioambientales, sanitarios y propagación de enfermedades entre otros (paráfrasis).

(Minsal, 2005)

### 3.1.2.2. *Tratamiento biológico de RSU*

Esta técnica comprende un tratamiento sólo de residuos orgánicos, su fin es reducir el volumen, estabilizar el residuo y destruir los agentes patógenos presentes. El proceso permite la producción de biogás para utilización energética, el producto de este tratamiento puede ser usado como abono en suelos o simplemente eliminarse en sitios de disposición de residuos sólidos (SDRS).

Un proceso alternativo postula realizar una preclasificación de los residuos con el fin de recuperar los materiales reciclables o reutilizables. Este es un proceso que a la fecha en Chile no se realiza de manera conjunta con el tratamiento biológico por lo que no será abordado en este trabajo.

Las plantas de compostaje utilizan un proceso biológico anaerobio y a elevadas temperaturas, de esta manera se degrada la materia orgánica con la ayuda de microorganismos, esto se basa en el proceso de Biometanización, el cual transforma los residuos en biogás.

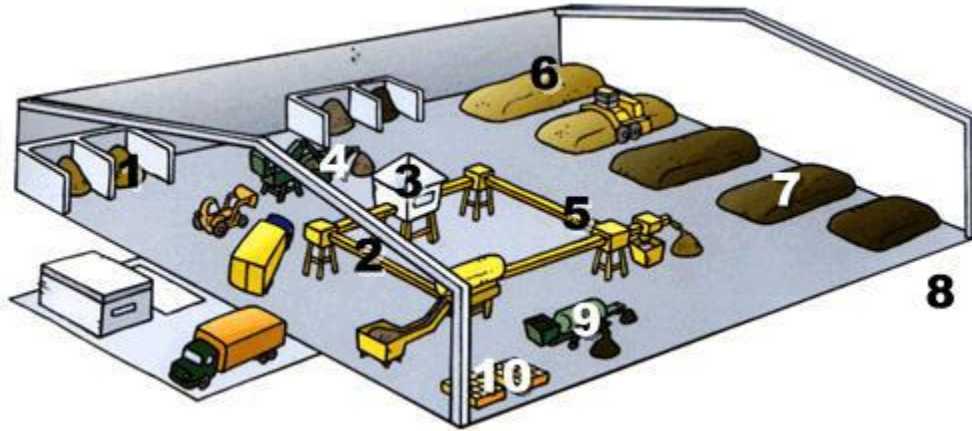


Figura 3.3 Diagrama Planta de compostaje (Gencat)

En el esquema anterior es observable que luego de la llegada de los camiones con los residuos orgánicos, estos son filtrados nuevamente con el fin de eliminar cualquier residuo inorgánico para posteriormente ser dispuesto en pilas y facilitar la obtención de lixiviados. Luego las pilas son volteadas para facilitar el proceso de descomposición, finalmente tras la maduración determinada se obtiene el compost maduro, el cual puede ser comercializado o desechado.

Cabe destacar que la alternativa de obtener el biogás producto del proceso sería mucho más atractiva, pero requiere de equipo especializado y por ende los costos aumentan. Ahora viéndolo desde el punto de vista de la valorización, el obtener un producto de consumo desde un residuo y además controlar las emisiones de GEI resulta en una opción que no debe ser desechada.

### 3.1.2.3. Incineración de los residuos

La incineración de residuos es una técnica que se viene usando desde hace muchos años, la cual ha sufrido varios cambios tecnológicos, para así en la actualidad presentarse opciones realmente viables acorde al panorama cultural y medio ambiental. Actualmente en Chile se utiliza solo la incineración abierta (no regulado), la cual consiste en combustionar los residuos no deseados como dice su nombre en espacios abiertos sin estar presente ningún sistema de filtración de los humos o mediante el uso de dispositivos de incineración.

La incineración en espacios abiertos es una práctica ilegal en Chile, por ende, no hay registros de las cantidades incineradas. A pesar de esto si está permitida la incineración de residuos hospitalarios como también la cremación de restos humanos.

Lo más preocupante a la hora de realizar incineraciones son las cenizas y los gases de combustión que son emitidos al medio ambiente, muchas veces los gases presentan concentraciones de dioxinas

y furanos, estos son altamente cancerígenos y las cenizas pueden contener restos de metales pesados entre otros.

Más adelante se estudiará la alternativa de Incineración con recuperación energética, tecnología que ha evolucionado mucho en el manejo de los gases y cenizas producidos por la incineración, llevando como estandarte en el manejo de RSU a los hornos de parrilla.

#### 3.1.2.4. Valorización de los residuos

La valorización (no energética) comprende las acciones de reutilizar o reciclar un residuo, ya sea con los fines que fue inicialmente producido o no, el residuo en si puede ser utilizado como materia prima o insumo para producir un producto, también existe la posibilidad de realizar compostaje si el residuo cumple con las características necesarias.

En 2018 se generaron aproximadamente 13,5 toneladas de residuos no peligrosos (esta categoría incluye a los RSU), de los cuales sólo un 21,9% fue valorizado de alguna manera, mientras que el resto (10,54 toneladas) fueron eliminados en SDRS. De acuerdo con la tasa de valorización nacional, esta tendencia se ha mantenido constante, al menos desde 2015.

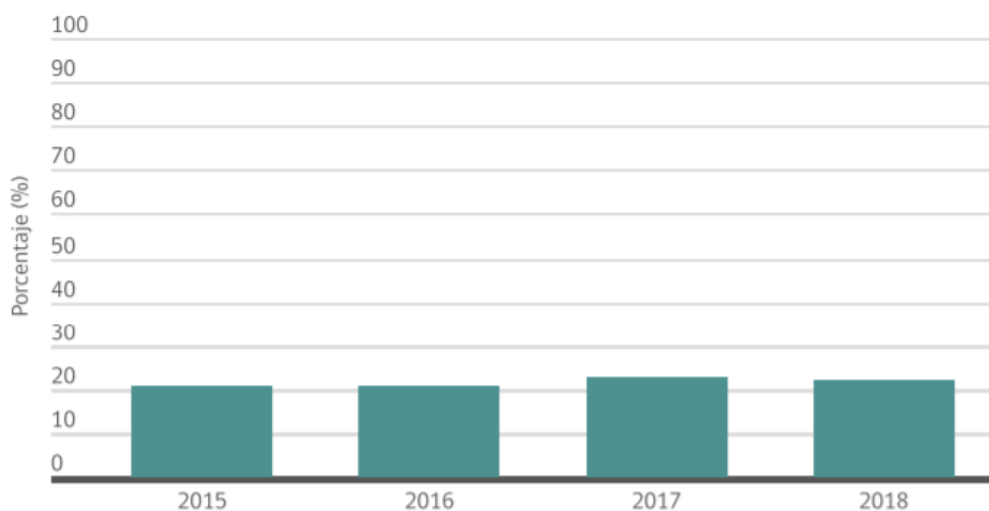


Figura 3.4 Gráfico porcentaje de Residuos no peligrosos valorizados Chile 2015-2018. (MMA, 2020)

En el gráfico anterior se observa esta tendencia constante entre un 20% y 23%.

Los residuos valorizados en 2018 pueden ser separados por categorías según su tipo de valorización, esto es observable en la figura 3.5

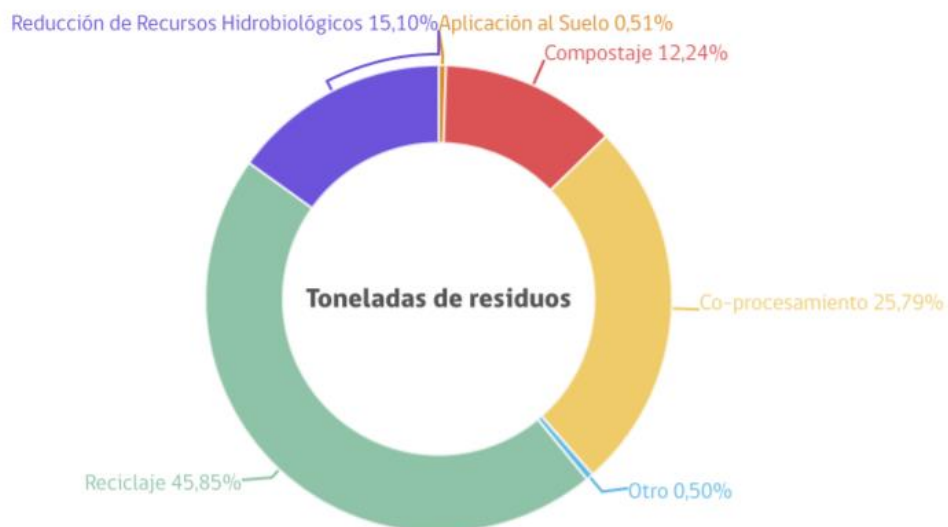


Figura 3.5 Gráfico Residuos valorizados 2018 por categoría. (MMA, 2020)

### 3.2. Entorno nacional

Para el año 2018, en Chile se generaron 7,5 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) (Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo (SUBDERE), 2019), esto equivale prácticamente a generar 1 [kg] de basura al día por habitante si consideramos la población flotante. Esta información está contenida en la siguiente tabla:

| REGIÓN   | PARÁMETRO                    | RESUMEN 2017 | RESUMEN 2018 | DIFERENCIAS (2017-2018) |
|----------|------------------------------|--------------|--------------|-------------------------|
| Nacional | Población atendida           | 20.073.015*  | 21.049.916   | 976.901                 |
|          | Residuos Generados (ton/año) | 7.487.559    | 7.522.475    | 34.916                  |
|          | Ppc (kg/hab/día)             | 1,02         | 0,98         | -0,04                   |

Tabla 3.1 Síntesis nacional de RSU generados y población atendida considerando población flotante. (SUBDERE, 2019, pág. 19)

En esta misma fecha se identificaron 124 sitios de disposición final de RSD activos. A continuación, se realiza el desglose de estos:

- Relleno sanitario (30)
- Relleno manual (8)
- Vertedero (48)
- Basural (38)

### 3.2.1. Caracterización de RSU en Chile

Los residuos sólidos son considerados no peligrosos, esta categoría en 2017 generó 22 millones de toneladas aproximadamente, correspondiente a residuos de origen industrial (60,4%), residuos sólidos municipales (35,3%) y lodos (1,6%)

Se considera importante clarificar la composición y generación por región de RSU, de esta manera es posible tener una idea de las posibles futuras soluciones por sector.

#### 3.2.1.1. Generación de residuos

La mayor generación total de residuos no peligrosos corresponde lógicamente a la región metropolitana, aportando con un 49,2% del total. Le siguen las regiones del Biobío, Valparaíso y Antofagasta cuyos aportes fueron del 9,8%, 7,3% y 6,9% del total respectivamente.

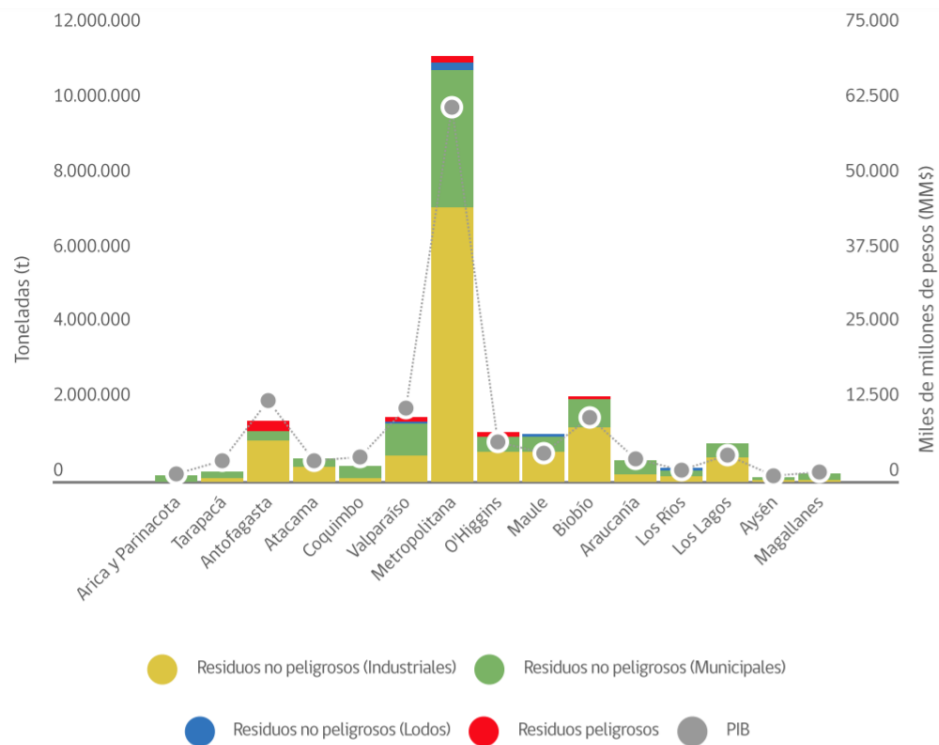


Figura 3.6 Gráfico generación de residuos por origen y región (MMA, 2019, pág. 69)

A pesar de estar Antofagasta entre las 4 regiones que más residuos no peligrosos generan, en este caso corresponden en su mayoría a residuos industriales.

En el siguiente gráfico se observan los porcentajes de generación por región, para residuos sólidos urbanos:

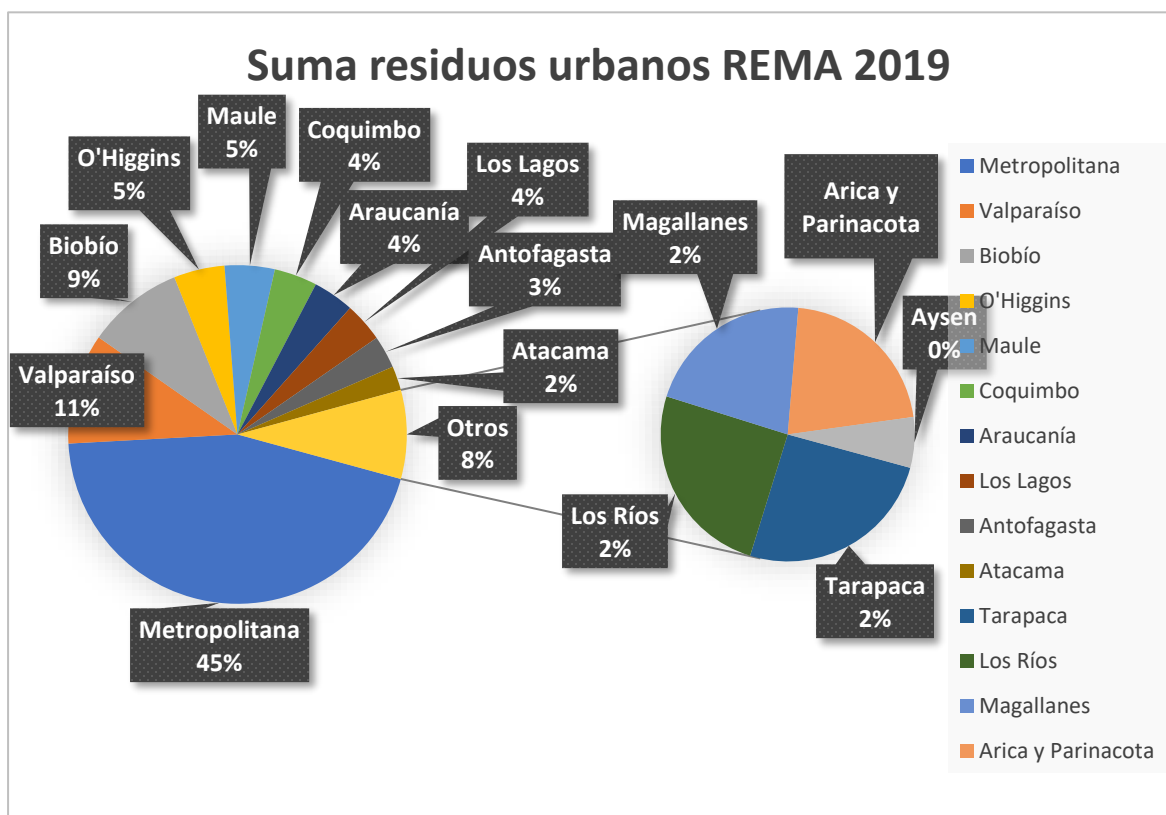


Figura 3.7 Gráfico porcentajes de generación RSU por región (Elaboración propia)

Es notable destacar que aproximadamente **el 70% de los RSU se generan en la zona centro del país**, comprendiendo las regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins, Maule y una parte de la región del Biobío. En esta zona se generan **14 mil toneladas al día aprox.**

### 3.2.1.2. Composición de los residuos

Saber de qué se compone nuestra basura y en que porcentajes es el puntapié inicial ante cualquier medida o proyecto a ser implementado, no se puede pretender manejar un tema tan complejo y variado sin antes realizar una mirada introspectiva a nuestra realidad como país. Es de esta manera que a continuación se presenta un gráfico realizado gracias a la información aportada en el “Estudio de Caracterización de residuos sólidos domiciliarios en la región metropolitana” para la CONAMA (Facultad de ingeniería PUCV, 2006). A pesar de ser un estudio antiguo nos puede acercar a la realidad de hoy.

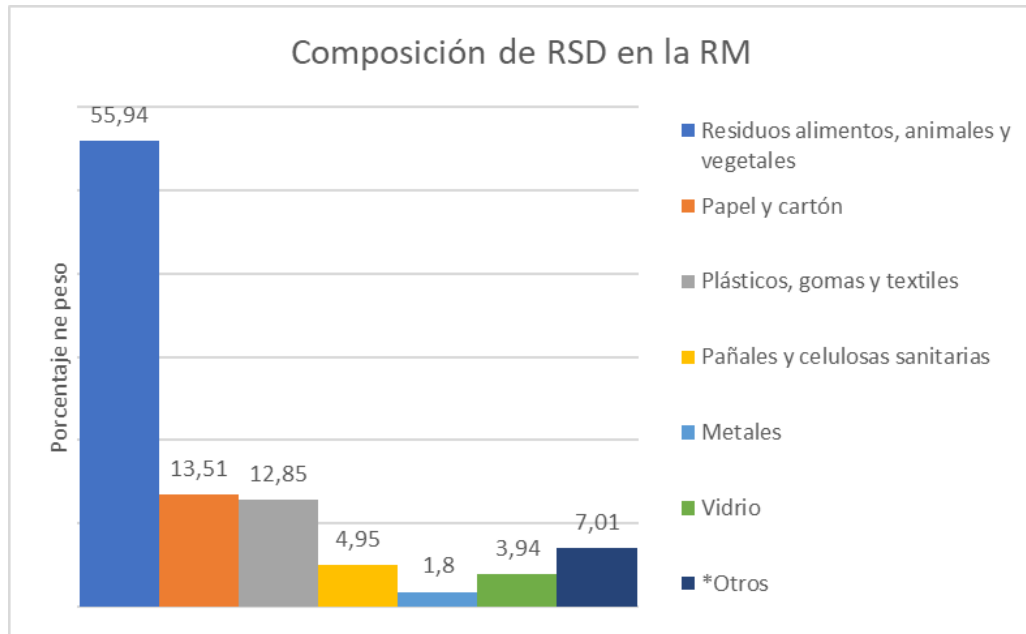


Figura 3.8 Gráfico composición de RSD en la RM (Elaboración propia)  
 \*Otros: Pilas, cenizas, cerámicas y suciedad

Si bien la información corresponde solo a la región metropolitana, esta misma representa casi la mitad de la generación de RSU en Chile. Por lo tanto, cumple de manera aceptable.

Cabe mencionar que la información anteriormente entregada puede diferir a zonas, en las cuales la economía de la región y la cultura afectan en el comportamiento de la población, ya sea sus hábitos alimenticios o el poder adquisitivo.

Al analizar el gráfico es notable el gran aporte de residuos biodegradables (56%) correspondiente a desechos alimenticios y restos vegetales de jardín entre otros, le siguen en menor porcentaje papel y cartón; plásticos y gomas. En este punto conviene hacer la siguiente pregunta: ¿Deberíamos realizar una eliminación de residuos por categoría? En muchos países emplean una eliminación por 5 y más categorías, empleando un plan de recogida basado en destinar un día de la semana a cada categoría.



Figura 3.9 Fotografía Contenedores de colores para distintos tipos de residuos (Recemsa)

“Incluso al entrar un producto en el mercado debería este mismo ser claro en la manera correcta de eliminar el envase para no dañar el medio ambiente, todo esto debe ser acompañado de leyes que avalen la idea de hacernos responsables de lo que consumimos y producimos”.

### 3.2.2. Política de gobierno residuos

La política de gobierno busca dar cumplimiento a los objetivos y estándares internacionales mediante el uso racional de materiales y disposición de residuos, así disminuir la generación de residuos y valorizarlos dentro de lo posible.

#### 3.2.2.1. Programa nacional de residuos

El programa nacional de residuos cuyo objetivo es “mejorar las condiciones de salubridad y calidad ambiental en centros urbanos y rurales a nivel nacional, a través de la implementación de sistemas integrales y sostenibles para el manejo eficiente de residuos sólidos domiciliarios”. (SUBDERE, 2018)

Para lograrlo establece los siguientes objetivos:

- Aumentar el porcentaje de residuos sólidos domiciliarios con disposición final en instalaciones sanitarias y ambientalmente adecuadas.
- Cerrar instalaciones de disposición final de residuos sólidos domiciliarios sin autorización sanitaria o ambiental.
- Fomentar programas o iniciativas destinadas a la prevención y reducción de la generación de Residuos Sólidos Domiciliarios y asimilables, promoviendo su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización que permita aumentar la vida útil de los sitios de disposición final.
- Mejorar la capacidad de planificación regional respecto al manejo de residuos sólidos.
- Fortalecer las competencias técnicas locales y regionales, en cada una de las materias señaladas anteriormente, relacionada con los actores que participan directamente en el levantamiento y seguimiento de las iniciativas de inversión pública relacionadas al ámbito de los Residuos Sólidos.

De esta manera es que se ha elaborado una serie de metodologías relacionadas a la evaluación, preparación y formulación de proyectos que valoricen residuos o se busque la disposición final. La idea de esto es facilitar la puesta en marcha de nuevos proyectos y alinear los objetivos.

### 3.2.2.2. *Ley de fomento al reciclaje*

Mediante esta ley más conocida como “Ley de reciclaje”, se busca responsabilizar a los fabricantes de ciertos productos de consumo masivo (productos prioritarios) cuando estos adquieren el carácter de “inservible”, se establece que una vez que los productos cumplen con su vida útil deben volver a la fábrica o bodegas en caso de ser importados.

Algunos decretos importantes que están en tramitación o ya han sido aprobados con respecto a los RSU:

- Decreto envases y embalajes
- Decreto neumáticos
- Decreto aceites
- Decreto pilas
- Plan nacional de ecodiseño y etiquetado

Los consumidores tendremos por obligación separar y entregar los residuos de productos prioritarios, la ley establecería que el retiro debe ser realizado mediante un sistema de gestión involucrando a las empresas productoras, municipios y recicladores de base. Los productores o importadores deben organizar y financiar esta recolección y posterior tratamiento de los residuos, además se establecerán metas mínimas que deben cumplir en cuanto a valorización. (MMA, 2018)

### 3.2.3. Situación actual para la disposición de RSU V región

En este punto se informará como ejemplo sobre el estado actual de los sitios de disposición final en la V región.

Para el mes de agosto del 2019 hay en funcionamiento 3 rellenos sanitarios, 2 vertederos y 2 basurales, además de una estación de transferencia y un centro de tratamiento intermedio. (SUBDERE, 2019) Cabe mencionar que los 2 basurales informados están ubicados en territorio insular, por lo que de aquí en adelante no serán considerados.

#### 3.2.3.1. *Rellenos sanitarios y vertederos V región*

Los sitios de disposición final corresponden a:

- RS El Molle
- RS San Pedro
- RS La Hormiga
- Vertedero Cabildo
- Vertedero Tabolango

A continuación, se especificaran las capacidades de cada sitio, año de inicio y termino de las operaciones y las toneladas al año de RSU que recibe cada uno.

| Nombre                | Inicio operaciones | Año cierre programado | Capacidad | RSD [Ton/año] |
|-----------------------|--------------------|-----------------------|-----------|---------------|
| RS El Molle           | 2013               | 2028                  | 8.848.515 | 494.153       |
| RS San Pedro          | 2013               | 2033                  | 4.836.667 | 198.302       |
| RS La Hormiga         | 2014               | 2034                  | 3.603.208 | 77.969        |
| Vertedero Cabildo *   | 1993               | 2010                  | 11.959    | 12.292        |
| Vertedero Tabolango * | 0                  | 2017                  | 0         | 7.462         |

\*Ambos vertederos están fuera de plazo para el cierre programado.

\*\*Datos (SUBDERE, 2019)

*Tabla 3.2 Sitios de disposición final en la V región (Elaboración propia)*

A pesar de estar fuera del plazo para el cierre, el vertedero cabildo cuenta con permiso para funcionar hasta el 1 de enero del 2021, actualmente se están realizando las gestiones para reemplazarlo por una estación de transferencia. No así el vertedero Tabolango cuenta con permiso hasta el 12 de diciembre de 2020 y ya se ha hecho con un sumario sanitario. (Ministerio de Salud, 2019, pág. 9)

En el siguiente gráfico se observan los porcentajes que representa cada sitio de disposición, en cuanto a toneladas de residuos recibidos al año:

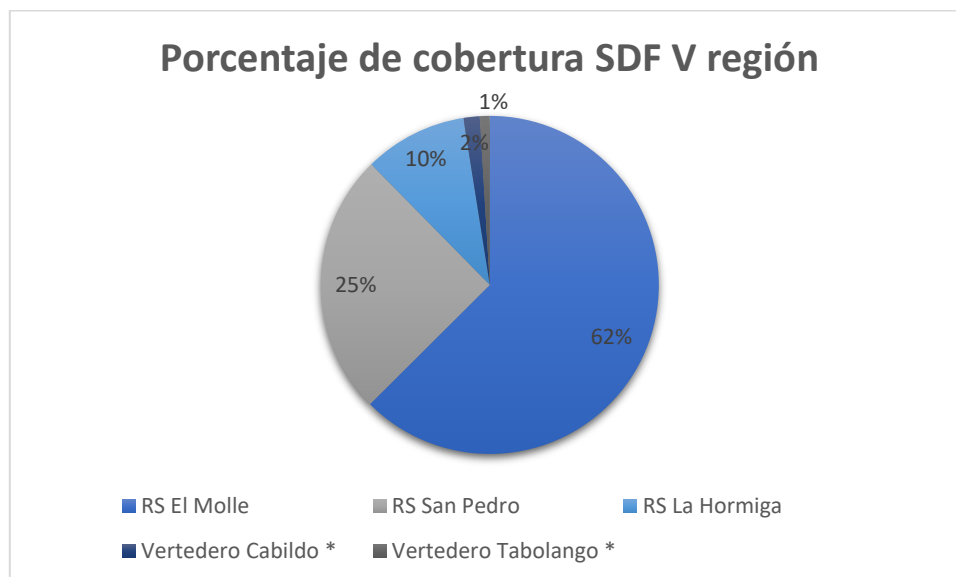


Figura 3.10 Gráfico Porcentaje de cobertura SDF V región (elaboración propia)

De esta manera queda en evidencia que el 97% de los RSU destinados a SDF terminan en rellenos sanitarios regulados, de los cuales el más importante es el Relleno sanitario El Molle, el cual recibe el 62% de los RSU correspondiente a 494.153 [Ton/año], abarcando el 86% de la comuna de Valparaíso, San Antonio en su totalidad y el 45,5% del Marga Marga (información actualizada a 2017). (SUBDERE, 2019, pág. 101)

### 3.3. Consecuencias del actual manejo de RSU

#### 3.3.1. Contaminación atmosférica

Uno de los principales impactos al medio ambiente es la generación de GEI, con el fin de mostrar la importancia que tiene el sector “Residuos” en el balance nacional se establecerá un contexto general.

Se presenta una comparación en cuanto a las emisiones de los 5 sectores o categorías que son contabilizadas en el Informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile serie 1990-2016 (MMA, 2018). Este es el documento oficial con el que se trabaja para conocer la situación país con respecto a la generación de GEI. Los 5 sectores contabilizados corresponden a los siguientes:

- Energía
- Procesos industriales y uso de productos

- Agricultura
- Residuos
- Usos de la tierra, cambios en el uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS)

De los cuales los 4 primeros corresponden a emisiones y el último corresponde a absorciones. Se muestra a continuación una tabla histórica de los 4 sectores con emisiones positivas entre 1990 y 2016.

| Sector       | 1990            | 2000            | 2010            | 2013             | 2014             | 2015             | 2016             |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Energía      | 33.679,7        | 52.511,9        | 68.623,5        | 79.993,7         | 77.417,0         | 83.713,4         | 87.135,6         |
| IPPU         | 3.295,4         | 6.243,6         | 5.492,5         | 6.144,0          | 6.233,9          | 6.584,8          | 6.939,3          |
| Agricultura  | 12.071,4        | 14.008,7        | 13.244,1        | 12.848,4         | 12.419,1         | 12.210,6         | 11.801,6         |
| Residuos     | 2.969,3         | 3.822,4         | 4.502,2         | 5.318,4          | 5.403,9          | 5.734,5          | 5.801,1          |
| <b>Total</b> | <b>52.015,8</b> | <b>76.586,6</b> | <b>91.862,3</b> | <b>104.304,5</b> | <b>101.473,9</b> | <b>108.243,3</b> | <b>111.677,6</b> |

Tabla 3.3 Emisiones de GEI (kt CO<sub>2</sub>eq por sector, serie 1990-2016. (MMA, 2018)

Se observa una tendencia de crecimiento general en todos los sectores excepto el sector agricultura. Cabe destacar que para realizar estos cálculos los autores realizan una serie de suposiciones, generando incertidumbre en los datos finales. En muchos casos no se cuenta con los datos específicos de cada sector.

De manera gráfica podemos observar la misma información entregada anteriormente para el año 2016:

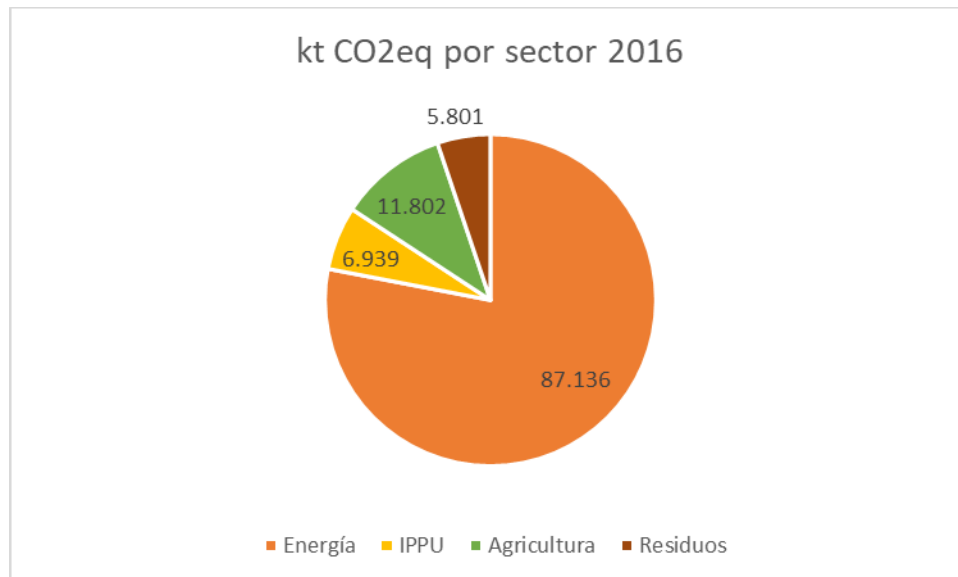


Figura 3.11 Gráfico ktCO<sub>2</sub>eq por sector, 2016. (Elaboración propia)

Así el sector “Residuos” se posiciona en 5° lugar en cuanto a Kt de CO<sub>2</sub>eq emitidas, representando un 5,2% aproximadamente del total a nivel país (sin contemplar las absorciones por parte del sector

UTCUTS). Con respecto a los demás sectores tenemos: en 1° lugar al sector Energía con 78 % de representatividad, 2° lugar sector Agricultura (10,6 %) y 3er lugar sector IPPU (6,2 %).

En busca de un balance que represente emisiones y absorciones incluyendo características como el potencial de calentamiento global (PCG) para cada gas, establecido por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés).

Se presenta un gráfico que establece el aporte total (contabilizando las absorciones) de cada gas en Kt de CO<sub>2</sub>eq a nivel nacional para 2016:

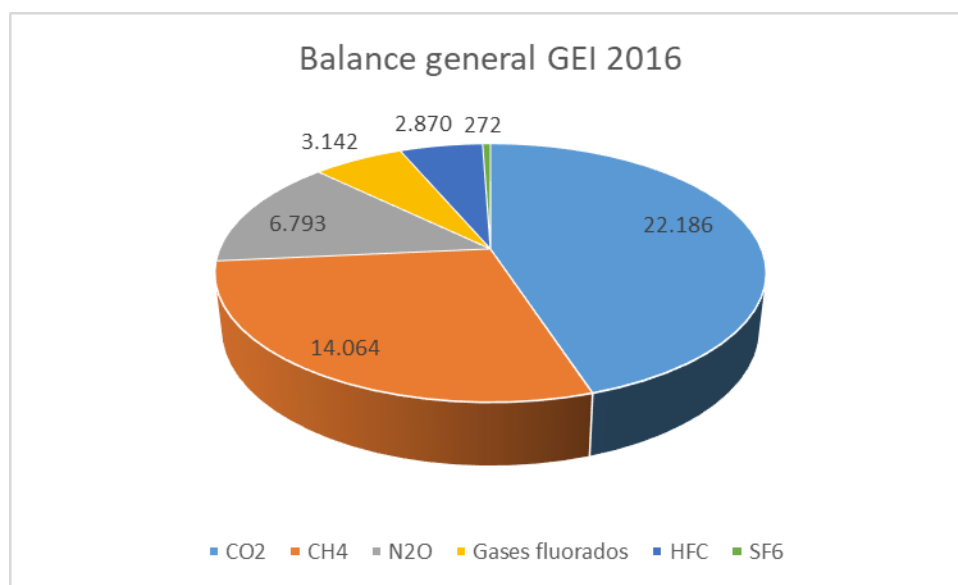


Figura 3.12 Gráfico Balance general GEI 2016. (Elaboración propia)

Tras realizar el balance general del aporte de GEI en Chile (2016) incluyendo al sector UTCTS (absorciones) se observa que la emisión de metano representa el 28,5% de las emisiones de CO<sub>2</sub>eq. De esta manera se visibiliza la “real importancia” del metano en cuanto a emisiones.

El metano toma importancia tras realizar el balance general, debido a que este no es absorbido de manera natural por el ecosistema, a diferencia del CO<sub>2</sub>, que en gran parte es absorbido por el sector UTCTS.

#### 3.3.1.1. Emisión de CH<sub>4</sub>

Tras haber establecido la importancia de las emisiones de gas metano, se presenta la siguiente tabla informando el origen de estas emisiones con datos históricos por sector:

| Sector         | 1990            | 2000            | 2010            | 2013            | 2014            | 2015            | 2016            |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1. Energía     | 2.952,2         | 2.558,6         | 1.912,8         | 1.930,9         | 1.918,0         | 1.820,1         | 1.888,3         |
| 2. IPPU        | 54,3            | 171,0           | 57,1            | 21,0            | 15,7            | 15,0            | 22,8            |
| 3. Agricultura | 7.100,4         | 8.308,8         | 7.246,5         | 7.298,7         | 6.973,8         | 6.770,5         | 6.589,5         |
| 4. UTCUTS      | 130,4           | 57,9            | 172,1           | 38,3            | 412,4           | 700,8           | 126,6           |
| 5. Residuos    | 2.787,6         | 3.585,2         | 4.174,3         | 4.976,9         | 5.055,4         | 5.378,3         | 5.437,1         |
| <b>Balance</b> | <b>13.024,9</b> | <b>14.681,5</b> | <b>13.562,8</b> | <b>14.265,8</b> | <b>14.375,3</b> | <b>14.684,7</b> | <b>14.064,3</b> |

Tabla 3.4 Emisiones de CH<sub>4</sub> (kt CO<sub>2</sub>eq) por sector, serie 1990-2016. (MMA, 2018, pág. 76)

En la tabla anterior se observa que entre los sectores de agricultura y residuos históricamente y hasta el día de hoy generan la mayor cantidad de metano liberado al medio ambiente. Vale la pena clarificar gráficamente la procedencia del metano, siendo el segundo mayor aporte a nivel nacional de GEI.

Se presenta el siguiente gráfico que muestra los aportes de CH<sub>4</sub> en porcentajes visuales:

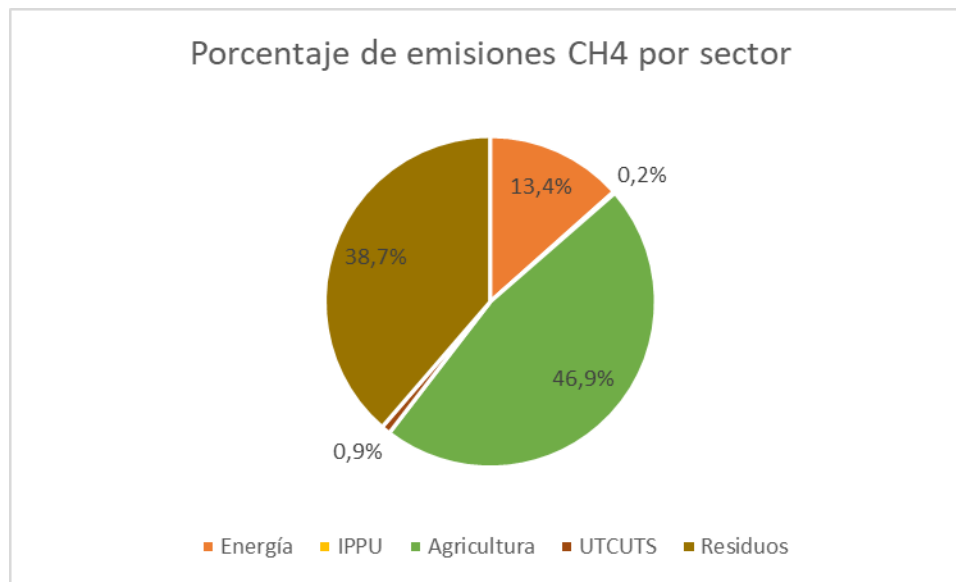


Figura 3.13 Gráfico Porcentaje de emisiones CH<sub>4</sub> por sector, año 2016. (Elaboración propia)

Sustrayendo la información del gráfico se observa que el mayor aporte de gas metano a la atmósfera proviene del sector Agricultura con un 46,9%, seguido del sector Residuos con un 38,7% y el sector Energía con un 13,4%. Los otros sectores no son relevantes.

Ya establecido el contexto y la “real importancia” del CH<sub>4</sub> en cuanto a emisiones de GEI a nivel nacional nos centraremos en el sector “Residuos” de lleno.

## Sector Residuos

La emisión de GEI por parte del sector “Residuos” tienen como origen las siguientes actividades:

- La disposición de residuos sólidos urbanos (DRS)
- El tratamiento biológico de los residuos sólidos
- La incineración de los residuos
- El tratamiento y descarga de las aguas residuales

En este informe no se contemplaran las emisiones generadas debido al transporte de estos residuos a los sitios de disposición final o plantas de tratamiento.

La siguiente tabla resume las emisiones de GEI por parte del sector “Residuos”.

| Categoría                                       | 1990           | 2000           | 2010           | 2013           | 2014           | 2015           | 2016           |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 5.A. Disposición de residuos sólidos            | 2.288,7        | 3.071,7        | 3.142,1        | 3.832,8        | 3.867,9        | 4.209,2        | 4.305,3        |
| 5.B. Tratamiento biológico de residuos sólidos  | 17,0           | 20,4           | 78,1           | 61,0           | 59,9           | 59,9           | 59,9           |
| 5.C. Incineración y quema abierta de residuos   | 0,0            | 0,1            | 0,3            | 0,3            | 0,4            | 0,5            | 0,5            |
| 5.D. Tratamiento y descarga de aguas residuales | 663,6          | 730,3          | 1.281,7        | 1.424,2        | 1.475,6        | 1.464,8        | 1.435,3        |
| <b>Total</b>                                    | <b>2.969,3</b> | <b>3.822,4</b> | <b>4.502,2</b> | <b>5.318,4</b> | <b>5.403,9</b> | <b>5.734,5</b> | <b>5.801,1</b> |

Tabla 3.5 Emisiones de GEI sector Residuos (kt CO<sub>2</sub>eq) por categoría, serie 1990-2016. (MMA, 2018, pág. 461)

Al realizar una comparación entre las fuentes de emisión de GEI dentro del sector “Residuos” nos encontramos con un 74,21% correspondiente a la Disposición de Residuos Sólidos. Por lo tanto y en conjunto con la información anterior se elaboró un gráfico que resalte y contabilice el aporte de emisiones proveniente de la DRS y otros del sector, en comparación al balance general antes mostrado en la figura 3.12.

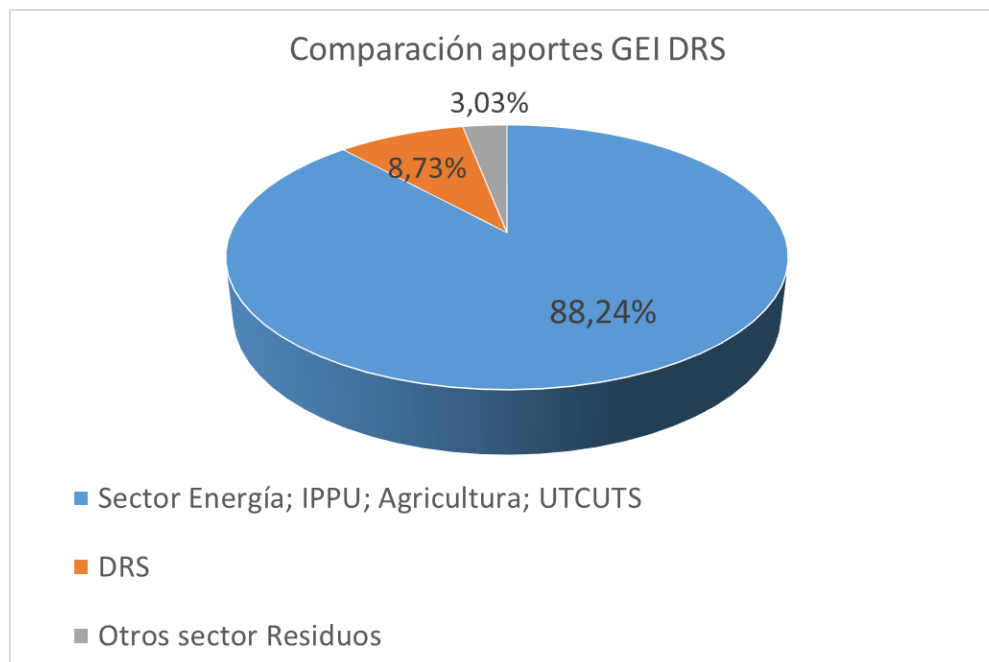


Figura 3.14 Gráfico comparación aportes GEI. (Elaboración propia)

Del anterior gráfico se observa que el aporte de GEI proveniente de la disposición de residuos sólidos corresponde al 8,73% del total generado a nivel nacional. La DRS comprende las actividades en RS, vertederos y basurales. Su principal aporte es el metano proveniente de la descomposición anaeróbica de residuos orgánicos.

### 3.3.2. Contaminación visual

Este punto es principalmente asociado con los vertederos y basurales ilegales. Básicamente el entorno se ve opacado por restos de bolsas, neumáticos, electrodomésticos, residuos peligrosos y otros residuos que no tuvieron un adecuado manejo. Estas situaciones se dan debido a que el actual sistema de recogida no satisface a toda la población, o bien la falta de educación, recursos y espacio lleva a las personas a buscar opciones más “fáciles” para eliminar sus residuos. Esto sumado a la falta de herramientas de fiscalización conlleva a la creación de sitios informales e ilegales para la disposición de residuos.

Actualmente no existe información certera en cuanto a la cantidad de vertederos y basurales ilegales existen, por lo tanto, se realizará una muestra de los más conocidos en las comunas de Valparaíso y Viña del Mar.

Los rellenos sanitarios a pesar de ser una opción aceptada para el correcto manejo de los residuos afectan de manera directa debido a las obras civiles que deben realizarse para su construcción, las cuales generalmente no son armoniosas con el entorno donde se emplazan, y de manera indirecta por los camiones que al pasar por tierra seca propagan el polvo al aire, terminando este en los árboles, arbustos y otros elementos de la naturaleza.

### 3.3.3. Contaminación de subsuelos

La contaminación de masas de agua, ya sean subterráneas o superficiales conlleva varios problemas al medio ambiente y a las personas.

En ocasiones a pesar de existir un manejo regulado de los residuos mediante el uso de rellenos sanitarios, estos pueden fallar debido a diversos factores. Cuando la falla afecta al sistema de colección y drenaje de los lixiviados nos encontramos ante una posible contaminación de aguas subterráneas o superficiales debido a la infiltración de lixiviados.

Dentro de un relleno sanitario, los lixiviados son producto de la transferencia de agua a través de los residuos sólidos y de la lixiviación de componentes desde el sólido al líquido. Son considerados como un residuo líquido con un gran impacto ambiental, por su significativa

concentración de amonio, materia orgánica y sales. Sin embargo, la composición de estos varía dependiendo de la naturaleza de los residuos, características del suelo, patrones de lluvia y, en gran parte, a la edad del relleno. (Di Laconi, Rossetti, Lopez, & Ried, 2011)

Las situaciones más graves ocurren cuando se contamina una masa de agua que finalmente será usada de manera consuntiva o para uso agrícola, pudiendo en el primer caso intoxicar a la población o bien en el segundo caso a los animales que beberían esta agua contaminada. Si hubiese un cultivo utilizando esta agua contaminada, se vería completamente destruido e inservible para consumo humano.

En los casos en que no existe un correcto manejo de los residuos los lixiviados contaminarán seguramente el ecosistema, pudiendo estar compuestos hasta por metales pesados, con lo cual dejarían inservible por cientos de años la tierra.



Figura 3.15 Imagen infiltración de lixiviados. (Desatascoscubacas)

En la imagen anterior se observa como un vertedero sin recubrimiento en el fondo o presentando fallas contamina aguas subterráneas por infiltración de lixiviados

#### 3.3.4. Propagación de enfermedades y vectores

En SDF regulados debe existir un control de plagas estricto, de esta manera se evita la propagación de enfermedades y vectores. Generalmente estos sitios se encuentran a una distancia prudente de poblaciones y se realizan fiscalizaciones para prevenir el mal uso de estos. Diferente es la situación en vertederos y basurales ilegales, los cuales se encuentran al margen de la ley. En el caso de

microbasurales la mayoría de las veces existen comunidades cercanas, las cuales desechan sus residuos en el basural intensificando la contaminación presente. Esto da paso a una reacción en cadena generando un crecimiento exponencial de las plagas que finalmente afecta a la comunidad. Algo tan común como la aparición de cucarachas, moscas y ratones los cuales encuentran un lugar propicio para alimentarse, atrayendo a animales más grandes como perros y gatos que posiblemente se contagien alguna enfermedad en el basural para luego llevarla a las comunidades cercanas o incluso propagándola dentro de su misma y otras especies.

## 4. Plantas incineradoras de residuos sólidos urbanos

Actualmente se presenta como una alternativa para el manejo de residuos sólidos en Chile

### 4.1. Tecnologías existentes

Existen diversas tecnologías para el tratamiento térmico de los residuos, las más utilizadas se encuentran clasificadas en la siguiente tabla según la técnica y el tipo de residuo a tratar.

| Técnica                             | Residuos urbanos sin tratar | RSU pretratados y RDF    | Residuos peligrosos      | Lodo de alcantarillado   | Residuos clínicos        |
|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Parrilla-reciprocante               | Se aplica ampliamente       | Se aplica ampliamente    | Normalmente no se aplica | Normalmente no se aplica | Se aplica                |
| Parrilla-móvil                      | Se aplica                   | Se aplica                | Se aplica raramente      | Normalmente no se aplica | Se aplica                |
| Parrilla-oscilante                  | Se aplica                   | Se aplica                | Se aplica raramente      | Normalmente no se aplica | Se aplica                |
| Parrilla-rodillos                   | Se aplica                   | Se aplica ampliamente    | Se aplica raramente      | Normalmente no se aplica | Se aplica                |
| Parrilla-refrigerada por agua       | Se aplica                   | Se aplica                | Se aplica raramente      | Normalmente no se aplica | Se aplica                |
| Parrilla más horno rotativo         | Se aplica                   | Normalmente no se aplica | Se aplica raramente      | Normalmente no se aplica | Se aplica                |
| Horno rotativo                      | Normalmente no se aplica    | Se aplica                | Se aplica ampliamente    | Se aplica                | Se aplica ampliamente    |
| Horno rotativo-refrigerado por agua | Normalmente no se aplica    | Se aplica                | Se aplica                | Se aplica                | Se aplica                |
| Solera estática                     | Normalmente no se aplica    | Normalmente no se aplica | Se aplica                | Normalmente no se aplica | Se aplica ampliamente    |
| Horno estático                      | Normalmente no se aplica    | Normalmente no se aplica | Se aplica ampliamente    | Normalmente no se aplica | Se aplica                |
| Lecho fluidizado-borboteo           | Se aplica raramente         | Se aplica                | Normalmente no se aplica | Se aplica                | Normalmente no se aplica |
| Lecho fluidizado-circulante         | Se aplica raramente         | Se aplica                | Normalmente no se aplica | Se aplica ampliamente    | Normalmente no se aplica |
| Lecho fluidizado-rotativo           | Se aplica                   | Se aplica                | Normalmente no se aplica | Se aplica                | Se aplica                |
| Pirólisis                           | Se aplica raramente         | Se aplica raramente      | Se aplica raramente      | Se aplica raramente      | Se aplica raramente      |
| Gasificación                        | Se aplica raramente         | Se aplica raramente      | Se aplica raramente      | Se aplica raramente      | Se aplica raramente      |

Tabla 4.1 Resumen de las técnicas de tratamiento térmico para los principales tipos de residuos (MMA y medio rural marino, 2011, pág. 41)

En este trabajo sólo se explorarán las técnicas más comunes que aplican a los RSU sin tratar.

#### 4.1.1. Incineradores de parrilla

Los incineradores de parrilla son el típico sistema que se utiliza para la incineración de los RSU. La clave de esta técnica es el movimiento que generan las parrillas móviles para la adecuada velocidad de alimentación, aireación, mezcla y posterior combustión de los residuos. Es importante mencionar que se estudiarán sistemas de alimentación continua debido a que la puesta en marcha y paralización de la planta son las actividades más contaminantes del proceso. Dentro de los incineradores de parrilla se destacan los de parrillas móviles ya que su aplicación es resultado de las modificaciones y evolución tecnológica de los de parrilla fija. Estos son clasificados según la orientación y naturaleza del movimiento.

##### 4.1.1.1. Parrillas oscilantes

Las parrillas oscilantes consisten en varias filas de parrillas que abarcan todo el ancho del horno, la particularidad de este sistema es el movimiento vertical y el desplazamiento horizontal generados, permitiendo una mezcla más homogénea de los residuos. Mediante el uso de un eje vertical conectado a filas alternas de la parrilla se produce el movimiento, es posible observar esto en la figura siguiente.

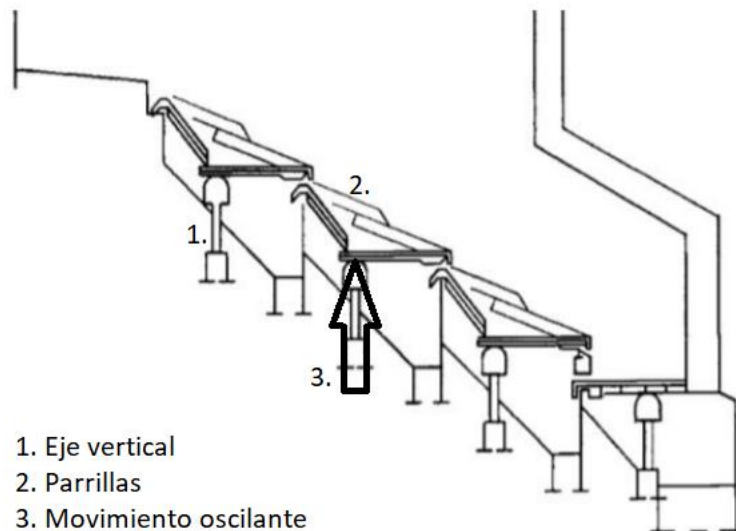


Figura 4.1 Diagrama funcionamiento de parrillas oscilantes. (López Camacho, 2018, pág. 36)

##### 4.1.1.2. Parrillas reciprocantes

El sistema de parrillas reciprocantes al igual que el oscilante cubren el ancho total del horno, estos sistemas son parecidos pero su principal diferencia radica en el movimiento generado y además las parrillas se encuentran sobrepuestas. En el caso de las reciprocantes el movimiento es de

deslizamiento mediante el uso de una parrilla móvil y una fija, de esta manera se mezclan y transportan los residuos.

Dentro de las parrillas reciprocantes existen las de alimentación inversa y las de empuje, diferenciándose simplemente por la disposición de las parrillas, ya que en las de alimentación inversa las parrillas generan un movimiento contrario al desplazamiento de los residuos y las de empuje lo generan a favor del movimiento. En ambos casos se logra una buena mezcla de los residuos, aunque en las de alimentación inversa esta es más notoria.

En la siguiente figura se observan las diferencias antes mencionadas.

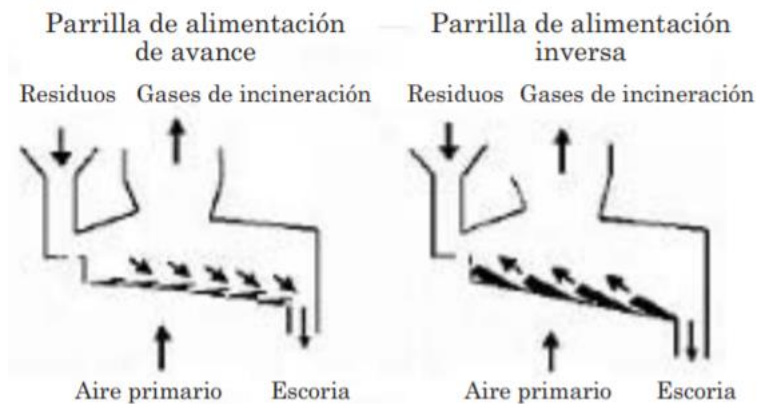


Figura 4.2 Diagrama distintos sistemas de parrilla según avance. (MMA y medio rural marino , 2011, pág. 45)

#### 4.1.1.3. Parrillas refrigeradas

Las parrillas refrigeradas hace años son parte del sistema básico para la incineración de residuos, existen parrillas refrigeradas por agua que aportan con otras características beneficiosas, dentro de las cuales encontramos un mayor control de la temperatura de combustión local y de la temperatura de la parrilla, de esta manera no se depende del aporte de aire (oxígeno) para el control de temperatura y se optimiza la combustión, además permite la incineración de residuos con un mayor poder calorífico reduciendo el riesgo de dañar los mecanismos del horno.

#### 4.1.2. Lechos fluidizados

La principal característica de este método es que para ser usado con residuos heterogéneos se les debe realizar un pretratamiento asegurando que se cumpla con cierto tamaño, para cumplir también se puede realizar una recogida selectiva dependiendo del caso. De esta manera se asegura una combustión controlada y una distribución uniforme de temperatura.

El sistema consiste en una cámara de combustión vertical que en su base presenta un lecho de algún material como arena o ceniza (inerte), este lecho se ubica sobre una parrilla o placa la cual se



presentes es que se evita una combustión inmediata. En cambio, se descompone el carbono de los residuos en syngas o gas de síntesis y cenizas.

La pirólisis puede ser tomada como un proceso independiente o un subproceso de la gasificación. Este proceso térmico se realiza en total ausencia de oxígeno idealmente y con temperaturas entre los 400 y 1200 [°C], es en este proceso que se genera el gas de síntesis.

El syngas está compuesto principalmente por, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrógeno. Este puede ser quemado y transformado en energía mediante el uso de turbinas de vapor.

#### 4.1.3.1. *Etapas del proceso de Gasificación*

- Secado

La etapa de secado como su nombre lo indica consiste en calentar los RSU evaporando la mayor cantidad de humedad contenida posible, este proceso es importante para mejorar el poder calorífico de los residuos a incinerar, se lleva a cabo con temperaturas cercanas a 100°C y más. Generalmente las plantas de incineración trabajan con humedades no mayores al 20% en peso, cuando la humedad contenida es muy alta se requiere de un proceso de pre-secado.

- Pirólisis

En esta etapa el objetivo es generar syngas y el residuo carbonoso que en la próxima etapa servirá de combustible para generar el calor necesario para las etapas anteriores. Consiste en la descomposición de los residuos exponiéndolos a temperaturas entre los 400 y 1200 [°C] en un ambiente cerrado sin oxígeno, así se evita la combustión de los residuos. Dependiendo de la temperatura y el tiempo de permanencia es que se controla la producción de alquitranes e hidrocarburos, de esta manera si el tiempo de permanencia y la temperatura son menores se genera una mayor cantidad de estos. En este proceso se busca descomponer las moléculas de hidrocarburos pesados generando moléculas de gas más pequeñas, evitando reacciones químicas importantes con cualquier agente gasificante.

- Combustión

Esta etapa se lleva a cabo entre 700 y 1300 [°C], su objetivo es generar una combustión incompleta del residuo carbonoso, esto es posible controlando la concentración de oxígeno. Gracias a estas reacciones se produce el calor necesario para las etapas anteriores de pirólisis y secado, los principales productos son  $CO$  y  $CO_2$ . Si la concentración de oxígeno

aumenta se elevan las temperaturas de pirólisis y secado, aumentando la temperatura del gasificador y también las pérdidas.

- Reducción

Se producen reacciones en paralelo a la etapa de combustión, la principal característica es que se gasifica el residuo carbonoso reaccionando principalmente con el  $CO_2$  y  $H_2O^{gas}$ , esta etapa es la más compleja de todas debido a la cantidad de reacciones y su naturaleza. Se lleva a cabo entre 600 y 1000 [°C]. Los principales productos son el gas de síntesis y cenizas. Para obtener los resultados esperados en esta etapa es importante estudiar el residuo carbonoso que se va a reducir, ya que características como la porosidad y reactividad del residuo afectaran de manera directa la naturaleza de las reacciones y por ende los productos junto con sus concentraciones.

## 5. Posibles plantas incineradoras por implementar en Chile

A la actual fecha solo existe un proyecto de este tipo ingresado en el servicio de evaluación ambiental, con tipología evaluación de impacto ambiental (EIA). Existe otro proyecto relacionado al tema, pero no ha sido ingresado al sistema para su evaluación y no se posee información concreta ni detalles.

### 5.1. WTE Araucanía

A la fecha la planta “WTE Araucanía” se encuentra en proceso de calificación en el SEIA. Como su nombre lo indica, esta sería construida en la región de la Araucanía, específicamente en la ciudad de Lautaro.

Esta planta propone una tecnología basada en hornos de parrilla con una capacidad de tratamiento nominal anual aproximadamente de 200.000 toneladas en residuos sólidos domiciliarios y asimilables. Como característica principal se destaca la transformación de energía térmica previa incineración de residuos (600 [ton/día]) a eléctrica, su capacidad de generación nominal estimada es de 15 [MW], de los cuales 1 [MW] sería utilizado para el funcionamiento de la planta, dejando 14 [MW] libres para inyectar al sistema eléctrico nacional (SEN). La inversión estimada es de 80 millones de dólares.

#### 5.1.1. Información general

La planta se ubicaría 28 [km] al NE de la ciudad de Temuco, en el Predio El Pino Lote B-1, comuna de Lautaro.

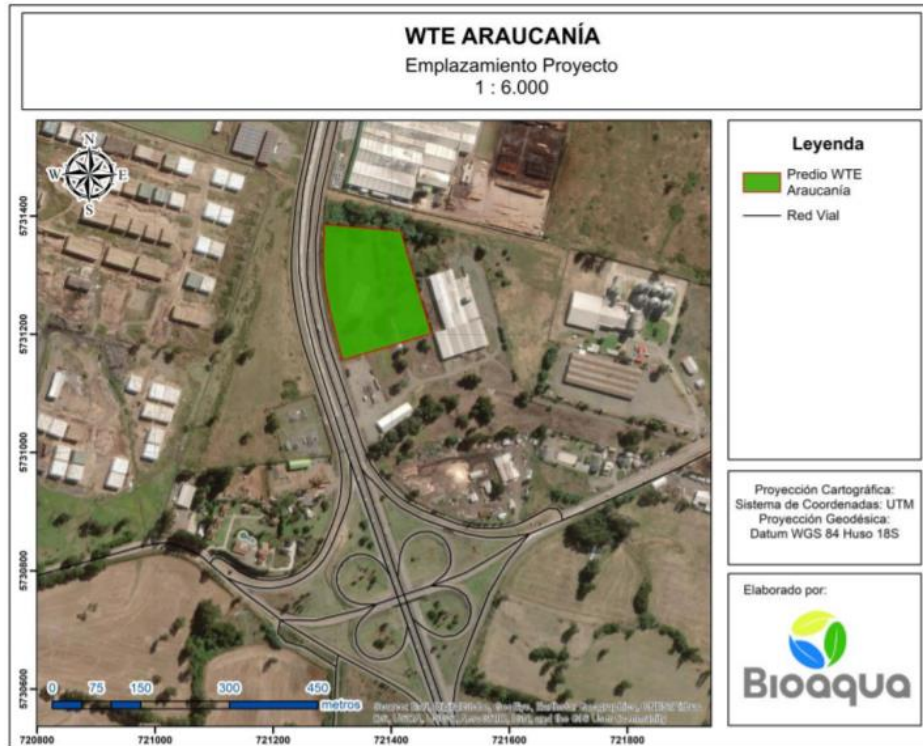


Figura 5.1 Imagen localización potencial planta WTE Araucanía (Bioaqua, 2017, págs. 8, C, 1)

La ubicación fue elegida debido a su cercanía a la subestación eléctrica (200[m]) y fácil acceso desde ruta 5 conectando con varias comunas de la IX región.

El tipo de proyecto corresponde, haciendo referencia a los literales “o.5” y “c” del artículo 10 de la Ley N° 19.300 a:

- Central generadora de energía mayor a 3 [MW]
- Plantas de tratamiento y/o disposición de residuos sólidos de origen domiciliario, rellenos sanitarios, estaciones de transferencia y centros de acopio y clasificación que atiendan a una población igual o mayor a cinco mil (5.000) habitantes

Con respecto a la vida útil del proyecto, se considera indefinida. Independiente de los planes de cierre dispuestos en el EIA.

### 5.1.2. B Descripción de procesos

De manera general se habla de 2 grandes procesos que tienen cabida en distintas zonas de la planta:

- Tratamiento de RSM
- Valorización energética y manejo de residuos del proceso

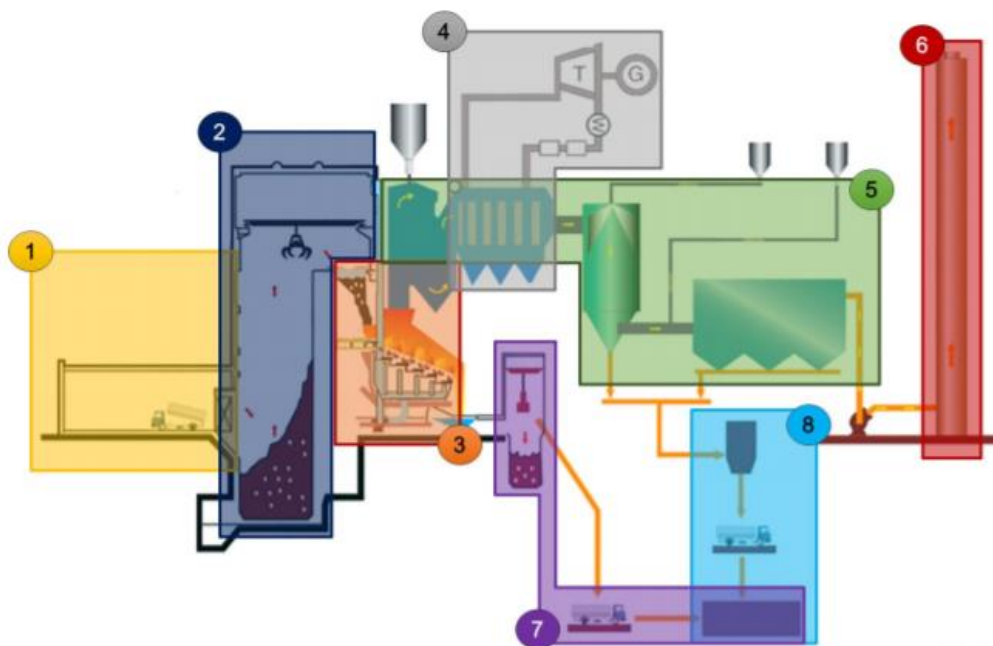


Figura 5.2 Diagrama Zonas clasificadas por proceso en planta WTE. (Bioaqua, 2017, págs. 4, C, 4)

De la figura 5.2 se clasifica las zonas: 1 y 2. Como tratamiento de RSM y las zonas: 3, 4, 5, 6, 7 y 8. Como valorización energética y manejo de residuos del proceso.

A continuación, se describen las actividades a realizar en cada zona:

| Clasificación                     | Zona | Descripción actividades                                 |
|-----------------------------------|------|---|
| Tratamiento                       | 1    | Recepción, descarga, y salida de vehículos con residuos |
|                                   | 2    | Almacenamiento de residuos a incinerar                  |
| Valorización y Manejo de residuos | 3    | Incineración  |
|                                   | 4    | Producción de vapor y generación de energía             |
|                                   | 5    | Tratamiento de gases de combustión                      |
|                                   | 6    | Emisión de gases por chimenea                           |
|                                   | 7    | Manejo de ceniza de fondo                               |
|                                   | 8    | Manejo de ceniza volante                                |

Tabla 5.1 Descripción de actividades por zona en planta WTE Araucanía. (Elaboración propia)

A continuación, se describe detalladamente cada proceso y subprocesos.

#### 5.1.2.1. Tratamiento de RSM

El tratamiento que se les da a los RSM consiste en recibir y descargar estos en sitios acondicionados cumpliendo con la normativa vigente, en este primer proceso se controla el peso, origen y tipo de residuo que transporta el camión entre otros. Luego los residuos pasan al foso de recepción, aquí se

compactan por acción de la gravedad y los residuos son homogenizados por medio de dos puentes grúa encargados también de alimentar el horno. Adicionalmente en el foso se recupera el lixiviado.

#### 5.1.2.1.1. Recepción y descarga de residuos

Se realizará un estricto control de ingreso (camiones) y seguimiento de los residuos en la planta, detallando y registrando los siguiente:

- Fecha de ingreso
- Patente vehículo
- Nombre chofer
- Tipo de vehículo (municipal o particular)
- Tipo de residuo que transporta
- Origen de los residuos
- Peso vehículo con carga
- Peso vehículo sin carga

(Bioaqua, 2017, págs. 8, C4)

Tras realizar el control de ingreso y seguimiento, los residuos pasan a la zona de descarga directa al foso de recepción.

A continuación, se presenta una imagen detallada de la zona de recepción y descarga de residuos:

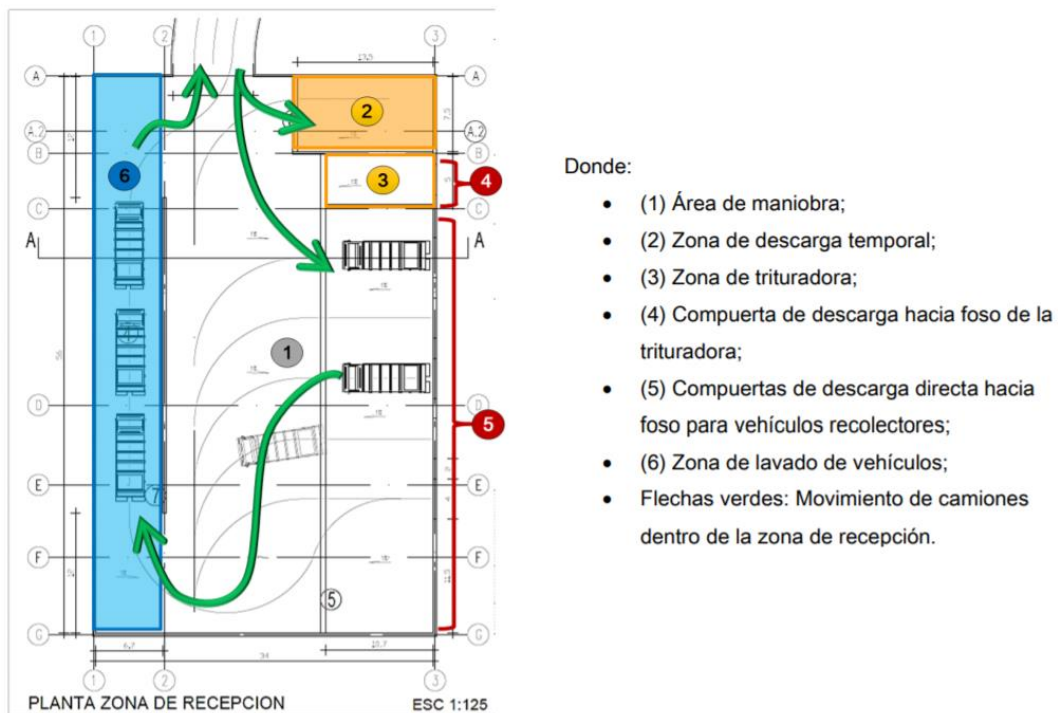


Figura 5.3 Diagrama Zona de recepción planta WTE Araucanía, (Bioaqua, 2017, págs. 9, C, 4)



*Figura 5.4 Foto Referencial zona de recepción WTE. (Bioaqua, 2017, págs. 14, C2)*

La zona cuenta con suficiente espacio para que los camiones descarguen los residuos y sean lavados, sin necesidad de hacer fila fuera de la planta.

#### 5.1.2.1.2. Foso de recepción

El foso de recepción tiene la característica de ser una estructura cerrada, este sería construido en hormigón e impermeabilizado para descartar infiltraciones futuras. El proceso de impermeabilización incluye utilizar una membrana tipo “Sikaplan WP1120-15HL” o similar, agregar a la mezcla de hormigón aditivo tipo “Sika100” o similar para la obstrucción de poros y capilares y un revestimiento de hormigón tipo “SikaWart 63cl” o similar para proteger al hormigón de posible corrosión química por acidez del lixiviado. (Bioaqua, 2017, págs. 14, C2 )

El foso de recepción cumple 3 objetivos: mezclar los residuos para obtener un residuo homogéneo, acumular en caso de que la recepción de residuos se vea interrumpida (fundamental para no detener el proceso de incineración en la planta) y recuperar el lixiviado.

La mezcla y transporte de residuos en el foso se realizará por medio de 2 puente grúa. Adicionalmente se contempla espacio para clasificar los residuos según su maduración (tiempo en el foso), así se reduce el contenido de humedad del residuo mejorando su calidad como combustible.

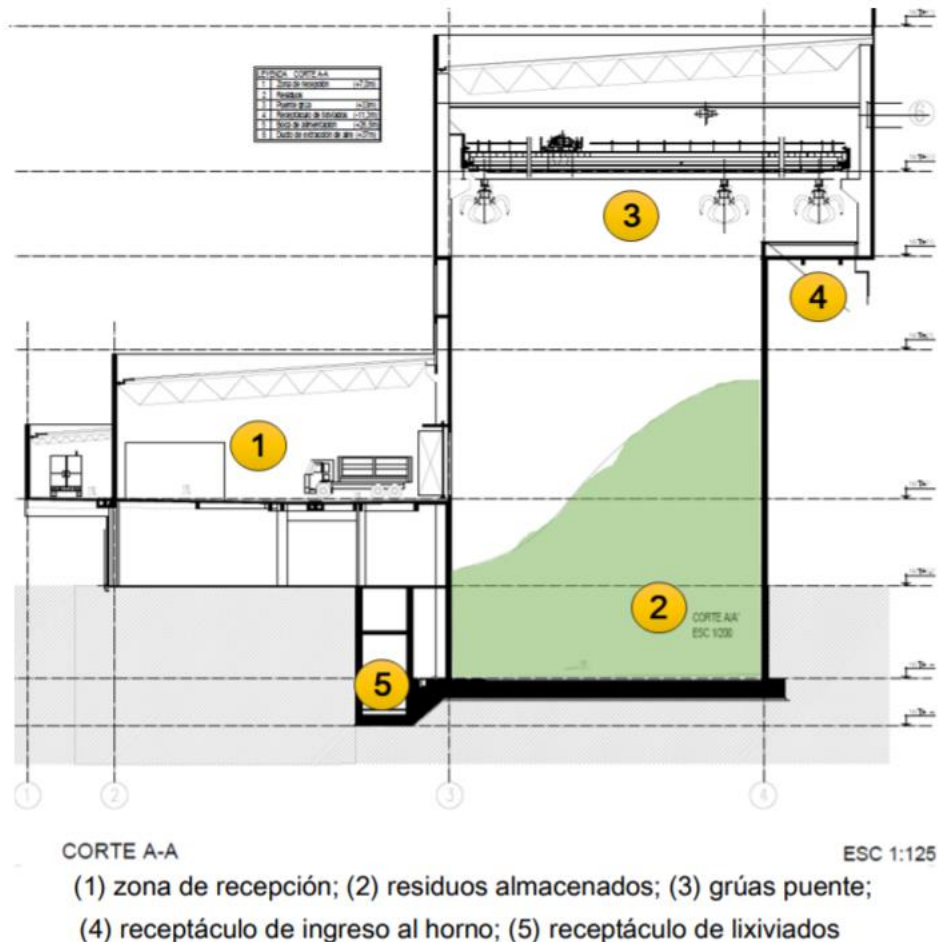


Figura 5.5 Diagrama Foso de recepción en planta WTE España. (Bioaqua, 2017, págs. 16, C2)

Para realizar un correcto manejo de los gases y olores emitidos en el foso, este se mantiene a 100 [Pa] aproximadamente bajo la presión atmosférica. La mezcla de aire y gases contenida es llevada a la caldera para ser usado en la incineración.

#### 5.1.2.1.3. Transporte de residuos a caldera

Mediante el uso del puente grúa los operarios se encargan de llevar los residuos maduros a la boca de alimentación de la caldera. Ya en la entrada un pistón hidráulico se encarga del ingreso de residuos en el horno de parrilla, la velocidad de desplazamiento es regulada por los parámetros operacionales del horno en función de los indicadores de combustión.



*Figura 5.6 Foto Transporte de residuos en foso de recepción WTE China. (Bioaqua, 2017, págs. 17, C2)*

#### 5.1.2.1.4. Recuperación de lixiviados

Los lixiviados generados por compactación en el foso de residuos son dirigidos al receptáculo de lixiviados, la ubicación física de este se observa en la figura 5.5 (5). Posteriormente se redirigen a la planta de tratamiento de RILes (PTR), esta se ubica a un costado de la planta, perpendicular a la ruta 5 sur. Observable de color rojo en el siguiente diagrama.

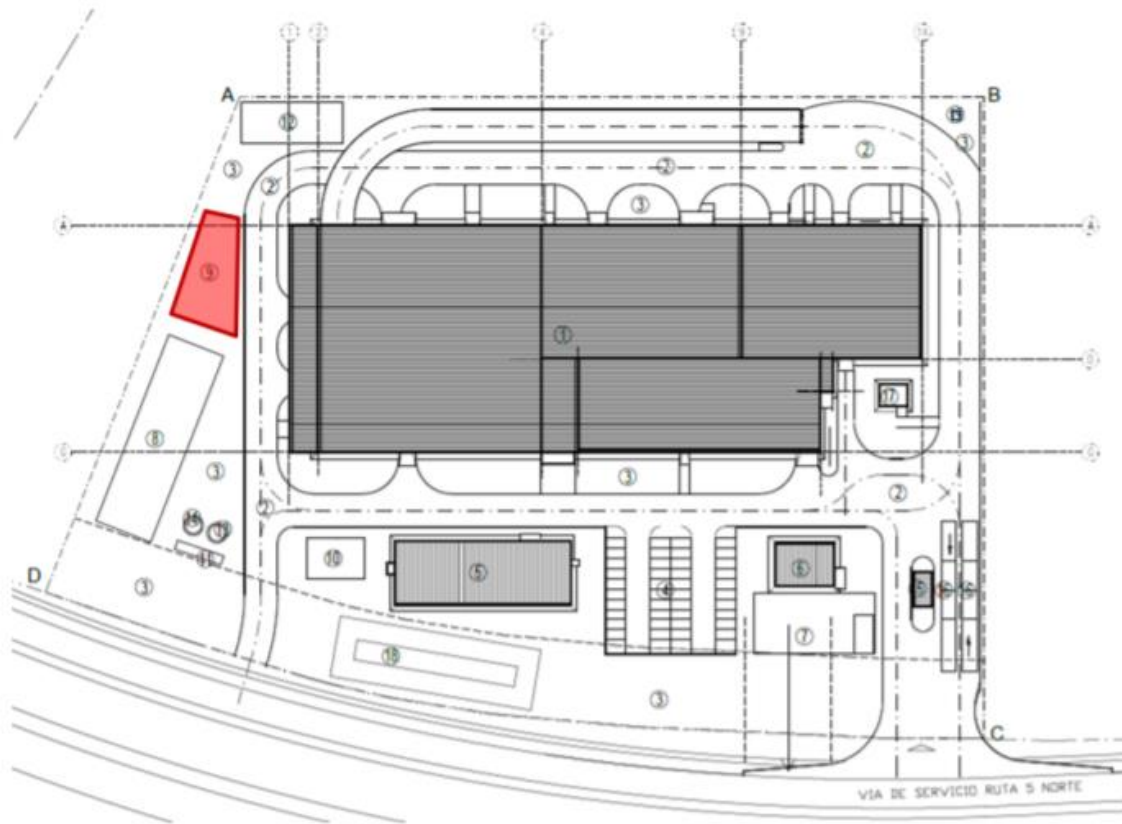


Figura 5.7 Diagrama Ubicación (en rojo) PTR. (Bioaqua, 2017, págs. 18, C2)

#### 5.1.2.2. Valorización energética

El proceso de valorización energética comienza cuando los residuos son llevados a la boca de alimentación del horno, este se debe mantener al menos a  $850^{\circ}\text{C}$  para asegurar una combustión adecuada. En el horno de parrilla se generan gases de combustión a altas temperaturas, estos se aprovechan para generar vapor sobrecalentado y transformar la energía térmica a eléctrica mediante el uso de una turbina de vapor. Esto hace referencia a un simple ciclo Rankine.

Luego los gases de combustión pasan a la zona de tratamiento, esta zona se considera un adicional al proceso de producción, pero cumple un rol fundamental ambientalmente hablando. Al salir de la caldera los gases de combustión contienen concentraciones no permitidas de:

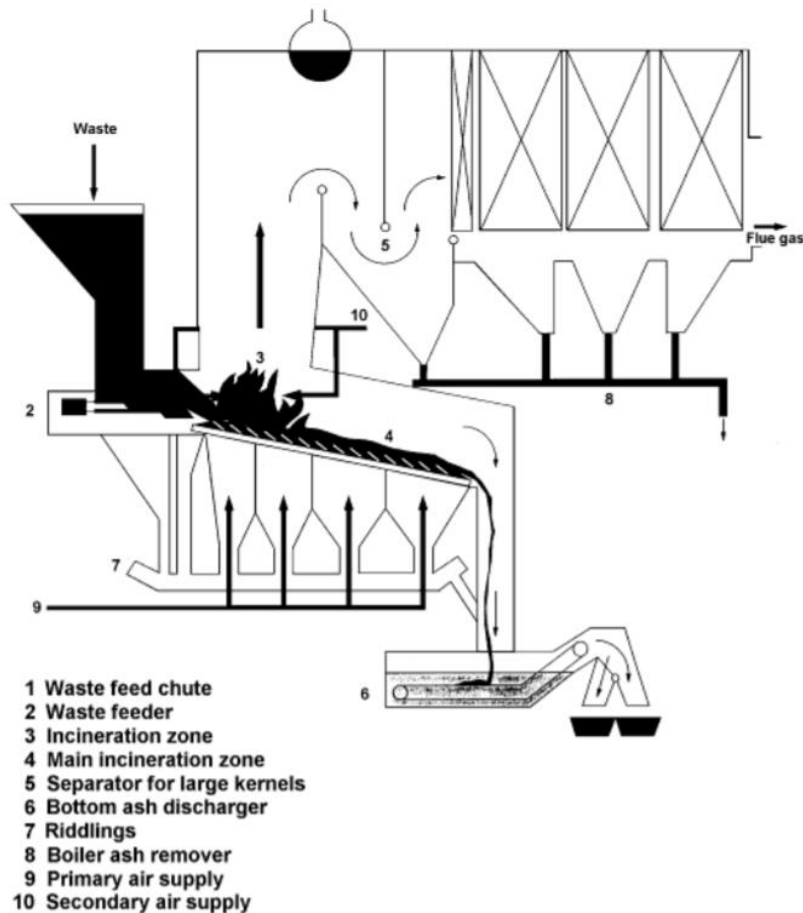
- $\text{NO}_x$
- Dioxinas
- Furanos
- Metales pesados
- Compuestos orgánicos volátiles

Al dejar la zona de tratamiento las emisiones cumplen con los estándares detallados en el Apartado N°3 del Anexo VI de la “Directiva Europea IED 2010/75/EU sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación)”

#### 5.1.2.2.1. Incineración

El proceso de incineración de los residuos sin tratamiento previo ocurre en un horno de parrilla, esta es la tecnología más usada actualmente por plantas WTE con una presencia europea de 90%. (Neuwahl, Cusano, Gómez Benavides, Holbrook, & Roudier, 2019)

Como se comenta en el punto 4.1.1. los procesos de puesta en marcha y detención se deben manejar de manera cuidadosa, ya que es cuando el proceso está más susceptible a contaminar. Esto debido a que el horno no ha alcanzado su temperatura mínima de operación ( $850^{\circ}\text{C}$ ), como medida preventiva se utilizan quemadores auxiliares para elevar la temperatura y asegurar un tiempo de residencia de al menos 2[s]. Alcanzadas las condiciones de operación el horno empieza a recibir los residuos, estos al ser incinerados permiten el funcionamiento autónomo estable del horno y los quemadores auxiliares se apagan.



*Figura 5.8 Diagrama horno de parrilla tipo. (Neuwahl, Cusano, Gómez Benavides, Holbrook, & Roudier, 2019, pág. 37)*

La secuencia de incineración ocurre de la siguiente manera:

- (1) Ingreso de residuos en la boca de alimentación.
- (2) Alimentación (residuos) mediante un pistón hidráulico.
- (3) Secado de residuos:

Esta fase ocurre al inicio de la zona de incineración, los residuos eliminan la humedad restante debido a la alta temperatura, esto permite mejorar su combustión.

- (9 y 10) Aire primario y secundario:

Entre la parrilla de incineración desde abajo es administrado aire (primario), este se usa como principal fuente de O<sub>2</sub> permitiendo que la combustión se lleve a cabo y arrastra los residuos que caen entre las parrillas o rodillos. Para asegurar una combustión completa se inyecta aire (secundario) directamente sobre los residuos durante la combustión, esto permite que el O<sub>2</sub> se mezcle de forma exitosa con los gases.

#### 5.1.2.2.2. Producción de vapor y generación de energía

Para producir el vapor necesario en el ciclo Rankine se realiza un traspaso de energía térmica, desde los gases de combustión hacia el agua que ingresará a la caldera acuotubular (ingresará a 105°C y 40 [bar] aprox).

Se eligió una caldera acuotubular sobre una pirotubular por las características del vapor sobre calentado a 40 [bar] y los flujos másicos con los que se trabajará. La caldera acuotubular básicamente consiste en un ramal de tuberías, por su interior pasa el agua que se quiere calentar y por su exterior pasan los gases de combustión. Tendrá un diseño a contraflujo permitiendo establecer 3 zonas de calentamiento (a, b y c). A continuación, se presenta un diagrama de caldera, detallando temperaturas, zonas y dirección de los flujos:

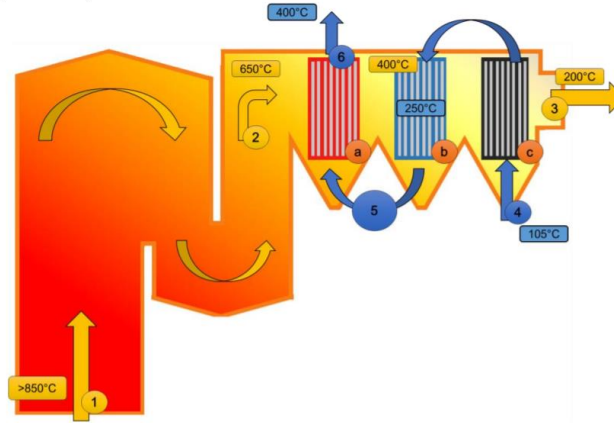


Figura 5.9 Diagrama Paso de gases de combustión por caldera acuotubular. (Bioaqua, 2017, págs. 22, C4)

Las zonas corresponden a:

- (a) Zona de sobrecalentador, aquí el vapor saturado es sobrecalentado hasta la temperatura de operación (400°C).
- (b) Zona del evaporador, aquí el agua pasa de estado líquido a gaseoso. Considerando una presión de 40[bar] la temperatura será de 250°C aprox.
- (c) Zona del economizador, en esta zona se elevará la temperatura del agua que ingresa al sistema mejorando el rendimiento, además el economizador se encarga de asegurar que los gases de combustión pasen rápidamente de 400 a 200 °C (fundamental para el buen manejo de gases de combustión).

Se estima que el flujo de vapor será de 65[Ton/Hr] a 400°C y 40 [bar] de presión. Por lo tanto, de la caldera saldrá vapor sobrecalentado con energía interna a razón de 52 [MJ/s].

El vapor pasará por la turbina haciéndola girar en su eje y mediante un generador (encargado de transformar el movimiento mecánico en energía eléctrica) se inyectaran 14 de los 15 [MW] de energía eléctrica generados al sistema (1 [MW] será utilizado para el funcionamiento de la planta). De primordial importancia es la expansión del vapor al pasar por la turbina, esto asegura que se mantenga como vapor saturado y no genere mayor desgaste o fallas en los álabes de la turbina y carcasa.

El vapor ya expandido pasará por un proceso isobárico en el condensador, liberando el excedente de calor hasta llegar a vapor saturado (con esto se busca realizar la siguiente compresión en fase líquida). Finalmente se utiliza una bomba para elevar la presión del fluido (40 [bar]) y empezar el ciclo nuevamente pasando por la caldera.

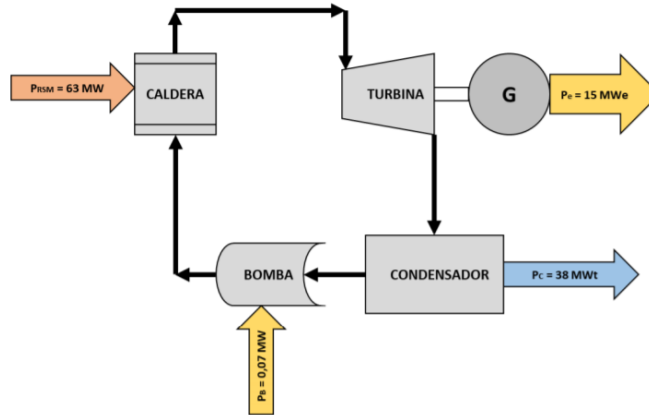


Figura 5.10 Diagrama Ciclo Rankine en planta WTE Araucanía. (Bioaqua, 2017, págs. 21, C4)

### 5.1.2.2.3. Tratamiento de gases de combustión

#### Dioxinas y Furanos

En su paso por la caldera (economizador) los gases de combustión pasan rápidamente de 400°C a 200°C, esto es planeado para prevenir la formación de dioxinas y furanos (compuestos altamente tóxicos), al igual que durante el procedimiento de encendido del horno se cuenta con quemadores auxiliares encargados de estabilizar la temperatura hasta 850°C y así evitar pasar por este rango de temperatura (200°C - 400°C) durante un tiempo mayor. Inclusive se asegura un tiempo de residencia de 2 [s] para los gases de combustión, esto hace referencia a la destrucción térmica de dioxinas y furanos.

Para mitigar aún más la presencia de dioxinas y furanos, además de otros metales pesados Se utilizará carbón activado en polvo, este es añadido directamente a los gases de combustión. A continuación, se muestra una representación gráfica simplificada de cómo actúa:

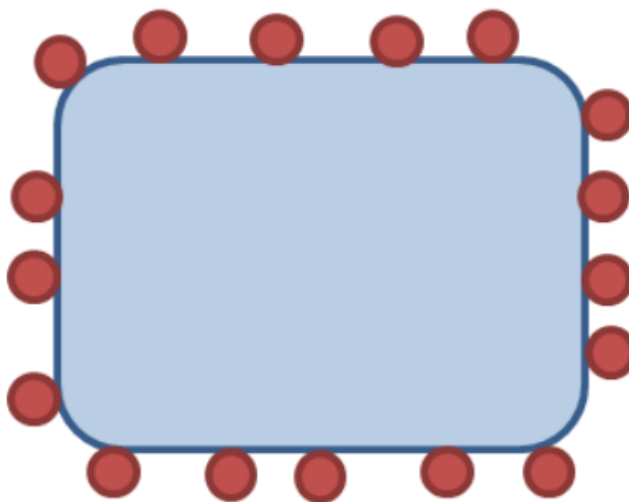


Figura 5.11 Imagen representación gráfica “acción de carbón activado”. (Bioaqua, 2017, págs. 29, C4)

Donde:

- Círculos rojos representan a dioxinas, furanos y otros metales pesados.
- Rectángulo azul representa partícula de carbón activado.

Gracias a su porosidad, el carbón activado genera fuerzas atractivas necesarias para adsorber las toxinas, luego es filtrado en el “filtro de mangas” y retirado como “ceniza volante”.



Figura 5.12 Fotografía Molécula de carbón activado en polvo (PAC). (LDXsolutions)

## Óxidos de nitrógeno

Como primera medida ante la generación de NOx se propone mantener un suministro de oxígeno bien distribuido durante el proceso de incineración, con esto se busca generar combustión por etapas marcadas, evitando combustión a temperaturas inferiores.

Directamente dentro del sistema de control de emisiones se propone inyectar amoníaco (al 25%), esta es la primera medida de control en el proceso y tiene lugar de manera inmediata tras la combustión.

Este proceso se conoce como Reducción selectiva no catalítica (RSNC).

La RSNC consiste en la reducción química de la molécula de NOx a nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O). Un agente reductor (reactivo), a base de nitrógeno, tal como el amoníaco o la urea, se inyecta en el gas después de la combustión. (U.S. Environmental Protection Agency, 2002)

## Gases Ácidos

Para tratar los gases ácidos se utilizaría un “Scrubber” o lavador de gases semi seco, su función sería la de neutralizar los gases ácidos mediante la adición de cal en solución acuosa. La cal es reconocida para tratamiento de gases ácidos, en particular gases con:

- Fluor.
- Cloro.
- Azufre.

(Calcinor)

En la siguiente imagen se observa el funcionamiento de un “Scrubber” similar al que será usado en la planta. Cualquier presencia de agua se mantendrá en fase gaseosa y será eliminado por la chimenea al final del proceso de tratamiento.

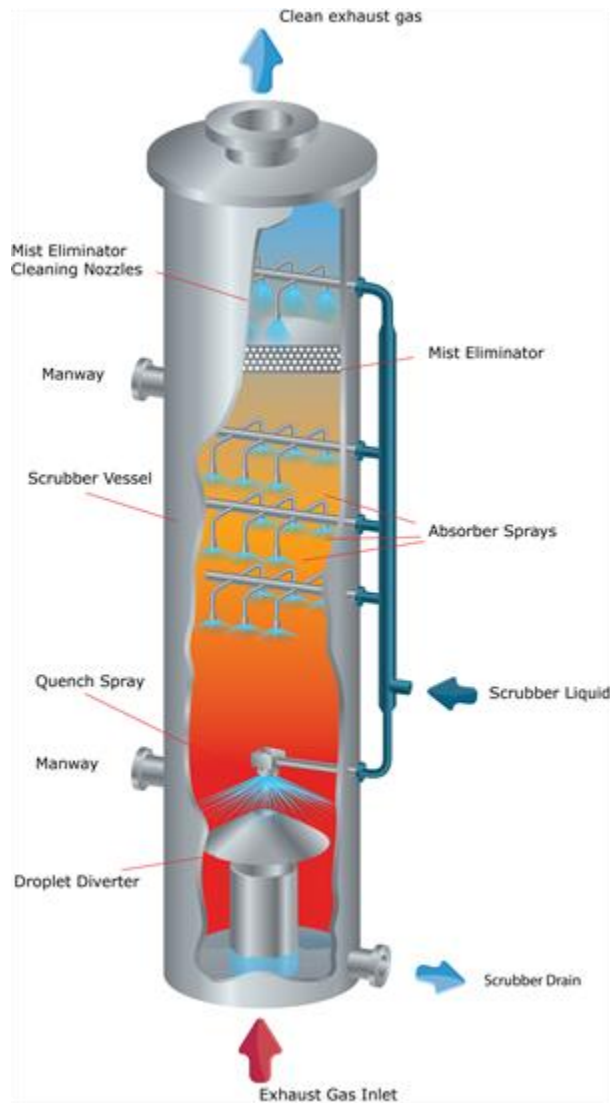


Figura 5.13 Diagrama Producto “Scrubber”. (The Spray Nozzle people)

Dónde:

- (1) Entrada de gas contaminado.

- (2) Inyectores por dónde se rociará el gas con la cal.
- (3) Salida de gas limpio.
- (4) Salida de líquido utilizado en el limpiador.

Cómo se mencionó anteriormente, en el proyecto se contempla un “scrubber” del tipo semi seco, así en vez de contemplar un residuo líquido en (4), se captaran los residuos sólidos para posteriormente ser tratados como ceniza de fondo.

### **Material particulado**

El material particulado generado durante todo el proceso de incineración y tratamiento de gases de combustión será recolectado en el filtro de mangas. El tratamiento que se le dará al material particulado será igual al de ceniza volante y este será tratado como tal. En el punto 5.1.2.2.4. En el apartado de “Ceniza volante” se explica de manera detallada el manejo.

#### 5.1.2.2.4. Manejo de ceniza

Tras el proceso de incineración se generan dos tipos de ceniza, a continuación, se definen y explica su manejo:

### **Ceniza de fondo**

Los residuos llamados “ceniza de fondo”, son el remanente de los desechos sólidos que no fueron incinerados en el horno durante la combustión. Está compuesta principalmente por:

- Vidrio.
- Metal.
- Cerámica.
- Material orgánico no incinerado (char).
- Partículas inorgánicas.

El manejo de estos residuos consistiría en reunirlos en el fondo del horno y en la caldera recuperadora de calor. Inmediatamente las cenizas colectadas pasan por un baño de agua para disminuir la temperatura y luego se procede a separar los metales ferrosos disponiéndolos en un contenedor para posteriormente ser entregado a un gestor/valorizador de chatarra autorizado.

A continuación, se emplea apoyo gráfico para explicar brevemente el proceso de extracción de calor en las cenizas de fondo.

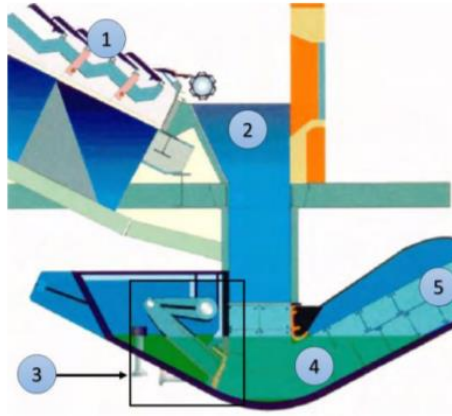


Figura 5.14 Diagrama Baño de agua para ceniza de fondo. (Bioaqua, 2017, págs. 38, C4)

En la imagen se observa el procedimiento de disminución de temperatura para las cenizas, dónde:

- (1) Parrilla del horno.
- (2) Tolva de recepción de ceniza de fondo desde la parrilla.
- (3) Prensa hidráulica.
- (4) Baño de agua.
- (5) Cinta transportadora.

Las cenizas provenientes del proceso de incineración pasan por la tolva de recepción (2) y caen al fondo, dónde transfieren su energía térmica al agua por contacto (4), luego una prensa hidráulica (3) empuja las cenizas hasta la cinta transportadora (5).

Tras este proceso se inicia la separación de metales ferrosos, el resto de ceniza de fondo pasará a un foso de acopio temporal diseñado para almacenar la producción de hasta 9 días de cenizas. Esta medida fue propuesta pensando en posibles problemas que pueda tener la empresa autorizada para transportar la ceniza hasta un sitio de disposición final.

### **Ceniza volante**

Es el residuo sólido y condensable que deja la zona de incineración suspendido en los gases de combustión. Este residuo es una mezcla de finas partículas con:

- Compuestos de metales.
- Químicos orgánicos.
- Ácido condensado en la superficie de partículas.

Este residuo es considerado peligroso, la real toxicidad depende de los residuos incinerados, se deben realizar estudios específicos para controlar y determinar su nivel de peligrosidad.

Dentro del plan se considera capturar las cenizas volantes generadas junto con otros residuos tóxicos mediante el filtro de mangas o en inglés “bag filter”. La siguiente imagen permite explicar su funcionamiento general:

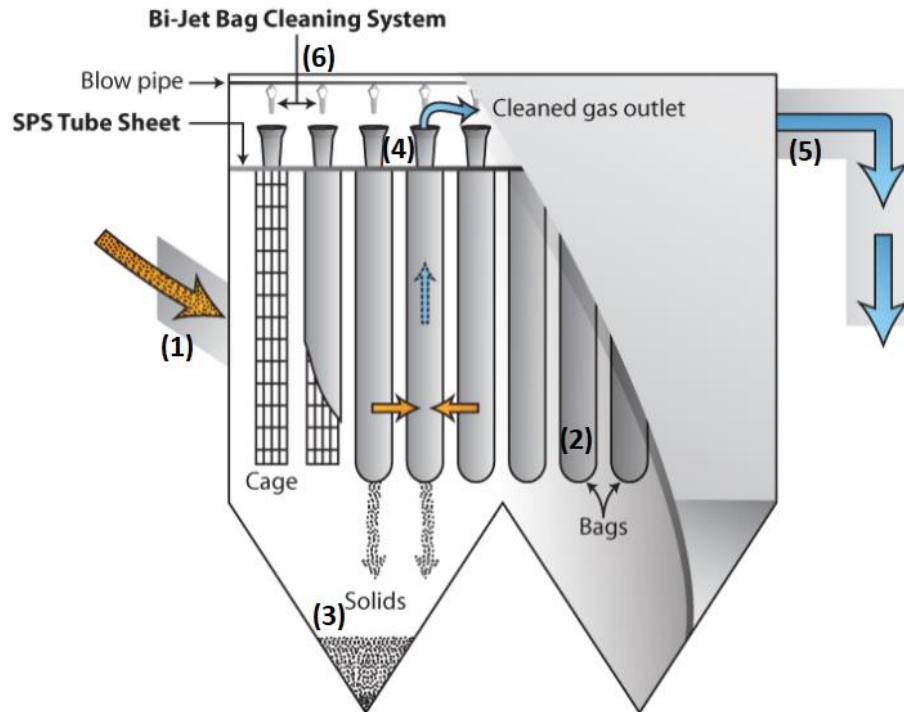


Figura 5.15 Diagrama funcionamiento de Bag filter, (REDECAM productos)

En el diagrama se observa el procedimiento de filtrado y colección de las cenizas volantes, dónde:

- (1) Entrada de gases de combustión pretratados.
- (2) Bolsas o mangas (filtros).
- (3) Acumulación de cenizas volantes.
- (4) Sello "Simple pressure sistema" (SPS).
- (5) Salida de gases limpios.
- (6) Sistema de limpieza mangas "Bi-jet".

Luego de los gases de combustión haber sido tratados y enfriados ingresan al filtro de mangas (1), este contiene varias mangas (2) que por un lado permiten sólo el paso de "gas limpio" a través de la membrana, y gracias a su diseño mantienen en su superficie exterior los residuos sólidos, en este caso las cenizas volantes. El sello SPS (4) (Imagen#) cumple la función de dirigir el gas de manera vertical hasta la salida e impide el ingreso de ceniza a la cámara superior del filtro.

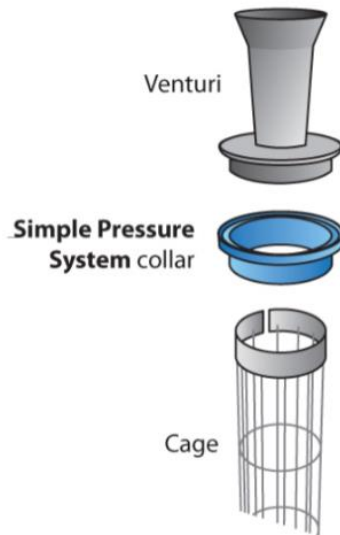


Figura 5.16 Diagrama Sello SPS. (REDECAM productos)

Su diseño asegura ser lo suficientemente hermético para evitar el ingreso de partículas no deseadas a la cámara superior.

Tras haber “limpiado” el gas de combustión llega un punto en que las mangas se encuentran saturadas un sensor detecta esto y envía una señal para cortar el suministro de gas contaminado, luego se procede a inyectar aire a presión en el terminal “Venturi” mediante el sistema de limpieza “Bi-jet”.

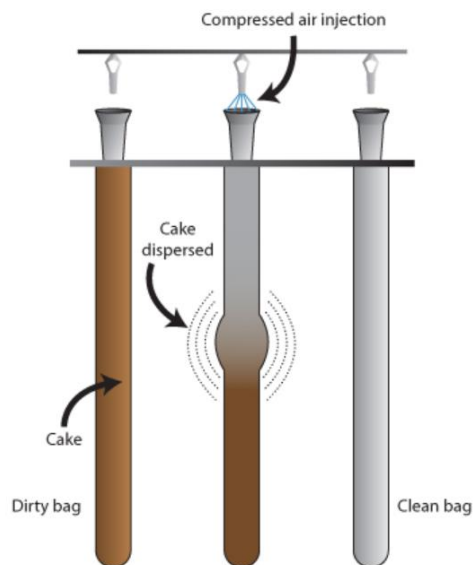


Figura 5.17 Diagrama sistema limpieza Bi-jet. (REDECAM productos)

De esta manera se elimina de la superficie de las mangas los restos de ceniza volante y se recuperan en la base del filtro de mangas (3).

Luego de haber recuperado las cenizas volantes, estas serán llevadas a un silo dispuesto especialmente para almacenarlas temporalmente, este poseería una capacidad de 30 días en operación en caso de no ser vaciado por la empresa autorizada debido a algún contratiempo. Es importante destacar que el silo poseerá una conexión directa con el vehículo dispuesto para su vaciado. Así se evitan emisiones no deseadas al medio ambiente y contacto con los trabajadores.

Se estima una generación diaria de 18 toneladas de ceniza volante.

### 5.1.3. Concentración de emisiones a la atmosfera durante condiciones de operación normal

Se considerará para este informe las emisiones provenientes sólo del proceso de valorización energética de residuos municipales, dejando de lado el transporte de residuos, puesta en marcha y detención de la caldera.

Tras haber realizado el tratamiento a los gases de combustión, estos saldrán por la chimenea a una velocidad de 16 [m/s] y 160 °C de temperatura aprox. (Bioaqua, 2017, págs. 33, C4)

A modo comparación se realizaron tres gráficos comparativos relativo a las concentraciones de cada compuesto presente en los gases de combustión (GC) y las concentraciones permitidas en la normativa chilena.

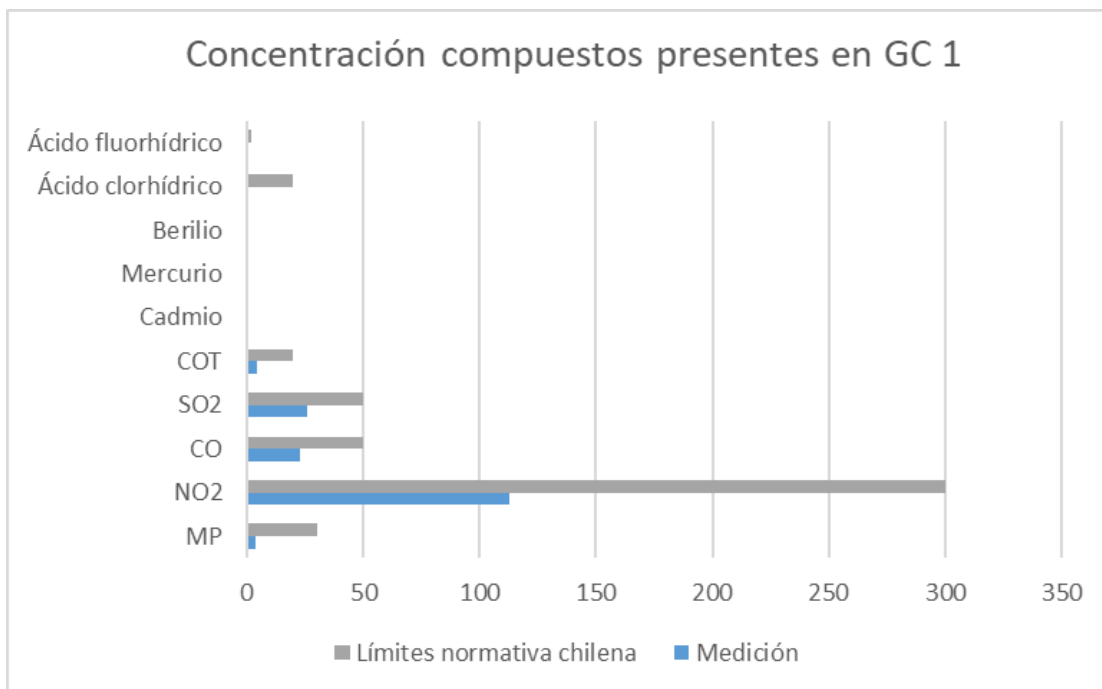


Figura 5.18 Gráfico Concentración compuestos presentes en GC 1. (Elaboración propia)



Figura 5.19 Gráfico Concentración compuestos presentes en GC 2. (Elaboración propia)

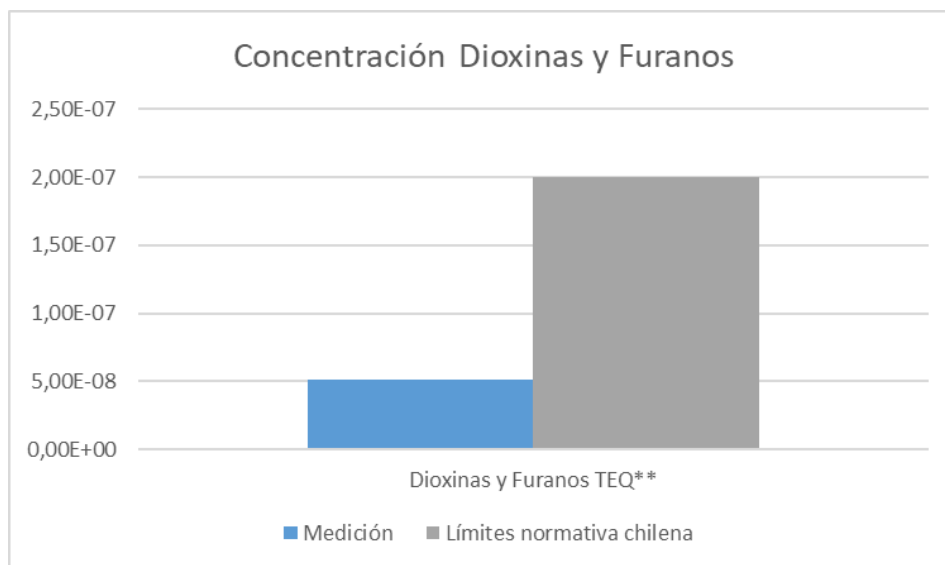


Figura 5.20 Gráfico Concentración dioxinas y furanos presentes en GC 1. (Elaboración propia)

A continuación, se presenta la información oficial a la fecha presentada por “WTE Araucanía” para evaluación ambiental. En la siguiente tabla se detallan las concentraciones de los compuestos

presentes en los gases de combustión tratados (GCT), la información va acompañada de los límites establecidos por la Unión Europea y por la normativa vigente en Chile:

| Compuesto                                | Medición referencial                  |                  | Límites Unión Europea                |                  | Límites DS29/2013                    |
|--|---------------------------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|
|  | mg/Nm <sup>3</sup>                    |                  | mg/Nm <sup>3</sup>                   |                  | mg/Nm <sup>3</sup>                   |
| MP                                       | 3,8                                   |                  | 10                                   |                  | 30                                   |
| NO <sub>2</sub>                          | 113                                   |                  | 200                                  |                  | 300                                  |
| CO                                       | 23                                    |                  | 50                                   |                  | 50                                   |
| SO <sub>2</sub>                          | 26                                    |                  | 50                                   |                  | 50                                   |
| COT                                      | 4,3                                   |                  | 10                                   |                  | 20                                   |
| Cadmio (Cd)                              | 0,00095                               |                  | 0,05                                 |                  | 0,1                                  |
| Mercurio (Hg)                            | 0,003                                 |                  | 0,05                                 |                  | 0,1                                  |
| Berilio (Be)                             | No normado                            |                  | No normado                           |                  | 0,1                                  |
| Plomo (Pb)*                              | 0,01095                               | Total:<br>0,013  | 0,071                                | Total:<br>0,073  | 1                                    |
| Zinc (Zn)*                               | 0,0001045                             |                  | 0,0006746                            |                  |                                      |
| Arsénico (As)*                           | 0,00085                               | Total:<br>0,0149 | 0,005                                | Total:<br>0,0963 | 1                                    |
| Cobalto (Co)*                            | 0,0009025                             |                  | 0,006                                |                  |                                      |
| Níquel (Ni)*                             | 0,0068                                |                  | 0,044                                |                  |                                      |
| Selenio (Se)                             | 0,003181                              |                  | 0,021                                |                  |                                      |
| Telurio (Te)                             | 0,003181                              |                  | 0,021                                |                  |                                      |
| Antimonio (Sb)*                          | 0,0342                                | Total:<br>0,052  | 0,221                                | Total:<br>0,335  | 5                                    |
| Cromo (Cr)*                              | 0,0106                                |                  | 0,068                                |                  |                                      |
| Manganeso (Mn)*                          | 0,0063                                |                  | 0,041                                |                  |                                      |
| Vanadio (V)*                             | 0,00075                               |                  | 0,005                                |                  |                                      |
| Ácido clorhídrico (HCl)                  | 0,0236                                |                  | 10                                   |                  | 20                                   |
| Ácido fluorhídrico (Hf)                  | 0,0001                                |                  | 1                                    |                  | 2                                    |
| Benceno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) | No normado                            |                  | No normado                           |                  | 5                                    |
| Dioxinas y Furanos TEQ**                 | 5,1E-08<br>(0,05 ng/Nm <sup>3</sup> ) |                  | 1,0E-07<br>(0,1 ng/Nm <sup>3</sup> ) |                  | 2,0E-07<br>(0,2 ng/Nm <sup>3</sup> ) |

(\*) Valor individual obtenido por ponderación

(\*\*) 1TEQ: Factor tóxico equivalente para mamíferos de la Organización Mundial de Salud de 1998.

*Tabla 5.2 Concentraciones de compuestos presentes en GCT. (Bioaqua, 2017, págs. 34, C4)*

Como se puede observar en la tabla, ninguna de las concentraciones excede la norma europea, la cual es más severa que la normativa chilena.

## 6. Emisiones WTE vs Rellenos sanitarios

En este punto se estimaran las emisiones provenientes del tratamiento de RSU en plantas incineradoras y los rellenos sanitarios actualmente utilizados en Chile. Esta estimación se realizará restando las emisiones captadas de metano por algunos rellenos que cuentan con la tecnología según lo informado en el INGEI Chile serie 1990-2016. Debido a que no existe información clara sobre técnicas empleadas, ni detalles para el destino del metano captado en RS (quemado en antorcha, quemado en caldera, quemado en motores o quemado en turbinas) se asumirá que no existen emisiones relacionadas al tratamiento del metano y tampoco absorciones equivalentes a la energía eléctrica generada.

### 6.1. Emisiones de compuestos

#### 6.1.1. Planta incineradora

Con respecto a las emisiones provenientes plantas incineradoras, se expondrán las emisiones oficiales presentadas por la empresa WTE Araucanía para la evaluación de su proyecto en el SEIA. Cabe destacar que el proceso de obtención de datos proviene de una modelación basada en la normativa europea, esto es una medida conservadora, ya que las concentraciones esperadas estarían muy por debajo del límite europeo. Una comparación de las concentraciones esperadas y los límites normativos (europeos y chilenos) fue realizada en el punto 5.1.3.

La emisión oficial informada al SEIA de cada compuesto presente en los GC se detalla en la siguiente tabla:

| Compuesto                                | Concentración*                        | Emisión  |          |
|--|---------------------------------------|--|----------|
|  | (Unión Europea)<br>mg/Nm <sup>3</sup> | (Balances Primera Ley y Estequiométrico)<br>kg/h | ton/año  |
| MP                                       | 10                                    | 1,48   | 12,94    |
| NO <sub>2</sub>                          | 200                                   | 29,54  | 258,80   |
| CO                                       | 50                                    | 7,39   | 64,70    |
| SO <sub>2</sub>                          | 50                                    | 7,39   | 64,70    |
| COT                                      | 10                                    | 1,48   | 12,94    |
| Cadmio (Cd)                              | 0,05                                  | 0,0074   | 0,065    |
| Mercurio (Hg)                            | 0,05                                  | 0,0074   | 0,065    |
| Berilio (Be)                             | 0,1                                   | 0,015  | 0,13     |
| Plomo (Pb)                               | 0,071                                 | 0,010  | 0,09     |
| Zinc (Zn)                                | 0,001                                 | 0,00010  | 0,00     |
| Arsénico (As)                            | 0,005                                 | 0,00081  | 0,0071   |
| Cobalto (Co)                             | 0,006                                 | 0,00086  | 0,008    |
| Níquel (Ni)                              | 0,044                                 | 0,0065   | 0,057    |
| Selenio (Se)                             | 0,021                                 | 0,0030   | 0,03     |
| Telurio (Te)                             | 0,021                                 | 0,0030   | 0,03     |
| Antimonio (Sb)                           | 0,221                                 | 0,033  | 0,29     |
| Cromo (Cr)                               | 0,068                                 | 0,010  | 0,089    |
| Manganeso (Mn)                           | 0,041                                 | 0,0060   | 0,053    |
| Vanadio (V)                              | 0,005                                 | 0,00072  | 0,0063   |
| Ácido clorhídrico (HCl)                  | 10                                    | 1,48   | 12,94    |
| Ácido fluorhídrico (HF)                  | 1                                     | 0,15   | 1,29     |
| Benceno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) | 5                                     | 0,74   | 6,47     |
| Dioxinas y Furanos<br>TEQ**              | 0,1<br>(ng/Nm <sup>3</sup> )          | 1,48E-08   | 1,29E-07 |

N: condición normalizada para gases de combustión @ 11% O<sub>2</sub>, seco, 25 °C, 101kPa

\*\*TEQ: valores Toxicidad Equivalente para gases de combustión medidos en ng/Nm<sup>3</sup>

Tabla 6.1 Emisión de compuestos modelada en base a concentración UE. (Romero & Rubbio, 2019)

Para los resultados antes obtenidos se estimó una generación de 65  $[\frac{ton}{hr}]$  de vapor utilizando la caldera alimentada con GC provenientes de la incineración de RSU. Para esto se contempló un flujo de 147.717  $[\frac{m^3}{hr}]$  de GC normalizados a la siguiente condición: 11% O<sub>2</sub>, seco, 25°C, 101[kPa]. Con respecto a la emisión anual, se consideró un funcionamiento sin interrupciones, es decir 8.760 horas anuales.

### 6.1.2. Relleno sanitario

Como se comentó en el punto 3.1.2. los rellenos sanitarios emiten biogás a la atmosfera, este está principalmente compuesto por metano y dióxido de carbono, además de otros gases en menor porcentaje.

|   | <b>CH<sub>4</sub></b> | <b>CO<sub>2</sub></b> | <b>H<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>S</b> | <b>OTROS</b> | <b>BIOGAS 60/40</b> |
|---|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------|---------------------|
| Proporciones % Volumen  | 55 - 70               | 27 - 44               | 1                                     | 3            | 100                 |
| Valor Calórico:<br>MJoule / m <sup>3</sup><br>kCal/m <sup>3</sup> | 35.8<br>8600          | ----<br>----          | 10.8<br>2581                          | 22<br>5258   | 21.5<br>5140        |
| Ignición % en Aire  | 5 - 15                | ----                  | -----                                 | -----        | 6 – 12              |
| Temperatura Ignición °C   | 650 - 750             | ----                  | -----                                 | -----        | 650 – 750           |
| Presión Crítica en MPa  | 4.7                   | 7.5                   | 1.2                                   | 8.9          | 7.5 – 8.9           |
| Densidad Nominal g/l  | 0.7                   | 1.9                   | 0.08                                  | -----        | 1.2                 |
| Densidad Relativa   | 0.55                  | 2.5                   | 0.07                                  | 1.2          | 0.83                |
| Inflamabilidad Vol. % Aire  | 5 - 15                | ----                  | -----                                 | -----        | 6 - 12              |

*Tabla 6.2 Características del biogás. (Paredes Rosario & Baca López, 2005, pág. 4)*

Se observa en la tabla anterior que el porcentaje de metano y dióxido de carbono presente en el biogás es entre un 99 y 97%. Por lo tanto, presenta un bajo contenido de gases que no pertenecen a la categoría GEI y se estima un aporte de compuestos igual a “0”.

### 6.2. Emisiones de GEI

Se compararán las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente para los siguientes GEI:

- CO<sub>2</sub>
- CH<sub>4</sub>
- N<sub>2</sub>O

El cálculo de CO<sub>2</sub> equivalente está basado en el potencial de calentamiento global (PCG) de cada gas, en términos simples se le asigna un índice a cada GEI según su capacidad de absorber la radiación infrarroja del sol, a continuación, se entrega una tabla con los valores de PCG para los GEI.

| GEI              | PCG    |
|------------------|--------|
| CO <sub>2</sub>  | 1      |
| CH <sub>4</sub>  | 25     |
| N <sub>2</sub> O | 298    |
| HFC-23           | 14.800 |
| HFC-32           | 675    |
| HFC-125          | 3.500  |
| HFC-134a         | 1.430  |
| HFC-143a         | 4.470  |
| HFC-152a         | 124    |
| HFC-227ea        | 3.220  |
| HFC-236fa        | 9.810  |
| HFC-245fa        | 1.030  |
| HFC-365mfc       | 794    |
| HFC-43-10mee     | 1.640  |
| CF <sub>4</sub>  | 7.390  |
| SF <sub>6</sub>  | 22.800 |

Tabla 6.3 PCG para GEI. (MMA, 2018, pág. 59)

Para estimar la huella de carbono proveniente de plantas incineradoras con valorización energética se realizará un análisis en base a estadísticas obtenidas del informe “Valorización energética de residuos urbanos en España y Andorra: huella de carbono y comparativa con depósito en vertedero” encargado por la Asociación de Empresas de Valorización Energética de Residuos Urbanos (AEVERSU) a la consultora técnica G-advisory en el año 2021.

Para estimar la huella de carbono proveniente de los RS en funcionamiento en el país, en primera instancia se pensaba extraer la información obtenida del INGEI serie 2016 (esta información se puede revisar en el punto 3.3. del presente informe), pero debido a la incertidumbre e inexactitud de los datos (la incertidumbre de los datos corresponde a -83,0% y +90,7% según lo declarado en el INGEI 2016 para el sector residuos), se optó por realizar dicha comparación con información extraída del documento: “Estimación de los factores de emisión”, encargado al instituto de investigaciones eléctricas, división energías alternas. En este estudio se calcula el factor de emisión para relleno sanitario realizando mediciones en terreno y basándose en las directrices del IPCC 2006. (Instituto de investigaciones electricas, 2007)

#### 6.2.1. Emisión CO<sub>2</sub> equivalente RS

Para el cálculo utilizaremos la generación de metano por unidad de RSU tratado  $\left[ \frac{Gg \text{ CH}_4 \text{ generado}}{Gg \text{ RSU tratado}} \right]$ .

En el informe “Estimación de los factores de emisión” se declaran 3 distintos valores obtenidos de 3 RS. Es importante destacar que las condiciones ambientales y la composición de los residuos juegan un factor importante en el cálculo, por lo que dentro de las directrices para la construcción del INGEI se recomienda trabajar con datos obtenidos en cada sitio de disposición final a nivel nacional. A continuación, se presentan los factores de CH<sub>4</sub> generado por RSU tratado:

- RS 1  $\rightarrow 0,1 \left[ \frac{Gg \text{ CH}_4 \text{ generado}}{Gg \text{ RSU tratado}} \right]$ .
- RS 2  $\rightarrow 0,09 \left[ \frac{Gg \text{ CH}_4 \text{ generado}}{Gg \text{ RSU tratado}} \right]$ .
- RS 3  $\rightarrow 0,11 \left[ \frac{Gg \text{ CH}_4 \text{ generado}}{Gg \text{ RSU tratado}} \right]$ .

Buscando un acercamiento conservador se trabajará con el Factor de  $0,09 \left[ \frac{Gg \text{ CH}_4 \text{ generado}}{Gg \text{ RSU tratado}} \right]$  para todo el país.

Según el INGEI Chile serie 1990-2016 se dispusieron 7012,7 [Gg de RSU] en 2016, por lo tanto, las emisiones totales del sector residuos específicamente por disposición final de residuos sólidos serían  $631,1 \left[ \frac{Gg \text{ CH}_4}{\text{año}} \right]$ , a este valor se le restan las emisiones recuperadas en los SDRS, dando un total de  $14.206,1 \left[ \frac{Gg \text{ CO}_2 \text{eq}}{\text{año}} \right]$ . Se adjunta la tabla # detallando lo anterior.

| 2016                         |  |               |  |                      |  |   |
|------------------------------|--|---------------|--|----------------------|--|---|
| RSU tratados<br>[Gg RSU/año] | Factor<br>[Gg CH <sub>4</sub> /Gg RSU] | PCG<br>Metano | Emisiones<br>[Gg CH <sub>4</sub> /año] | Metano<br>recuperado | Emisiones [Gg<br>CO <sub>2</sub> eq/año] | Factor RS<br>[Gg CO <sub>2</sub> eq/Gg RSU] |
| <b>7012,7</b>                | <b>0,09</b>                            | <b>25</b>     | <b>631,1</b>                           | <b>62,9</b>          | <b>14206,1</b>                           | <b>2,03</b>                                 |

Tabla 6.4 Emisiones totales 2016 por DRS. (Elaboración propia)

Así por cada Kg de RSU tratado en rellenos sanitarios, se liberarían 2,03 Kg de CO<sub>2</sub> equivalente a la atmosfera.

### 6.2.2. Emisión CO<sub>2</sub> equivalente planta incineradora con valorización energética

Como se comentó al inicio del punto 6.2 se estimará la emisión de CO<sub>2</sub> equivalente en plantas incineradores en base a la información entregada en el informe encargado por AEVERSU a la consultora G-Advisory. En este informe se distinguen fuentes directas e indirectas siendo:

- Fuentes directas: Combustión de residuos y emisiones por combustible auxiliar utilizado (proveniente de quemadores auxiliares encargados de que exista combustión completa, principalmente en etapas de encendido y apagado).
- Fuentes indirectas: Derivadas a la compra de Energía de fuentes externas.

Es importante aclarar que en este punto se realizarán cálculos basados en una planta de similares características a la planteada por la empresa “WTE Araucanía”, pero con algunas diferencias.

Algunos supuestos son:

- Capacidad de tratamiento 187.000 toneladas anuales de residuos

- Capacidad de generación hasta 15 [MW], se inyectarían 12[MW] y 1[MW] sería destinado a uso interno de la planta.
- No se consideran fuentes de emisión indirectas, ya que la planta se autoabastecería.
- Se evitaran emisiones equivalentes a la energía inyectada, las cuales serán calculadas según el factor de emisión GEI nacional para energía.

### Emisiones directas

Se utilizarán los factores de emisión declarados en el informe elaborado por G-advisory antes mencionado.

| Emisiones directas<br>[Gg CO2eq/Gg residuo] |               |
|---|---------------|
| Combustión de residuos                      | 0,3474        |
| Uso de quemadores auxiliares                | 0,0095        |
| <b>Total</b>                                | <b>0,3569</b> |

Tabla 6.5 Factor de emisiones directas. (Elaboración propia)

Por concepto de emisiones directas por cada Kg de residuo tratado en plantas incineradoras, se emitirían 0,3569 Kg de CO2e.

### Emisiones evitadas

Se realizará una extrapolación para emisiones evitadas producto de la generación de energía por parte de la planta en el contexto nacional. Se restará a las emisiones totales el CO2 equivalente a producir la energía generada menos la requerida para el funcionamiento de la planta, utilizando el promedio de energía vs emisiones a nivel nacional. La ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$Emisiones\ evitadas = FEa_{chile}(Ea_g - Ea_r)$$

$$Emisiones\ neto = Emisiones\ total - Emisiones\ evitadas$$

- $FEa_{chile}$ : Factor de emisión energía Chile
- $Ea_g$ : Energía generada en planta incineradora
- $Ea_r$ : Energía requerida para funcionamiento planta incineradora

| Emisiones evitadas por venta de electricidad |             |                 |                       |
|--|-------------|-----------------|-----------------------|
| Eag*   | Ear*        | FEaChile 2016** | Evitado*              |
| [MWh]  | [MWh]       | [KG CO2eq/MWh]  | [Gg CO2eq/Gg residuo] |
| <b>113880</b>                                | <b>8760</b> | <b>495,02</b>   | <b>0,2783</b>         |

\* Valores calculados en base a planta incineradora capaz de recibir 513 toneladas diarias de residuos, generando 13 [MW] inyectables, de los cuales 1 [MW] va destinado a funcionamiento interno.

\*\* Factor de emisión GEI 2016 del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) declarado por la comisión nacional de energía (CEN).

Tabla 6.6 Factor emisiones evitadas. (Elaboración propia)

Así por cada Kg de residuo tratado en plantas incineradoras se evitaban 0,2783 Kg de CO<sub>2e</sub> que se hubiesen emitido generando la misma cantidad de electricidad por otros medios.

### Emisiones neto

Habiendo obtenido los factores de emisión evitadas y emisiones directas se procede a realizar la diferencia entre ambos:

$$Emisiones\ neto = 0,0786 \left[ \frac{Gg\ CO_{2e}}{Gg\ RSU\ tratado} \right]$$

Cabe resaltar que, si las fuentes generadoras de electricidad a nivel nacional bajan el factor de emisión de GEI promedio, las emisiones netas de la planta subirán. Este planteamiento sigue la idea de aumentar el uso de fuentes renovables de energía y disminuir la generación por medio de fuentes de combustible fósil. Por ejemplo, si las fuentes de energía en Chile tuvieran un factor de emisión para GEI “0”, las emisiones netas serían igual a las emisiones directas.

### 6.3. Comparación de emisiones

Se procederá a comparar las emisiones de compuestos y GEI para RS y plantas incineradoras con valorización energética.

#### Emisión de gases de efecto invernadero

Se especifican y comparan las emisiones en la siguiente tabla:

| Emisiones GEI por tecnología                       |  |                            |
|--|--|----------------------------|
| Tecnología usada                                   | Emisión<br>[Gg CO <sub>2eq</sub> /Gg<br>residuo] | Porcentaje en<br>base a RS |
| Planta incineradora con<br>valorización energética | 0,0786   | 3,9                        |
| Relleno Sanitario                                  | 2,03   | 100                        |

Tabla 6.7 Emisiones de GEI por tecnología. (Elaboración propia)

Se observa que las emisiones de plantas incineradoras equivalen al 3,9% de los actuales rellenos sanitarios utilizados en Chile.

#### Emisiones de Compuestos

Con respecto a la emisión de compuestos, se estimó una emisión nula para rellenos sanitarios, no así las plantas incineradoras de residuos sólidos urbanos emiten una serie de compuestos que pueden ser perjudiciales para la salud de las personas. A pesar de esto, las concentraciones de estos compuestos se encuentran dentro de los límites permitidos dependiendo de la tecnología que se

utilice. Es importante aclarar que la tecnología propuesta por la empresa “WTE Araucanía” cumple con la normativa europea vigente en su totalidad.

La tabla 6.1 expone las concentraciones de compuestos esperados en la emisión de la planta incineradora.

## 7. Elección incineradora para tratamiento de RSU Chile

Según el contexto nacional en cuanto a tratamiento de los RSU y la falta de un sistema de recogida selectivo, se propone como la mejor opción una planta incineradora con valorización energética basada en la tecnología “Hornos de parrilla” oscilante o recíprocante para asegurar una mezcla homogénea. Este sistema no requiere de un sistema de separación de residuos, pero para cualquier planta incineradora será favorable un “combustible” (residuos en este caso) que contenga el mínimo de humedad posible, además es muy recomendable el excluir los residuos alimenticios por su bajo poder calorífico y alto contenido de humedad.

### 7.1. Capacidad nominal

Para estimar una capacidad nominal adecuada se debe pensar en el futuro, ya que una planta del tipo WTE puede operar sin problemas durante 30 años, en los cuales la demografía, situación económica y leyes pueden evolucionar.

Según la política nacional de residuos 2018, se ambiciona aumentar la tasa de valorización de residuos, llegando a un 30% en 2030. Se pretende utilizar un enfoque de economía circular y un manejo racional, priorizando la prevención en la generación de residuos.

De manera general se debe adoptar la jerarquía en el manejo de residuos, esto consiste en completar y maximizar la eficiencia de las actividades que figuran en la pirámide invertida (adjunta a continuación), partiendo de arriba hacia abajo.

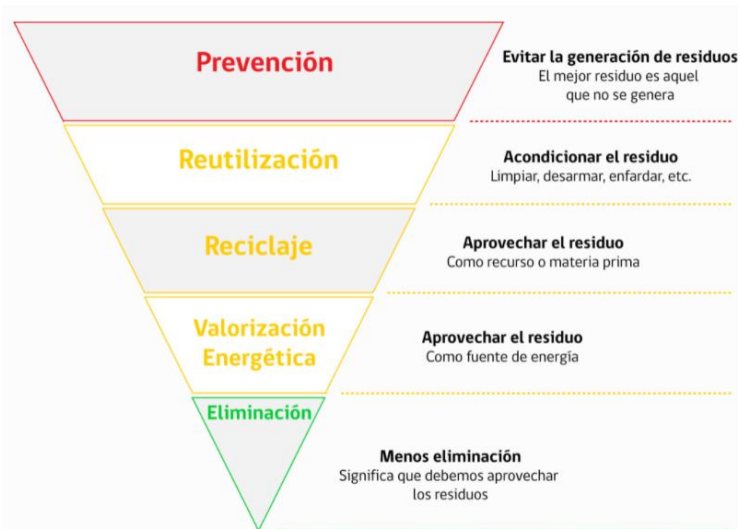


Figura 7.1 Pirámide invertida de la jerarquización en el tratamiento de residuos. (MMA)

Como se observa en la pirámide, la valorización energética viene después del reciclaje y la reutilización. La prevención se considera una actividad preliminar que no tiene que ver directamente con el tratamiento que se le da al residuo, más bien está relacionada con la educación de la población.

Recientemente el MMA lanzó la estrategia nacional de residuos orgánicos, la cual contempla para 2040 reciclar el 66% de los residuos orgánicos al menos, este objetivo va de la mano con implementar un sistema de recogida selectivo.

Como resultado de un estudio realizado por docentes de la universidad autónoma de Baja California, en el cual se caracterizó la composición de los RSU con el fin de exponer los porcentajes de residuos reciclables y su posterior mercado en la economía circular del país. Se concluyó que el 91% de los residuos que van a parar en un RS son potencialmente reutilizables o reciclables. Por lo tanto, ese 9% restante podría ser destinado a valorización energética, acorde con lo expuesto en la pirámide invertida de jerarquización para tratamiento de residuos.

Estratégicamente hablando, el mayor beneficio sería ubicar la planta WTE en el lugar con mayor densidad demográfica, de esta manera se disminuirían los costes por transporte de residuos hasta la planta. La región Metropolitana está ubicada en el primer lugar con una densidad poblacional de 461,8 [hab/km<sup>2</sup>] (ODEPA, 2019, pág. 5) y genera anualmente 3.176.763 toneladas de RSU. (SUBDERE, 2019)

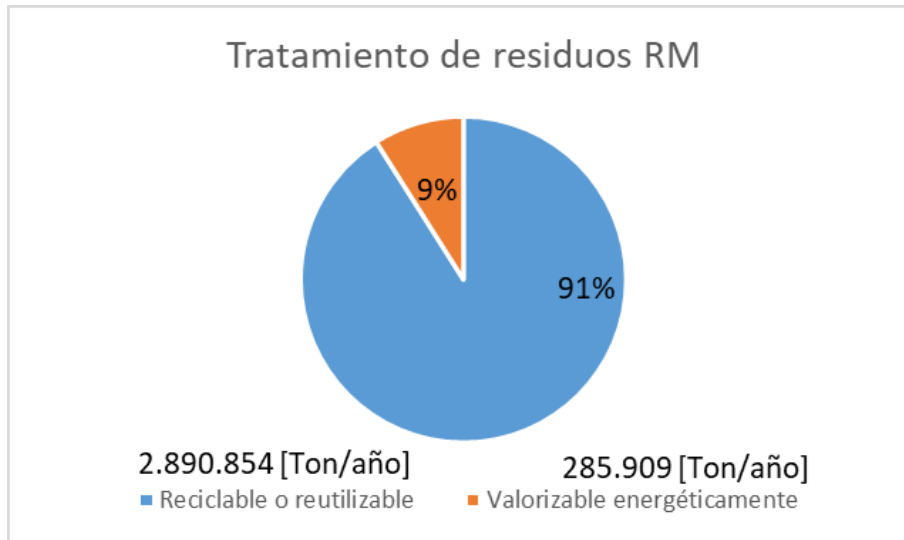


Figura 7.2 Gráfico Posible tratamiento de RSU en RM. (Elaboración propia)

Por lo tanto, potencialmente se podrían valorizar energéticamente al menos 285.909 [Ton/año] suponiendo que el restante 91% vaya a ser reciclado, reutilizado o valorizado de otra forma.

La estimación de la capacidad nominal adecuada está basada principalmente en que se cumplan los objetivos planteados por el MMA. Esto no impide que se construya una planta de mayor capacidad en el presente, ya que actualmente el porcentaje de residuos que se destinan a reciclaje, reutilización u otros tipos de valorización están muy por debajo de los planteados. Por lo tanto, se estima una capacidad nominal entre 285.909 [Ton/año] (9% de total RSU) y 1.080.100 [Ton/año] (34% de total RSU).

## 7.2. CO<sub>2</sub> equivalente emitido vs electricidad generada

En el estudio realizado por la consultora G-Advisory para AEVERSU se detalló la cantidad de residuos tratados térmicamente, la generación de energía y las emisiones totales en promedio de las 11 plantas incineradoras que se encuentran en funcionamiento en España.

En la tabla # se resumen los datos más importantes sobre valorización energética de España, siendo el más importante en este punto las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes en función de la energía eléctrica generada.

| <b>Resumen valorización España</b>              |             |                                  |
|---|-------------|----------------------------------|
| Residuos urbanos valorizados energéticamente    | 2.248.495   | [Ton/año]                        |
| Emisiones directas                              | 802.352     | [Ton CO <sub>2</sub> e/año]      |
| Electricidad producida                          | 1.289.776   | [MWh/año]                        |
| <b>CO<sub>2</sub>e vs electricidad generada</b> | <b>0,62</b> | <b>[Ton CO<sub>2</sub>e/MWh]</b> |

*Tabla 7.1 Resumen valorización energética España. (Elaboración propia)*

Se observa en la tabla que por cada MWh de energía producida en España promedio, mediante el uso de incineradoras que tratan RSU y los valorizan energéticamente, se emiten 0,62 toneladas de CO<sub>2</sub>e. Al comparar este valor con el factor de emisión energía Chile este resulta mayor en 0,127 toneladas por cada MWh producido.

Al realizar esta comparación se demuestra que la valorización energética no pretende competir con las generadoras de electricidad, simplemente se busca eliminar de manera adecuada la fracción de residuos que no pueden ser reciclados o reutilizados (jerarquía de tratamiento para residuos) y como anteriormente fue estimado, la tecnología de incineración con valorización energética que cumple con estándares europeos está muy por encima del tratamiento que se le da actualmente a los residuos en Chile.

## 8. Conclusiones

### 8.1. Conclusiones

Lo expuesto en este trabajo de título permite generar las siguientes conclusiones:

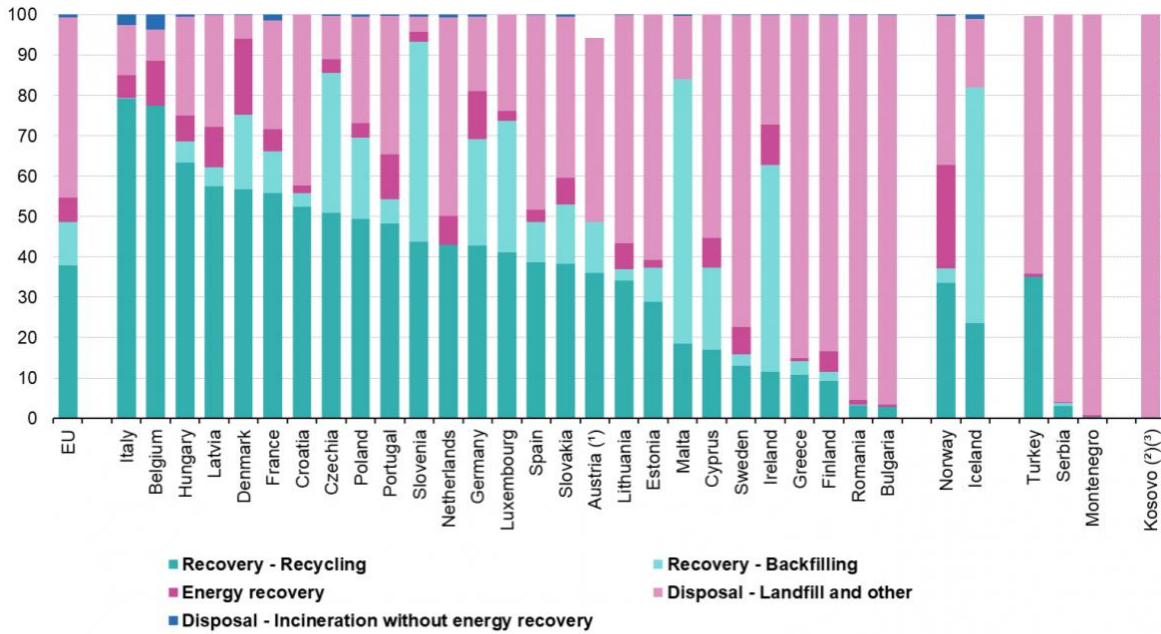
Chile está produciendo aproximadamente 7.500.000 toneladas de RSU al año, de las cuales sobre el 95% termina en RS, siendo sólo el 9% de estos residuos no reciclable o reutilizable. Resulta extraño pensar en que la solución aceptada actualmente sea “guardar” los residuos bajo tierra, esperando a que se degraden hasta por 1.000 años para botellas tipo PET.

Debido al cambio climático muchos países han optado por medidas que permiten reducir las emisiones de GEI. Chile al ser miembro de la OCDE se comprometió a reducir las emisiones de GEI, de las cuales el sector residuos aporta con 5.801,1 [Kt CO<sub>2</sub>eq] y más específicamente la disposición de residuos sólidos representa un 8,73% del total nacional (restando las absorciones de CO<sub>2</sub> por parte del sector UTCTS). Por lo tanto, existe un potencial importante para reducir las emisiones totales en el sector “Residuos”, priorizando la reutilización y reciclaje. Una alternativa para esta fracción resto, la cual representa el 9% del total de RSU es la valorización energética, la cual ha obtenido cifras notablemente mejores que los rellenos sanitarios en cuanto a emisiones de GEI y permite utilizar los residuos como combustible para la generación de electricidad. Esta actividad de generación emite 0,62 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por cada MWh producido, lo cual es mayor al promedio nacional (0,5[Ton CO<sub>2</sub>e/MWh]), pero el objetivo de estas plantas no es competir como fuente de generación, más bien es realizar un tratamiento adecuado a los residuos con el mayor aprovechamiento y el menor impacto posible.

Uno de los compromisos adoptados por Chile es reciclar el 30% de sus residuos, lo cual se ha hecho muy difícil ya que no existe un sistema de recolección selectivo, la ausencia de este dificulta el proceso debido a que es mucho más laborioso y requiere de más recursos realizar una separación de residuos post recolección. Además, la alternativa de enviar los residuos a los RS es muy económica, por lo tanto, es difícil para empresas que se dedican a reciclar competir en el manejo de residuos. Una de las acciones fundamentales para cambiar el sistema de manejo de residuos será respetar la jerarquización de la pirámide invertida, valorizando los residuos, identificando y categorizando cuales serán destinados a reutilización y reciclaje o valorización energética obligando a maximizar el aprovechamiento de los residuos.

Las plantas procesadoras de RSU con valorización energética no son una alternativa competitiva para la generación de energía eléctrica limpia, ya que su factor de emisión por energía producida es mayor al mix nacional. Simplemente representan una alternativa superior al relleno sanitario ambientalmente hablando.

Una de las principales preocupaciones al momento de aprobar la construcción de una planta WTE en Chile es que se firmaría un contrato que “obliga” a la municipalidad a proveer una cantidad mínima de residuos durante la duración del contrato (30 años aproximadamente), es muy posible que durante este tiempo la situación del país y las conductas de la población cambien, originando cambios en la manera en que los residuos son desechados, pero al tomar en cuenta que al menos un 9% del total de residuos no es reutilizable, reciclable o compostable, y estamos muy lejos de lograr las metas que nos llevarían a aprovechar los residuos en altas tasas. Además, analizando la experiencia internacional de los países con altas tasas de reutilización y reciclaje que destinan en su mayoría un porcentaje de sus residuos a plantas de valorización energética, como es el caso de Italia siendo el país con la tasa de reciclaje más alta en el mundo (casi 80%) envía aproximadamente un 12% a SDRS y un 6% lo destina plantas de valorización energética. Otros países como Republica Checa, Slovenia y Malta apuestan por un alto porcentaje de recuperación como material de relleno (carreteras, construcción y otros).



(\*) No data available for energy recovery and incineration without energy recovery.

(\*) No data available for incineration without energy recovery.

(\*) This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/1999 and the ICJ Opinion on the Kosovo Declaration of Independence.

Figura 8.1 Gráfico Tratamiento de residuos según tipo de recuperación y disposición. (Eurostat, 2018)

Se reafirma la factibilidad de construir una planta con capacidad nominal de al menos un 9% del total de residuos y todo indica que el reciclaje y reutilización conviven de manera armoniosa con las plantas de tipo WTE. Desde el punto de vista económico, al ser una solución más “cara” incentivaría a reciclar y reutilizar los residuos, dándole una oportunidad a las empresas dedicadas a esta labor.

## 8.2. Futuras líneas de investigación

Al elaborar un trabajo de título se pretende entregar información relevante a temas contingentes y dar respuesta a preguntas que permiten beneficiar a la sociedad. Es inevitable que durante el proceso surjan dudas e ideas relacionadas al tema pero que están fuera de los objetivos planteados. En esta sección se encuentran algunas sugerencias para futuras líneas de investigación que pueden ser de interés del lector.

Es interesante estudiar la factibilidad de implementar un sistema de recogida selectiva para RSU en la nación de Chile, además estudiar los beneficios concretos que esto pueda traer al proceso de valorización energética y metas de valorización nacionales.

Con la inminente puesta en marcha de la Ley “REP” sería relevante investigar que residuos son los más difíciles de valorizar y si es factible darles un espacio para ser tratados en una planta WTE, por ejemplo, los neumáticos son uno de los productos prioritarios que se van acumulando y no reciben un tratamiento adecuado. Es por esto que mediante la valorización energética podría aprovecharse el poder calorífico de estos y generar energía. Por otro lado, los aceites y lubricantes que no se reciclen sirven de combustible (combinado con otros residuos) para la valorización energética, se debe estudiar la factibilidad y porcentaje adecuado de uso en conjunto con otros residuos para no

ocasionar una diferencia importante durante el proceso de combustión debido al alto poder calorífico de los aceites.

Como se puede apreciar las plantas WTE permiten una gran variedad de usos y se invita a investigar otros usos dentro de la industria que permitan sostener un uso eficiente y adecuado de recursos.

## 9. Bibliografía

- Bioaqua. (2017). *Adenda EIA planta WTE Araucanía*. Temuco: Bioaqua.
- Comision nacional del medio ambiente (CONAMA). (2010). *Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Di Laconi, C., Rossetti, S., Lopez, A., & Ried, A. (2011). *Effective treatment of stabilized municipal landfill leachates*. Chemical Engineering Journal.
- Eurostat. (2018). *File: Waste treatment by type of recovery and disposal, 2018*.
- Facultad de ingeniería PUCV. (2006). *Estudio de caracterización de residuos sólidos domiciliarios en la región metropolitana*. Valparaiso : PUCV.
- G-Advisory. (2021). *Valorización energética de residuos urbanos en España y Andorra: huella de carbono y comparativa con depósito en vertedero*. Garrigues.
- Instituto de investigaciones electricas. (2007). *Estimación de los factores de emisión provenientes de un relleno sanitario*. Ciudad de Mexico: Gobierno de Mexico.
- Little, H. R. (1972). *Design Criteria for Solid Waste Management in Recreational Areas*. Washington D.C.: U.S. Environmental Protection Agency.
- López Camacho, S. (2018). *Planta de Incineración de Residuos Sólidos Urbanos*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Ministerio de Salud. (2019). *Oficio N° 210-2019*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Minsal. (18 de Agosto de 2005). *Decreto Supremo 189*. Obtenido de Biblioteca del congreso nacional: <http://bcn.cl/2f99i>
- MMA. (2018). *Inventario nacional de gases efecto invernadero Chile 1990-2016*. Santiago: Gobierno de Chile.
- MMA. (2018). *Política nacional de Residuos 2018-2030*. Santiago: Gobierno de Chile.
- MMA. (2019). *Reporte del estado del medio ambiente (REMA)*. Santiago: Gobierno de Chile.
- MMA. (2020). *Informe del estado del medioambiente*. Santiago: Gobierno de Chile.
- MMA y medio rural marino . (2011). *Mejores técnicas disponibles de referencia europea para incineracion de residuos*. Madrid: Gobierno de España.

- Neuwahl, F., Cusano, G., Gómez Benavides, J., Holbrook, S., & Roudier, S. (2019). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration*. Sevilla: Joint Research Center.
- ODEPA. (2019). *Región metropolitana Información regional 2019*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Paredes Rosario, R., & Baca López, M. (2005). *GENERACIÓN DE ENERGÍA CON BIOGAS DE RESIDUOS AGRÍCOLAS EN PLANTAS AGROINDUSTRIALES LA LIBERTAD - PERU*. Cartagena de India: Third LACCEI International and Caribbean for Engineering and Technology.
- Romero, P., & Rubbio, K. (2019). *Modelación de la Dispersión de Emisiones DS29/2013 para caldera proyecto "WTE Araucanía"*. Nakadis.
- Royer, S.-J., Ferrón, S., Wilson, S., & Karl, D. (2018). *Production of methane and ethylene from plastic in the environment*. Delhi: P. Pardha-Saradhi, University of Delhi, INDIA.
- SUBDERE. (2018). *Programa nacional de residuos*. Santiago: Gobierno de Chile.
- SUBDERE. (2019). *Catastro de RSU por comuna*. Santiago: Gobierno de Chile.
- Subsecretaria de desarrollo regional y administrativo (SUBDERE). (2019). *Catastro de RSD y asimilables por comuna*.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2002). *EPA Air pollution Control Cost Manual*. Washington D.C. 2000: Office of Air Quality Planning and Standards.
- Vesco, L. P. (2006). *Residuos Sólidos Urbanos: Su gestión integral en Argentina*. Buenos Aires: Universidad Abierta Interamericana.