



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y  
MATERIALES

**EVALUACIÓN AMBIENTAL DE PROCESOS DE RECICLAJE Y  
VALORIZACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS PARA LA REGIÓN  
METROPOLITANA: COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS MEDIANTE UN  
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO

MARTÍN SANDOVAL TAPIA

PROFESOR GUÍA:  
FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MARIANA BRÜNING GONZÁLEZ  
MARÍA ELENA LIENQUEO CONTRERAS

SANTIAGO DE CHILE  
2023

**EVALUACIÓN AMBIENTAL DE PROCESOS DE RECICLAJE Y VALORIZACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS PARA LA REGIÓN METROPOLITANA: COMPARACIÓN DE TECNOLOGÍAS MEDIANTE UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.**

El actual contexto socio-ambiental ha obligado a la sociedad a repensar la relación de los sistemas productivos con el medio ambiente. Los residuos orgánicos no escapan de esta problemática ya que históricamente se ha desaprovechado su potencial energético y nutricional.

El presente trabajo tiene por objetivo comparar cuatro alternativas de valorización de residuos orgánicos domiciliarios: digestión aeróbica, digestión anaeróbica, recuperación de gases desde rellenos sanitarios e incineración, con el propósito de facilitar la toma de decisiones respecto al desarrollo de las alternativas en función de su desempeño ambiental. La comparación se realiza a través la metodología Análisis de Ciclo de Vida, considerando como unidad funcional una tonelada de residuos valorizada, y midiendo cuatro categorías de impacto: potencial de calentamiento global (PCG), calidad del ecosistema (CE), salud humana (SH) y agotamiento de recursos (AR). Los factores de emisión utilizados se obtuvieron de la base de datos de Ecoinvent.

Los resultados muestran que la digestión anaeróbica es la mejor alternativa debido a su bajo impacto en las cuatro categorías estudiadas (ver tabla 1). Las principales fuentes de incertidumbre en los resultados son: la representación del impacto de las etapas de cada proceso a través de acciones de referencia predefinidas por la base de datos Ecoinvent y la no consideración del impacto de algunas etapas por la inexistencia de acciones de referencias homologables en la base de datos. El impacto de la digestión aeróbica proviene principalmente de la energía necesaria para la inyección de oxígeno en la degradación; seguido por la incineración, debido a la magnitud del flujo de gases a tratar; y en tercer lugar, la recuperación de gases por la baja recuperación de biogás.

Finalmente, los resultados entregan información del desempeño ambiental general de cada alternativa. Como proyección, se sugiere estudiar el impacto de diferentes tecnologías para cada alternativa con el objetivo de establecer características bajo las cuales los procesos deben llevarse a cabo.

Tabla 1: Impacto de la valorización de una tonelada de residuo orgánico por alternativa.

Alternativa	PCG [kgCO <sub>2</sub> eq]	CE [puntos]	SH [puntos]	AR [puntos]
Digestión aeróbica	4100	93,5	192	192,3
Digestión anaeróbica	870	21	32,7	17,7
Incineración	5300	97,6	178,5	86
Recuperación de gases	13400	91,4	208,9	12,4

*Es deber del Estado regular y fomentar la gestión,  
reducción y valorización de residuos.*

*Artículo 133 de la propuesta de Constitución  
Política de la República de Chile 2022*

# Agradecimientos

Después de tantos años en un proceso que pensé nunca tendría fin, pienso en todas las personas que contribuyeron en la experiencia y el conocimiento que hoy considero como propios y necesarios de compartir. Espero siempre usar las herramientas que he conseguido en pos del bienestar de les, las y los seres que habitan este limitado planeta.

A mi Mamá, por mostrarme perseverancia desde que tengo memoria e incentivarme a seguir adelante cuando creí que no podía, por estar ahí siempre que lo necesité y nunca darme la espalda, por ser la figura que más he admirado por su determinación, y compromiso, por enseñarme, sin que ella supiera, de su inseguridad y sus miedos. Lo que la Jo, el Vicho y yo tenemos te lo debemos en gran parte a ti.

Al Vicho, por ser un motor de inspiración en mi vida, por invitarme a cuestionar el mundo, por motivarme y estar mostrando interés en lo que estoy haciendo. Gracias por siempre estar a mi lado, prometo siempre estar al tuyo.

A la Jo, por enseñarme que llegar lejos no es sacarse buenas notas ni ser el mejor del curso, sino que es ser feliz y apasionado por lo que se hace todos los días. Siempre voy a estar agradecido de que me hayas enseñado esto.

A la Aurora, mi primera mentora, gracias por enseñarme a cuestionar el mundo e invitarme a ver que lo que el resto espera de mi no importa.

A la Mari, por mostrarme la humanidad que hay en la ingeniería, y por acercarme a la labor que muchxs hacen para hacer de este mundo uno mejor.

A Felipe, por enseñarme gran parte de lo que se, por dejarme trabajar contigo y darme un espacio para aprender a ser un mejor profesional.

A la Javi, Felix, Mati y la Cata, sin ustedes en la universidad no hubiese logrado llegar donde estoy. Les voy a estar infinitamente agradecido por dejarme ser parte de sus vidas.

Al Ariel, por haberme escuchado tanto en el proceso del trabajo de título, y sobre todo por mostrarme que no vale la pena preocuparse cuando ocupamos un lugar tan insignificante en el espacio y en el tiempo.

Al Jose y a la Cinthia, que con mucha felicidad le cuento que ¡logré darle la vuelta a la rueda!

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. La Tierra como un entorno limitado . . . . .	1
1.2. La crisis climática . . . . .	2
1.3. La Economía Circular como parte de la solución a la crisis climática . . . . .	3
1.4. La valorización de orgánicos . . . . .	5
1.5. Motivación . . . . .	6
1.6. Objetivos . . . . .	7
1.6.1. Objetivo general . . . . .	7
1.6.2. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>2. Metodología</b>	<b>8</b>
2.1. Investigación del contexto y alternativas . . . . .	8
2.2. Aplicación de la metodología Análisis de Ciclo de Vida . . . . .	8
<b>3. Antecedentes</b>	<b>10</b>
3.1. Marco normativo chileno en relación a residuos orgánicos . . . . .	10
3.1.1. Políticas e instrumentos normativos . . . . .	10
3.1.2. Proyecciones nacionales . . . . .	12
3.2. Caracterización de los residuos orgánicos domiciliarios en la Región Metropolitana . . . . .	15
3.2.1. Análisis último . . . . .	16
3.2.2. Humedad . . . . .	17
3.3. Metodología Análisis de Ciclo de Vida . . . . .	18
3.3.1. Etapa 1: Definición de Objetivos y Alcances . . . . .	19
3.3.2. Etapa 2: Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV) . . . . .	21
3.3.3. Etapa 3: Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) . . . . .	21
3.3.4. Etapa 4: Interpretación de resultados . . . . .	22
<b>4. Procesos de conversión de residuos orgánicos: Alternativas a comparar</b>	<b>23</b>
4.1. Digestión Aeróbica . . . . .	23
4.1.1. Proceso de digestión aeróbica . . . . .	23
4.1.2. Variables que afectan el proceso . . . . .	24
4.1.3. Etapas del proceso industrial . . . . .	26
4.2. Digestión Anaeróbica . . . . .	29
4.2.1. Proceso de digestión anaeróbica . . . . .	29
4.2.2. Variables que afectan el proceso . . . . .	30

4.2.3.	Etapas del proceso industrial . . . . .	32
4.3.	Recuperación de gases desde rellenos sanitarios . . . . .	35
4.3.1.	Mecanismo general de la generación de gases a partir de rellenos sanitarios	36
4.3.2.	Variables que afectan el proceso . . . . .	38
4.3.3.	Etapas del proceso industrial . . . . .	38
4.4.	Incineración . . . . .	41
4.4.1.	Proceso de incineración . . . . .	41
4.4.2.	Variables que afectan el proceso . . . . .	42
4.4.3.	Etapas del proceso industrial . . . . .	43
<b>5.</b>	<b>Análisis de Ciclo de Vida de las alternativas de valorización de residuos orgánicos</b>	<b>45</b>
5.1.	Objetivos y Alcances . . . . .	45
5.1.1.	Intención de aplicación de los resultados . . . . .	45
5.1.2.	Limitaciones debido a la elección de la metodología . . . . .	45
5.1.3.	Razones para llevar a cabo el estudio . . . . .	46
5.1.4.	Público objetivo . . . . .	47
5.1.5.	Objetos de estudio . . . . .	47
5.1.6.	Marco de referencia . . . . .	48
5.1.7.	Límites del sistema . . . . .	48
5.1.8.	Calidad de los datos . . . . .	49
5.1.9.	Categorías de impacto . . . . .	50
5.1.9.1.	Potencial de calentamiento global . . . . .	51
5.1.9.2.	Calidad del ecosistema, salud humana y agotamiento de recursos	52
5.2.	Análisis de inventario . . . . .	53
5.2.1.	Procesos . . . . .	53
5.2.1.1.	Digestión aeróbica . . . . .	53
5.2.1.1.1.	Descripción del proceso . . . . .	53
5.2.1.1.2.	Entradas y salidas del proceso . . . . .	54
5.2.1.2.	Digestión anaeróbica . . . . .	55
5.2.1.2.1.	Descripción del proceso . . . . .	55
5.2.1.2.2.	Entradas y salidas del proceso . . . . .	57
5.2.1.3.	Recuperación de gases desde rellenos sanitarios . . . . .	58
5.2.1.3.1.	Descripción del proceso . . . . .	58
5.2.1.3.2.	Entradas y salidas del proceso . . . . .	60
5.2.1.4.	Incineración . . . . .	61
5.2.1.4.1.	Descripción del proceso . . . . .	61
5.2.1.4.2.	Entradas y salidas del proceso . . . . .	62
5.2.1.5.	Discusiones . . . . .	63
5.2.1.5.1.	Transporte . . . . .	63
5.2.1.5.2.	Digestión aeróbica . . . . .	64
5.2.1.5.3.	Digestión anaeróbica . . . . .	64
5.2.1.5.4.	Recuperación de gases desde rellenos sanitarios . . . . .	66
5.2.1.5.5.	Incineración . . . . .	67
5.2.2.	Factores de emisión . . . . .	68

5.2.2.1. Discusiones . . . . .	74
5.2.2.1.1. Digestión aeróbica . . . . .	74
5.2.2.1.2. Digestión anaeróbica . . . . .	76
5.2.2.1.3. Recuperación de gases desde rellenos sanitarios . . . . .	80
5.2.2.1.4. Incineración . . . . .	83
5.3. Análisis de impacto . . . . .	85
5.3.1. Resultados . . . . .	85
5.3.2. Discusiones . . . . .	89
<b>6. Discusiones generales</b>	<b>93</b>
<b>7. Conclusiones</b>	<b>96</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>98</b>
<b>Anexos</b>	<b>104</b>
Anexo A. Abreviaturas . . . . .	104
Anexo B. Glosario . . . . .	105
Anexo C. Caracterización del flujo de ROD de acuerdo a otras clasificaciones . . . . .	106
Anexo D. Límite del sistema . . . . .	108
Anexo E. Sustancias relevantes en categorías de impacto midpoint . . . . .	112
Anexo F. Parámetros principales utilizados en la construcción del inventario . . . . .	113
Anexo G. Estimación de factores de emisión que dependen de la capacidad del proceso	116
G.1. Plantas de co-generación energética, alternativa de digestión anaeróbica	117
G.1.1. Recuperación térmica . . . . .	117
G.1.2. Recuperación eléctrica . . . . .	120
G.2. PTAS, alternativa recuperación de gases desde rellenos sanitarios e incineración . . . . .	123
Anexo H. Cálculo de factores de emisión para procesos con incertidumbre o inexistencia en Ecoinvent . . . . .	126
H.1. Tratamiento de RSM, alternativa recuperación de gases desde rellenos sanitarios . . . . .	127
H.2. Aireación de lixiviados, alternativa recuperación de gases desde rellenos sanitarios . . . . .	128

# Índice de Tablas

1.	Impacto de la valorización de una tonelada de residuo orgánico por alternativa.	i
1.1.	Definición de pérdida y desperdicio de alimento. Elaboración en base a [11]. . .	5
3.1.	Composición del flujo de residuos orgánicos en función de las principales macromoléculas. Elaboración propia en base a [21] . . . . .	16
3.2.	Comparación de fuentes sobre el análisis último. Elaboración en base a [20] y [21]	17
3.3.	Resumen caracterización de residuos orgánicos domiciliarios en la Región Metropolitana. Elaboración en base a [21]. . . . .	17
4.1.	Resumen de parámetros óptimos para los sistemas de digestión aeróbica. Elaboración en base a [47] . . . . .	26
4.2.	Características de los regímenes de operación según la temperatura de operación. Elaboración en base a [30] y [31]. . . . .	31
4.3.	Intervalos de tiempo que demoran las etapas de degradación de materia orgánica en rellenos sanitarios. Elaboración en base a [50]. . . . .	37
5.1.	Resumen objetos de estudio. Elaboración propia. . . . .	47
5.2.	Potencial de calentamiento global de gas de vida corta y larga en función del horizonte de tiempo. Elaboración en base a [52]. . . . .	51
5.3.	Relación entre categorías de impacto midpoint y endpoint según el método ReCiPe. Elaboración en base a [53]. . . . .	52
5.4.	Aproximación temporal de los factores de emisión para el método ReCiPe. Elaboración en base a [22]. . . . .	53
5.5.	Entradas y salidas de las etapas foreground del proceso de digestión aeróbica. Elaboración propia. . . . .	55
5.6.	Entradas y salidas de las etapas foreground del proceso de digestión anaeróbica. Elaboración propia. . . . .	57
5.7.	Entradas y salidas de las etapas foreground del proceso de recuperación de gases desde rellenos sanitarios. Elaboración propia. . . . .	60
5.8.	Entradas y salidas de las etapas foreground del proceso de incineración. Elaboración propia. . . . .	62
5.9.	Caracterización de ROD v/s caracterización de lodos considerados en el estudio guía. Elaboración en base a [21] y [55] . . . . .	67
5.10.	Factores de emisión seleccionados para el proceso de digestión aeróbica. N/C: no se considera. Elaboración propia. . . . .	70
5.11.	Factores de emisión seleccionados para el proceso de digestión anaeróbica. N/C: no se considera. Elaboración propia. . . . .	71
5.12.	Factores de emisión seleccionados para el proceso de recuperación de gases desde rellenos sanitarios. N/C: no se considera. Elaboración propia. . . . .	72

5.13.	Factores de emisión seleccionados para el proceso de incineración. N/C: no se considera, N/A: no aplica. Elaboración propia. . . . .	73
5.14.	Emisiones vehículos categoría EURO 5 y valores emisiones máximas permitidas por norma . . . . .	74
5.15.	Impactos relativos desagregados por etapa de las alternativas de DA (digestión aeróbica), DAN (digestión anaeróbica), In (incineración) y RG (recuperación de gases desde rellenos sanitarios) sobre las categorías de impacto: (a) PCG (potencial de calentamiento global), (b) CE (calidad del ecosistema), (c) SH (salud humana) y (d) AR (agotamiento de recursos). No se incluyen las etapas no consideradas (N/C) mencionadas en la sección 5.2.2. Elaboración propia. . .	88
7.1.	Resultados por alternativa para las categorías PCG (potencial de calentamiento global), CE (calidad del ecosistema), SH (salud humana) y AR (agotamiento de recursos). Elaboración propia. . . . .	97
7.1.	Características fisicoquímicas de los ROD's . . . . .	106
7.2.	Elementos nutricionales presente en los ROD's . . . . .	106
7.3.	Metales pesados presentes en los ROD's . . . . .	107
7.4.	Indicadores midpoint y sus sustancias relevantes. . . . .	112
7.5.	Principales parámetros utilizados en la construcción del inventario de digestión aeróbica. Elaboración propia. . . . .	113
7.6.	Principales parámetros utilizados en la construcción del inventario de digestión anaeróbica. Elaboración propia. . . . .	114
7.7.	Principales parámetros utilizados en la construcción del inventario de incineración. Elaboración propia. . . . .	115
7.8.	Principales parámetros utilizados en la construcción del inventario de recuperación de gases desde rellenos sanitarios. Elaboración propia. . . . .	116
7.9.	Factores de emisión de PCG, CE, SH y AR para recuperación térmica en plantas de co-generación energética . . . . .	117
7.10.	Funciones resultantes de la regresión potencial para los factores de emisión de las plantas de co-generación energética. . . . .	120
7.11.	Factores de emisión de PCG, CE, SH y AR para recuperación eléctrica en plantas de co-generación energética . . . . .	120
7.12.	Funciones resultantes de la regresión potencial para los factores de emisión de las plantas de co-generación energética. . . . .	123
7.13.	Factores de emisión de PCG, CE, SH y AR para PTAS con diferentes capacidades. . . . .	124
7.14.	Funciones resultantes de la regresión potencial para los factores de emisión de las PTAS. . . . .	126
7.15.	Flujos considerados en la estimación de PCG de la etapa de estabilización y sus respectivos PCG . . . . .	127
7.16.	PCG tratamiento de RSM, relleno sanitario con recuperación de biogás del 20% . . . . .	128
7.17.	Flujos considerados en la estimación de PCG de la etapa de lixiviación y sus respectivos PCG . . . . .	128
7.18.	PCG tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, aireación . . . . .	129

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Variación histórica de la temperatura promedio de la atmósfera en relación a la temperatura promedio actual (1950) [2]. . . . .	1
1.2.	Temperatura promedio de la atmósfera a nivel del suelo desde 1850 a 2020 [4].	2
1.3.	Concentración de GEI en la atmósfera entre 19885 y 2020, a) concentración de $CO_2$ y b) concentración de $CH_4$ . Los puntos azules representan las medidas observadas mientras que la línea roja representa la tendencia promedio [5]. . .	3
1.4.	Diagrama de mariposa de la Economía Circular [7]. . . . .	4
1.5.	Jerarquía de acciones para evitar el desperdicio y la pérdida de alimentos [10].	5
3.1.	Jerarquía de acción Ley N°20.920. Elaboración propia en base a [16]. . . . .	11
3.2.	Composición residuos municipales sólidos. Elaboración propia en base a [19]. .	16
3.3.	Relación gráfica entre las etapas del ACV [24]. . . . .	19
4.1.	Comportamiento de la temperatura en las etapas de la digestión aeróbica [46].	24
4.2.	Etapas del proceso de digestión aeróbica industrial. Adaptado de [44]. . . . .	28
4.3.	Proceso de la digestión anaeróbica. Elaboración propia. . . . .	30
4.4.	Etapas del proceso de digestión anaeróbica. Elaboración propia. . . . .	34
4.5.	Estructura general de un relleno sanitario [48]. . . . .	35
4.6.	Concentración de especies principales en función de las etapas de descomposición de materia orgánica en rellenos sanitarios [50]. . . . .	37
4.7.	Etapas del proceso de recuperación desde rellenos sanitarios. Elaboración propia.	40
4.8.	Etapas del proceso de incineración. Elaboración propia. . . . .	44
5.1.	Límite del sistema simplificado de las cuatro alternativas estudiadas. Elaboración propia. . . . .	49
5.2.	Diagrama de bloques etapas foreground del proceso de digestión aeróbica. Elaboración propia. . . . .	54
5.3.	Diagrama de bloques etapas foreground del proceso de digestión anaeróbica. Elaboración propia. . . . .	56
5.4.	Diagrama de bloques etapas foreground del proceso de recuperación de gases a partir de rellenos sanitarios. Elaboración propia. . . . .	59
5.5.	Diagrama de bloques etapas foreground del proceso de incineración. Elaboración propia. . . . .	62
5.6.	Impactos de la valorización de una tonelada de ROD a través de los procesos de DA (digestión aeróbica), DAn (digestión anaeróbica), In (incineración) y RG (recuperación de gases desde rellenos sanitarios) sobre las categorías de impacto: (a) PCG (potencial de calentamiento global), (b) CE (calidad del ecosistema), (c) SH (salud humana) y (d) AR (agotamiento de recursos). Elaboración propia.	86

5.7.	Impactos relativos por macroetapa de la valorización de una tonelada de ROD a través de DA (digestión aeróbica), DAn (digestión anaeróbica), In (incineración) y RG (recuperación de gases desde rellenos sanitarios) sobre las categorías de impacto: (a) PCG (potencial de calentamiento global), (b) CE (calidad del ecosistema), (c) SH (salud humana) y (d) AR (agotamiento de recursos). Elaboración propia. . . . .	87
7.1.	Límite del sistema del proceso de digestión aeróbica (EE: Energía eléctrica, GEI: Gases de efecto invernadero) . . . . .	108
7.2.	Límite del sistema del proceso de digestión anaeróbica (EE: Energía eléctrica, GEI: Gases de efecto invernadero, Dig-L: Digestato líquido, Dig-S: Digestato sólido, SEN: Sistema Eléctrico Nacional) . . . . .	109
7.3.	Límite del sistema del proceso de digestión anaeróbica (EE: Energía eléctrica, GEI: Gases de efecto invernadero, SEN: Sistema Eléctrico Nacional) . . . . .	110
7.4.	Límite del sistema del proceso de digestión anaeróbica (EE: Energía eléctrica, GEI: Gases de efecto invernadero, SEN: Sistema Eléctrico Nacional, PTAS: Plantas de tratamiento de aguas servidas) . . . . .	111
7.5.	Leyenda de diagramas sobre el límite del sistema de las alternativas. . . . .	111
7.6.	Regresión potencial del factor de emisión de PCG en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación. . . . .	118
7.7.	Regresión potencial del factor de emisión de CE en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación. . . . .	118
7.8.	Regresión potencial del factor de emisión de SH en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación. . . . .	119
7.9.	Regresión potencial del factor de emisión de R en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación. . . . .	119
7.10.	Regresión potencial del factor de emisión de PCG en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación. . . . .	121
7.11.	Regresión potencial del factor de emisión de CE en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación. . . . .	121
7.12.	Regresión potencial del factor de emisión de SH en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación. . . . .	122
7.13.	Regresión potencial del factor de emisión de R en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación. . . . .	122
7.14.	Regresión potencial del factor de emisión de PCG en función de la capacidad de tratamiento de la PTAS. . . . .	124
7.15.	Regresión potencial del factor de emisión de CE en función de la capacidad de tratamiento de la PTAS. . . . .	125
7.16.	Regresión potencial del factor de emisión de SH en función de la capacidad de tratamiento de la PTAS. . . . .	125
7.17.	Regresión potencial del factor de emisión de R en función de la capacidad de tratamiento de la PTAS. . . . .	126



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. La Tierra como un entorno limitado

Diez mil años atrás el planeta dejó un periodo de inestabilidad climática para entrar a una era en la que la temperatura de la atmósfera, así como flujos materiales y energéticos, se mantuvieron constantes (ver figura 1.1). La llamada era del Holoceno permitió al ser humano entender patrones en su entorno que lo llevó a aprender cómo manipularlo. En este periodo de tiempo el ser humano domesticó especies animales y vegetales, se organizó y logró construir civilizaciones hasta llegar al complejo sistema en el que se organiza actualmente. Sin embargo, hace pocas décadas atrás se considera que el planeta entró en una nueva era, el Atropoceno, un periodo en el que el sistema planetario se ve en constante cambio debido a presiones antropogénicas. En el último siglo la capacidad de regeneración de la Tierra se ha visto sobrepasada por el desbalance en sus flujos debido a la actividad humana [1]

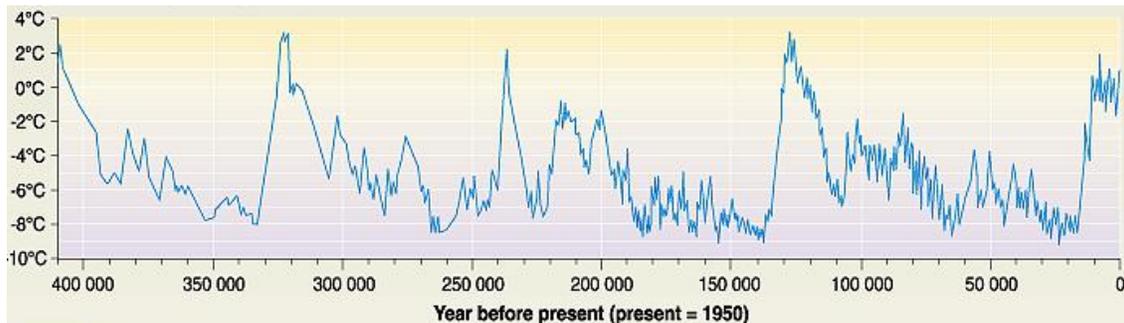


Figura 1.1: Variación histórica de la temperatura promedio de la atmósfera en relación a la temperatura promedio actual (1950) [2].

Se han definido cotas máximas para ciertos parámetros del sistema terrestre, las que los sistemas antropogénicos no deben superar si es que se pretende vivir en un ambiente de forma sostenible. En otras palabras, son rangos dentro de los que la Tierra tiene la capacidad de regenerarse de las perturbaciones humanas, a estos se les conoce como límites planetarios. Existen 9 variables que definen los límites planetarios: flujos biogeoquímicos (ciclo del fósforo y del nitrógeno), pérdida de biodiversidad, uso del agua fresca, cambios en el uso de suelo (deforestación), contaminación atmosférica, contaminación química, agujero de ozono,

acidificación de los océanos, y crisis climática [3].

## 1.2. La crisis climática

La crisis climática que enfrenta la sociedad a nivel global es, sin duda, generada y perpetuada por la forma de los sistemas productivos que sustentan la cotidianidad de las y los individuos. El sexto informe de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) establece como primera idea que "*el calentamiento de la atmósfera, océanos y tierra ha tenido inequívocamente influencia humana*". Desde la época preindustrial, es decir, antes de que los sistemas productivos comenzaran a depender de combustibles fósiles, la temperatura de la atmósfera al nivel del suelo ha aumentado poco más de 1°C, muy por sobre las proyecciones de la temperatura sin influencia del ser humano (ver figura 1.2) [4].

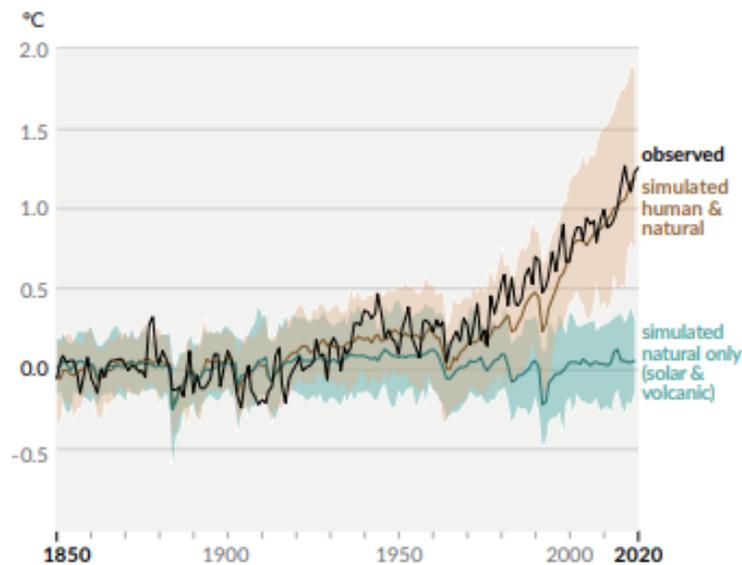


Figura 1.2: Temperatura promedio de la atmósfera a nivel del suelo desde 1850 a 2020 [4].

El diseño de los procesos que sustentan la vida diaria: la producción de bienes y los procesos que sostienen los servicios, la obtención de energía y la asimilación de los residuos que son generados por la sociedad, son responsables del aumento de la temperatura a nivel global debido a los residuos gaseosos asociados a su funcionamiento, particularmente los gases de efecto invernadero (GEI). El dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y el metano ( $CH_4$ ) son los GEI que aportan en mayor proporción al forzamiento radiativo a nivel mundial, representando un 66 % y un 16 % respectivamente. Ambas especies han aumentado su presencia en la atmósfera de manera significativa. Desde el año 1985 la concentración de  $CO_2$  y  $CH_4$  ha aumentado un 19,7 % y un 15,2 % respectivamente (ver figura 1.3) [5].

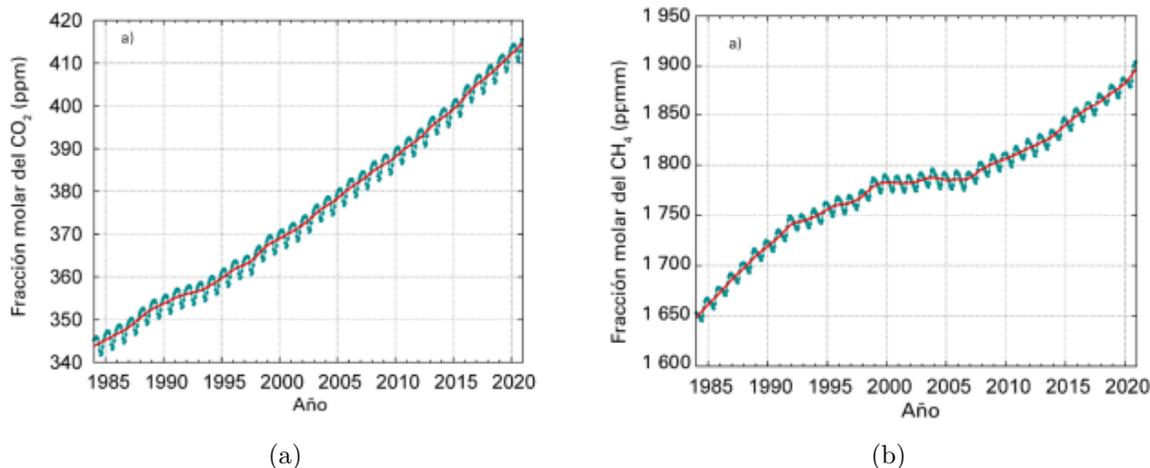


Figura 1.3: Concentración de GEI en la atmósfera entre 1985 y 2020, a) concentración de  $CO_2$  y b) concentración de  $CH_4$ . Los puntos azules representan las medidas observadas mientras que la línea roja representa la tendencia promedio [5].

El incremento en la concentración de GEI en la atmósfera, y en consecuencia el alza en la temperatura promedio en el planeta, significan un aumento en la frecuencia de situaciones climáticas extremas, como: situaciones de calor extremo, olas de calor marinas, precipitaciones extremas y sequías extremas. Esto implicará el derretimiento de los polos, el aumento del nivel del mar, la pérdida de suelos cultivables debido a la variación no constante del ciclo del agua, entre otros fenómenos que afectarán de manera directa y significativa al cotidiano de la vida humana [4].

### 1.3. La Economía Circular como parte de la solución a la crisis climática

Una de las soluciones más importantes a la crisis climática se basa en un cambio de paradigma al modelo productivo que ha construido la sociedad el último siglo. El modelo de producción lineal tiene deficiencias en cuanto a su diseño: es un sistema que extrae, produce, consume y desecha indefinidamente en un escenario en el que, tanto los yacimientos de donde se extraen recursos como los sumideros donde se depositan los residuos (atmósfera, océanos y tierra), son finitos. La propuesta de la Economía Circular establece un sistema de producción que considera las limitaciones físicas del planeta. Es un modelo que tiene por objetivo minimizar los flujos que se intercambian entre la biósfera y la tecnósfera, aprovechando la energía y materia que está en el sistema productivo para sustentar las demandas de bienes y servicios de la sociedad.

Se han propuesto modelos que representan cómo debería ser el diseño de un sistema circular, como el modelo de mariposa de la Fundación Ellen MacArthur (ver figura 1.4). Se definen los flujos básicos del sistema en dos categorías: nutrientes biológicos (materia orgánica) y nutrientes tecnológicos (materia inorgánica), los que después de ser consumidos o utilizados se reintegran al sistema productivo en diferentes etapas del ciclo de vida. Así, se definen

estas acciones de reincorporación al sistema productivo como: mantención, reutilización, re-manufacturación y reciclaje, las que tienen un diferente impacto en el ambiente en función a cuantas etapas del proceso están evitando ser accionadas. Así, la mantención, la acción más cercana a la utilización, es la de menor impacto ya que evita la acción de la cadena productiva completa. El modelo propone tres principios: (i) procurar reincorporar los flujos en las etapas más avanzadas del proceso, (ii) generar flujos que circulen lento por el sistema y (iii) evitar el uso de componentes tóxicos y los bienes que por su diseño no se pueden reincorporar al sistema [6].

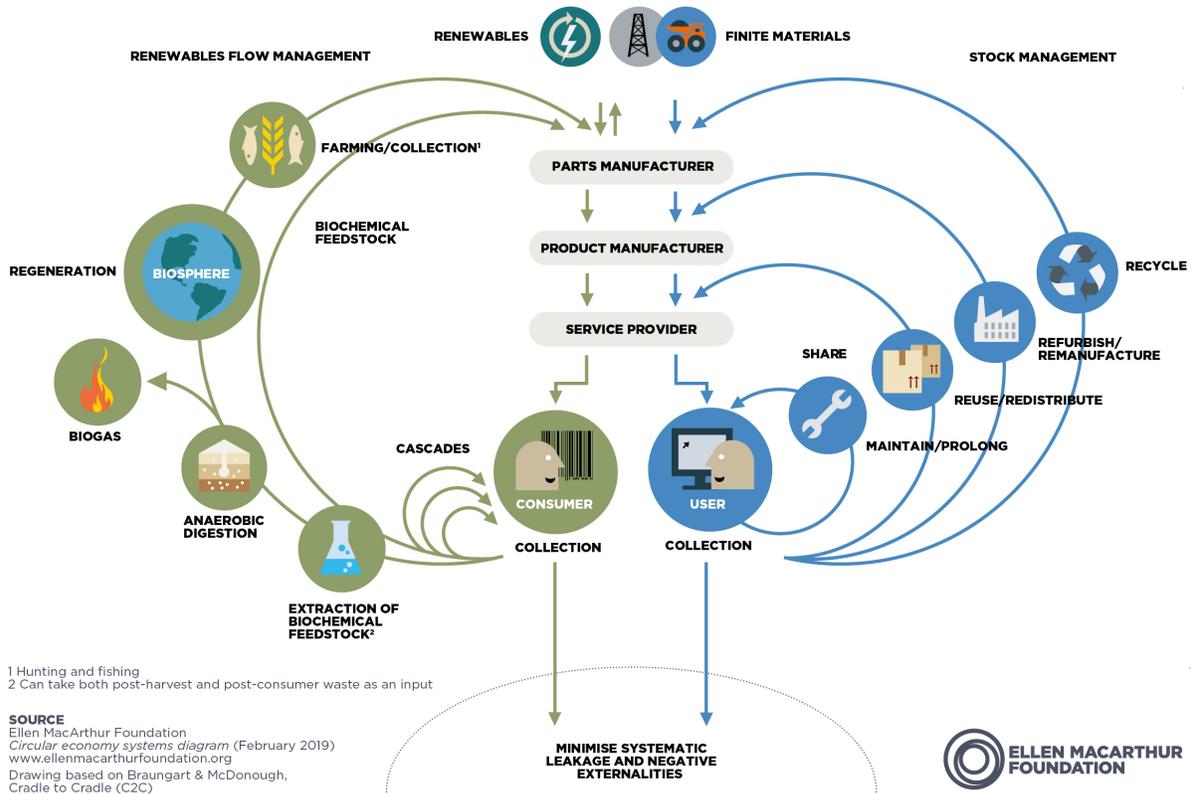


Figura 1.4: Diagrama de mariposa de la Economía Circular [7].

El caso de los nutrientes biológicos, en particular el flujo de residuos orgánicos proveniente del sistema alimentario, actualmente son descartados, terminando en vertederos o rellenos sanitarios sin ser aprovechados de ninguna forma, es decir, siguen la lógica de un sistema lineal; sin embargo, se trata de un residuo que tiene un alto potencial para ser valorizado y reintegrado al sistema productivo. Existen varios procesos que permiten transformar los residuos orgánicos, mediante procesos físicos, químicos y biológicos, en flujos energéticos y materiales aprovechables. La Economía Circular propone que sigan el ciclo natural del carbono biológico y que vuelvan a incorporarse a la Tierra como nutrientes para próximas producciones de alimento [7].

## 1.4. La valorización de orgánicos

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) un tercio de los alimentos producidos a nivel mundial son desperdiciados, es decir, aproximadamente 1,3 mil millones de toneladas de alimento equivalentes a 800 mil millones de euros [8, 9]. Esta cifra refleja un problema complejo que se asocia con el ciclo de vida de los alimentos desde su cosecha hasta su disposición final, considerando flujos de residuos en todas las etapas de producción. El flujo de residuos orgánicos desaprovechados a lo largo de la cadena productiva de alimentos generalmente se categoriza en dos: pérdida de alimentos y desperdicio de alimentos (ver tabla 1.1), para los que se proponen diferentes estrategias de acción para ser aprovechados, ordenadas de manera jerárquica según cuánto contribuyen a la minimización del impacto en el medio ambiente (ver figura 3.1) [10].

Tabla 1.1: Definición de pérdida y desperdicio de alimento. Elaboración en base a [11].

<i>Pérdida de alimentos</i>	<i>Disminución, en calidad o cantidad, del flujo másico de alimento a lo largo de la cadena productiva, desde su cosecha, o recolección, hasta antes de entrar a la etapa de comercialización donde el consumidor final está involucrado.</i>
<i>Desperdicio de alimentos</i>	<i>Disminución, en calidad o cantidad, del flujo másico de alimento a lo largo de la cadena productiva, desde la etapa de comercialización donde el consumidor final está involucrado hasta la disposición final de los residuos orgánicos generados por la alimentación.</i>

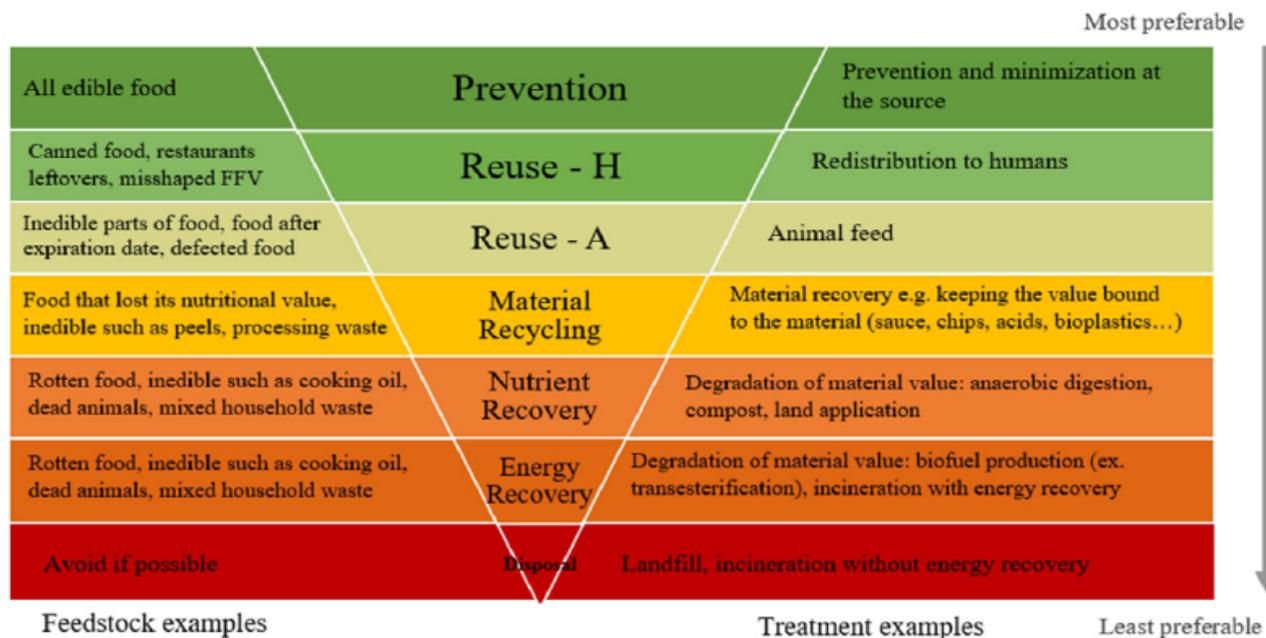


Figura 1.5: Jerarquía de acciones para evitar el desperdicio y la pérdida de alimentos [10].

De acuerdo a la jerarquía el flujo de los residuos orgánicos domiciliarios (RODs) debiese ser minimizado al máximo utilizando las acciones de prevención, redistribución humana, redistribución animal y reciclaje material; sin embargo, una vez minimizado se debe recurrir a técnicas de recuperación de nutrientes y recuperación energética.

Actualmente Chile cuenta con una legislación que considera la jerarquía de acciones para evitar la disposición final de residuos en la Ley N°20.920; sin embargo, esta apunta a los residuos de forma general y no se enfoca particularmente en los residuos orgánicos. Por otro lado, enfocado exclusivamente a los residuos orgánicos el año 2021 el Ministerio del Medio Ambiente prepuso la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos 2040, la que contempla un paquete de medidas que apuntan a aumentar la valorización de los orgánicos desde un 1 % a un 66 % en el año 2040.

## 1.5. Motivación

El escenario climático mundial ha forzado a los estados a tomar medidas para reducir el impacto de sus procesos en el medio ambiente. Con respecto al manejo de residuos orgánicos generados a nivel domiciliario el estado de Chile ha propuesto una "Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos" (sección 3.1.2) con la que pretende hacerse cargo del flujo de residuos a través del fortalecimiento del emergente mercado que los reintegra al sistema productivo.

El nacimiento de un nuevo mercado representa una oportunidad de pensar y diseñar los procesos que lo sostienen de manera responsable, preocupándose de los impactos y consecuencias que generan en el medio ambiente y la sociedad. Si bien existen diferentes tecnologías que permiten valorizar los residuos orgánicos, cada una impacta al medio ambiente en diferentes medidas. Por lo tanto, el propósito de este trabajo es comparar el impacto de las cuatro formas de valorización: digestión aeróbica, digestión anaeróbica, incineración y recuperación de gases desde rellenos sanitarios, bajo las categorías de impacto: potencial de calentamiento global, calidad del ecosistema, salud humana y agotamiento de recursos. Así, facilitar las decisiones tanto a nivel estatal, con el fin de priorizar y focalizar recursos e incentivos, como a nivel de proyecto, para contribuir a la decisión sobre cuáles son las mejores prácticas ambientales para valorizar residuos orgánicos.

En los últimos años la evaluación ambiental en base al potencial de calentamiento global, o huella de carbono, ha tomado relevancia debido al acelerado desarrollo de los prejuicios que la acumulación de GEI significan al sistema planetario y en consecuencia a los sistemas productivos que sostienen la vida humana. Sin embargo, definir una "mejor alternativa" en base a una exclusiva perspectiva implica interpretar de forma simplista la complejidad de los impactos que un proceso o producto generan en su entorno. Es necesario responder la pregunta de qué alternativa es mejor ambientalmente, no solo bajo el punto de vista del calentamiento global, sino desde un análisis que integre los potenciales impactos de forma sistémica, considerando la afectación al entorno natural y nuestra relación con él.

## 1.6. Objetivos

En el siguiente subtítulo se explicitan los objetivos generales y específicos del trabajo de título.

### 1.6.1. Objetivo general

Evaluar los impactos ambientales del tratamiento de residuos orgánicos generados en la Región Metropolitana mediante digestión aeróbica, digestión anaeróbica, incineración y recuperación de gases desde rellenos sanitarios mediante la metodología Análisis de Ciclo de Vida.

### 1.6.2. Objetivos específicos

1. Representar los cuatro procesos mediante un diagrama de flujos, que dé cuenta de sus respectivos balances de masa para un caso base.
2. Definir la unidad funcional, límites del sistema y alcances del Análisis de Ciclo de Vida.
3. Evaluar las alternativas de tratamiento mediante un Análisis de Ciclo de Vida, bajo las categorías de impacto Potencial de Calentamiento Global (*PCG*), Calidad del Ecosistema (*CE*), Salud Humana (*SH*), y Agotamiento de Recursos (*R*).
4. Comparar las alternativas de tratamiento según sus impactos y proponer la mejor opción de valorización de orgánicos para la Región Metropolitana desde un punto de vista ambiental.

# Capítulo 2

## Metodología

Para asegurar el cumplimiento de los objetivos del siguiente trabajo se contemplan dos etapas principales a realizar: (i) Investigación del contexto y alternativas, y (ii) Aplicación de la metodología Análisis de Ciclo de Vida. El fin de la primera etapa es contextualizar el escenario en el que se realiza el estudio, mientras que la segunda tiene como propósito el realizar la aplicación de la metodología Análisis de Ciclo de Vida. El desarrollo de cada etapa no es lineal ni cronológico, si bien tiene un orden lógico definido por su numeración, y la aplicación de la metodología Análisis de Ciclo de Vida es iterativa donde se necesita volver a la etapa de investigación del contexto y alternativas para llevarse a cabo.

### 2.1. Investigación del contexto y alternativas

En la etapa se cubrirán los siguientes puntos:

- Estudio del contexto legislativo en torno leyes que normen y regulen el manejo de residuos sólidos domiciliarios. Y propuestas del estado chileno que promuevan la valorización de residuos alimentarios domiciliarios
- Análisis de los procesos a comparar: digestión aeróbica, digestión anaeróbica, incineración y recuperación de gases desde rellenos sanitarios, identificando las características generales de cada proceso, sus parámetros principales y condiciones de operación.
- Identificación de estudios anteriores que hayan tenido como objetivo la comparación de tecnologías para valorizar residuos orgánicos mediante la metodología Análisis de Ciclo de Vida.

### 2.2. Aplicación de la metodología Análisis de Ciclo de Vida

En la etapa se cubrirán los siguientes puntos correspondientes a las etapas que construyen la metodología Análisis de Ciclo de Vida:

- **Definición de objetivos y alcances:** En la definición de objetivos se definen las bases sobre las cuales se empleará la metodología. En esta etapa se definen las alternativas a comparar, el contexto en el que se realiza la comparación, qué información entregarán los resultados y qué preguntas permite responder el estudio. En la definición de alcances se establece el marco en el que se realizará la comparación. Aquí se propone cómo se va a realizar la comparación para que esta sea justa entre las alternativas. Se definen los límites de los sistemas estudiados, la unidad funcional y el marco de referencia del estudio.
- **Análisis de Inventario:** La segunda etapa corresponde a la caracterización de las alternativas, que contempla la definición de sus respectivos procesos unitarios y la cuantificación de los flujos másicos y energéticos asociados a cada proceso. Se definen los flujos de referencia, los flujos elementales y su relación con la tecnósfera y biósfera.
- **Análisis de Impacto:** Se definen las categorías de impacto a través de las cuales se evaluarán las alternativas, se asocia cada flujo elemental con su correspondiente factor de emisión y se calcula la puntuación ambiental.
- **Interpretación de resultados:** Se realiza el análisis de los resultados obtenidos, recopilando información que permita tomar decisiones, ya sea en relación a la elección de una alternativa de acuerdo a su nivel de impacto o la identificación de etapas críticas en el ciclo de vida de una alternativa.

# Capítulo 3

## Antecedentes

### 3.1. Marco normativo chileno en relación a residuos orgánicos

#### 3.1.1. Políticas e instrumentos normativos

El siguiente subtítulo define los principales instrumentos normativos promulgados por el poder legislativo chileno que definen el marco regulatorio bajo el que opera la gestión de residuos sólidos domiciliarios y que da las directrices de su desarrollo.

Según la Ley Orgánica Constitucional de Municipalidades, se establece que la función de recolección, disposición y transporte de los residuos sólidos generados a nivel domiciliario es responsabilidad de la municipalidad donde se generen, con excepción a las que se encuentren en áreas metropolitanas, donde la responsabilidad se le delega a la gobernación respectiva. Por lo tanto, en principio, la gestión de los residuos sólidos domiciliarios son responsabilidad de cada municipio. [12]

Actualmente, en Chile existe la Política Nacional de Residuos 2018-2030, iniciativa que define, entre otras cosas, la forma en que se regula la gestión de los residuos sólidos domiciliarios, la responsabilidad de las municipalidades y la priorización de productos. Nace de la actualización de la Política Integral de Residuos, creada el año 2005 por la entonces Comisión Nacional de Medioambiente, cuyo objetivo era regular la disposición de residuos sólidos generados en la sociedad provocando el menor impacto en el ambiente, gestionando su disposición en infraestructuras reguladas y prevenir la disposición en espacios no normados. Se establecieron las condiciones que deben cumplir los rellenos sanitarios (Decreto Supremo N°189/2005), el manejo de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas (Decreto Supremo N°4/2009), y se acompañó a la gestión municipal en relación a la recolección y transporte de residuos sólidos domiciliarios [13, 14, 15].

El propósito de la política es establecer las directrices que tiene el Estado en materia de gestión de residuos sólidos para aumentar su valorización hasta un 30 % en el periodo de ejecución de la política. Sus objetivos son:

1. Desarrollar e implementar instrumentos para fomentar la aplicación de la jerarquía en el manejo de residuos.
2. Asegurar el acceso a infraestructura para el manejo ambientalmente racional de residuos en todo el territorio nacional.
3. Concientizar a la sociedad sobre los beneficios de la prevención y valorización de residuos.
4. Levantar, estandarizar y comunicar información asociada a la jerarquía en el manejo de residuos.
5. Crear una nueva institucionalidad.

Asimismo, se definen 14 líneas de acción asociadas a los 5 objetivos de la política. Toman relevancia por su relación a la reincorporación de residuos orgánicos al sistema productivo las líneas asociadas, al primer objetivo : Línea N°2) Definir e implementar desde las instituciones del Estado instrumentos para avanzar hacia una economía circular, Línea N°4) Incentivar la valorización de residuos orgánicos, al segundo objetivo: Línea N°1) Dotar de instalaciones adecuadas para eliminar residuos, Línea N°3) Incentivar mejoras en la gestión de residuos municipales, al cuarto objetivo, Línea N°2) Difundir información. (Política Nacional de Residuos 2018-2030)

En el marco de la Política Nacional de Residuos se establece la Ley N°20.920 que define el principio sobre “jerarquía de manejo de residuos” como: “Orden de preferencia de manejo, que considera como primera alternativa la prevención en la generación de residuos, luego la reutilización, el reciclaje de los mismos o de uno o más de sus componentes y la valorización energética de los residuos, total o parcial, dejando como última alternativa su eliminación, acorde al desarrollo de instrumentos legales, reglamentarios y económicos pertinentes”, lo que se condice con la jerarquía de acciones preferibles para evitar el desaprovechamiento del desperdicio y la pérdida de alimentos (subtítulo 1.4)[16].

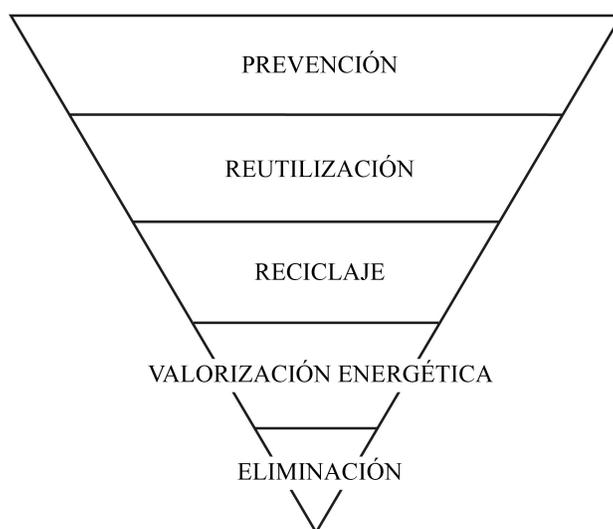


Figura 3.1: Jerarquía de acción Ley N°20.920. Elaboración propia en base a [16].

### 3.1.2. Proyecciones nacionales

El siguiente subtítulo resume la principal ruta de acción a nivel nacional sobre la gestión de residuos orgánicos propuesta por el Ministerio del Medio Ambiente el año 2020. [17]

El año 2021 se lanzó la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos 2040, que nace del compromiso auto propuesto de Chile en su Contribución Determinada a Nivel Nacional (Nationally Determined Contributions) el año 2020, donde se compromete a definir una ruta de trabajo para lograr valorizar los residuos orgánicos generados a nivel domiciliario y asimilables. La estrategia tiene por objetivo: “Aumentar significativamente la tasa de valorización de los residuos orgánicos gestionados a nivel municipal” pasando de un 1% de los residuos orgánicos valorizados al día de hoy hasta el 66% valorizado al 2040. Y se condice con la jerarquización de manejo de residuos establecida en la Ley N°20.920, por lo que busca evitar la eliminación de los residuos orgánicos del sistema productivos y valorizarlos para ser aprovechados como insumo en la producción de bienes, así como también su aprovechamiento energético.

Para lograrlo la estrategia define 7 puntos que resolver: (i) Prevenir la generación de residuos orgánicos, (ii) Cambio en la coordinación de las instituciones, (iii) Financiamiento de la transformación, (iv) Barreras regulatorias que se deben mover, (v) Involucración ciudadana, (vi) Incentivar la demanda de los productos generados de la valorización, y (vii) Monitoreo de avance de la estrategia.

Basada en la jerarquía de manejo de residuos definida en la Ley N°20.920 se propone como primer punto a resolver prevenir la pérdida y desperdicio de alimentos (ver tabla 1.1). Para lograrlo, se establecen las siguientes medidas:

1. Crear el Programa Nacional de Educación Ambiental en Economía Circular y Residuos Orgánicos, que ataca el desperdicio de alimentos a través de programa de educación y campañas de sensibilización.
2. Incentivos tributarios y apoyo en el financiamiento a empresas que colaboren con instituciones que tengan por objetivo la prevención del desperdicio de alimentos (por ejemplo, JUNAEB).
3. Actividades de recuperación de alimentos en ferias libres.
4. Fomento de plataformas que incentiven la adquisición de alimentos excedentes generados por puntos de venta de alimentos.

La estrategia propone perpetuar la responsabilidad de las instituciones encargadas de la gestión de los residuos orgánicos, es decir, la recolección, transporte y gestión de residuos orgánicos seguirá siendo responsabilidad de municipios en coordinación de los gobiernos regionales. A diferencia de otras iniciativas, como el mecanismo de responsabilidad extendida al productor, que delega la responsabilidad de valorizar los residuos a las propias industrias productoras de los bienes de los que provienen los respectivos residuos. Sin embargo, se busca modernizar la coordinación entre las instituciones a través de los siguientes puntos:

1. La creación del Programa Nacional de Residuos, que tiene por objetivo la coordinación entre las instituciones encargadas de la gestión de residuos orgánicos a nivel nacional, regional y local.
2. La modernización de la Secretaría Nacional de Residuos (Nueva Secretaría Nacional de Economía Circular y Residuos), encargada de concretar el Programa Nacional de Residuos.
3. La creación del Comité Asesor Nacional, conformado por el sector privado, académico y social, el que acompañará la implementación de la estrategia.
4. Aplicación de la iniciativa Estado Verde, con el fin de que las instituciones públicas tengan buenas prácticas en relación a la gestión de sus propios residuos orgánicos.

Respecto al financiamiento, la estrategia busca promover la inversión pública y privada tanto a nivel local como a nivel industrial, asegurando la diferenciación en fondos destinados a la separación de residuos, recolección y valorización. Se desarrollarán las siguientes iniciativas para contar con el financiamiento de la estrategia:

1. Aprovechar instrumentos existentes de inversión pública: Se promoverán proyectos de valorización gestionados por instituciones públicas desde fondos municipales, regionales y nacionales.
2. Aprovechar fondos concursables públicos existentes: Coordinar la acción de instituciones que otorguen fondos como la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), el Servicio de Cooperación Técnica (SERCOTEC), el Fondo de Protección Ambiental (FPA) y el Fondo para el Reciclaje (FPR), con el fin de que se priorice el otorgamiento de fondos a iniciativas que vayan en línea con la estrategia.
3. Crear incentivos correctos: Desincentivar las distancias largas las cuales se deben transportar los residuos en algunas localidades (por ejemplo, el transporte de residuos que se debe hacer desde Temuco a Los Ángeles). También, el costo de gestionar los residuos a través de rellenos sanitarios es muy bajo y poco competitivo con nuevas formas de valorización, por lo tanto, se contempla incluir las externalidades negativas en el costo de la gestión a través impuestos específicos.
4. Mecanismos de cobro solidario por la gestión de residuos: Actualmente 29 de las 345 comunas del país generan ingresos por cobros asociados a aseo mayores a los costos de la gestión de residuos sólidos. Se propone aumentar la recaudación asociada a la gestión de residuos sólidos buscando nuevos mecanismos de cobro, considerándose una alternativa el hacerlo a través de la Tesorería General de la Republica.

Sin embargo, el diseño de la estructura legislativa actual que establece la forma en la que las instituciones se coordinan y comunican para gestionar los residuos generados por la sociedad se rige bajo los principios de la economía lineal. Por lo tanto, para transitar hacia una economía circular, la regulación de las instituciones deben reformularse en un nuevo escenario circular. Para lograr el cambio de paradigma productivo la estrategia propone los siguientes cambios en la regulación nacional:

1. Modificar los instrumentos de planificación territorial que permitan la implementación de nueva infraestructura cerca de zonas habitadas cambiando la definición del uso de suelo.
2. Diseñar e implementar nuevas normativas sanitarias que definan el funcionamiento de plantas de valorización.
3. Reformulación de criterios con los que evalúa el Sistema de Evaluación Ambiental los proyectos de valorización de orgánicos, que hasta el día de hoy son los mismos con los que se evalúan proyectos de rellenos sanitarios a pesar de las evidentes diferencias.

Para que la estrategia tenga éxito es necesaria la separación en origen, es decir, quienes consumen deben separar los residuos que generan según sus características. Se proponen las siguientes ideas para lograrlo:

1. Incidir en la jurisdicción nacional para crear obligación en las y los ciudadanos respecto a la separación de residuos en domicilios.
2. Cambiar la organización de la recolección de los residuos desde los municipios, aumentando la frecuencia en la recolección de residuos valorizables y disminuyendo la frecuencia de recolección de residuos descartables.
3. Dejar de cobrar un monto fijo por el retiro de los desechos e implementar un sistema de cobro diferenciado de acuerdo a lo que se desecha.
4. La elaboración de un Programa Nacional de Educación de Residuos Orgánicos que genere instrumentos de educación relacionados a como las y los estudiantes se relacionan con los residuos orgánicos que generan. Junto con eso, dotar a las instituciones educativas con la infraestructura necesaria para que sus integrantes puedan gestionar los residuos orgánicos.

El incentivo de un nuevo mercado necesita del aumento de la demanda de los bienes producidos por los agentes que trabajen en valorizar los residuos orgánicos. La estrategia propone cinco iniciativas para generar un mercado sostenible en el tiempo:

1. La creación del Plan Nacional de Restauración de Paisajes 2020-2030, que busca restaurar espacios naturales urbanos y no urbanos con el fin de regenerar los servicios ecosistémicos que otorgan a la sociedad. La obtención de compost y digestato a partir de la valorización de residuos orgánicos contribuirá a la demanda de sustrato que esta acción requerirá.
2. Incentivos sobre el uso de fertilizantes orgánicos en reemplazo de los fertilizantes químicos utilizados en la industria agraria.
3. Incentivo del uso de fertilizantes orgánicos en la creación y mantención de áreas verdes urbanas.
4. Incentivo del uso de fertilizantes orgánicos por parte del Ministerio de Obras Públicas en el diseño de infraestructuras que contengan o convivan con áreas verdes.

5. Crear un sistema de certificación de productos derivados de la valorización de residuos orgánicos con el fin de transparentar su calidad.

Finalmente, el monitoreo de la estrategia contempla el levantar una línea base a través de la caracterización de los residuos domiciliarios y la definición de la composición de los residuos orgánicos. Se contempla la utilización de indicadores para monitorear el avance de la estrategia de acuerdo con la meta de cada municipalidad, los que serán reportados periódicamente al Ministerio del Medio Ambiente.

## 3.2. Caracterización de los residuos orgánicos domiciliarios en la Región Metropolitana

En el siguiente subtítulo se presenta la caracterización del flujo de residuos orgánicos domiciliarios generados en la Región Metropolitana, se define la magnitud del flujo, el análisis último y la humedad.

El año 2017 se generaron alrededor de 3.000.000 de toneladas de residuos sólidos domiciliarios y asimilables en la Región Metropolitana. En promedio cada comuna generó aproximadamente 60.000 toneladas; sin embargo, existe una relación directa entre la cantidad de habitantes de cada comuna y el flujo total de residuos sólidos domiciliarios y asimilables generados. Así, Puente Alto, la comuna con más habitantes (568.094), generó casi el 10 % de los residuos sólidos domiciliarios. [18]

De acuerdo con un estudio realizado el año 2010, en promedio el 57 % de los residuos sólidos domiciliarios corresponden a residuos orgánicos, mientras que el otro 43 % corresponde a papel y cartón (12 %), plástico (10 %), vidrio (4 %), metales (1 %) y otros residuos (16 %) (ver figura 3.2). En el presente trabajo no se considera la reincorporación de la categoría "papel y cartón" como parte de los residuos orgánicos domiciliarios por la jerarquización que se propone en la Ley N°20.920, debido a que es un flujo compuesto casi en su totalidad por celulosa, por lo tanto, tiene el potencial de ser reciclado [19].

El flujo de residuos orgánicos está compuesto por moléculas orgánicas que se pueden categorizar en sólidos volátiles (*SV*) y sólidos no volátiles (*SNV*). A su vez, los sólidos volátiles pueden ser categorizados como sólidos volátiles degradables (*SVD*) y sólidos volátiles no degradables (*SVND*). Los sólidos volátiles son la fracción de los residuos orgánicos degradados efectivamente por los procesos físicos (incineración) o biológicos (digestión aeróbica y/o anaeróbica) y transformados en productos como gases, agua, y energía. Por otro lado, los sólidos no volátiles son los compuestos remanentes después de la degradación física o biológica. Además, los sólidos volátiles degradables son una categoría relativa a la capacidad que tiene el proceso de degradar los compuestos orgánicos. Esto hace una diferencia, principalmente, entre los procesos de biodegradación de mayor y menor tiempo de operación. En procesos como la digestión aeróbica y anaeróbica, donde los tiempos de operación varían entre semanas y meses, existen compuestos orgánicos pertenecientes al grupo de sólidos volátiles que no son degradados debido a su complejidad o tamaño. Por otro lado, en procesos como la degradación de orgánicos en rellenos sanitarios es más probable que se degrade una fracción

cercana al total de sólidos volátiles debido a que el proceso continúa durante decenas de años.

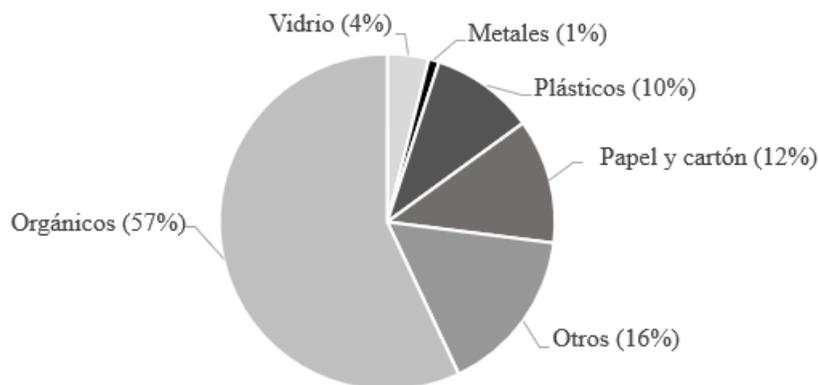


Figura 3.2: Composición residuos municipales sólidos. Elaboración propia en base a [19].

Los residuos orgánicos domiciliarios son un flujo dinámico: está compuesto por diversas especies que varían según la territorialidad, patrones de consumo, estación del año, y costumbres locales. Compuestos orgánicos como proteínas, lípidos y carbohidratos son las macromoléculas más abundantes; FISGATIVA ET AL. (2016) ha reportado valores promedio de su porcentaje másico en base al total de sólidos volátiles (ver tabla 3.1).

Tabla 3.1: Composición del flujo de residuos orgánicos en función de las principales macromoléculas. Elaboración propia en base a [21]

<i>Macromoléculas principales</i>	<i>Porcentaje másico [%]</i>
<i>Carbohidratos</i>	<i>36</i>
<i>Hemicelulosa</i>	<i>9</i>
<i>Celulosa</i>	<i>9</i>
<i>Lignina</i>	<i>7</i>
<i>Proteínas</i>	<i>21</i>
<i>Lípidos</i>	<i>15</i>

### 3.2.1. Análisis último

El análisis último corresponde a un proceso de caracterización el cual entrega como resultado la composición atómica de la muestra, expresando la proporción de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno, Nitrógeno y Azufre que contiene. Es necesario saber el análisis último del flujo de residuos ya que así se puede determinar el potencial energético que tiene.

Se revisaron dos fuentes de información, con el fin de contrastarlas y considerar para el estudio la que sea más pertinente bajo los criterios de temporalidad, el lugar donde se realiza el estudio y la veracidad del estudio en función de la metodología utilizada. El primer estudio considerado fue realizado por GONZALEZ ET. AL. (2018) donde se caracterizó el flujo de

residuos orgánicos domiciliarios en la región del Bio Bio. Para lograrlo, se revisaron 24 muestras en un periodo de 12 meses [20]. La segunda fuente, el estudio realizado por FIGSIVATA ET AL. (2016), contempla información de 70 estudios realizados en diferentes espacios geográficos entre el 2001 y el 2014, donde se recogen un total de 102 muestras [21]. En la tabla 3.2 se muestran los resultados de ambas fuentes, evidenciándose similitud en la magnitud de las proporciones. La mayor diferencia es que en el estudio de GONZALEZ ET. AL. (2018) hay una mayor proporción de oxígeno que de carbono, mientras que en FIGSIVATA ET AL. (2016) se aprecia lo contrario (ver tabla 3.2).

Para el presente trabajo se considerarán los datos expuestos por GONZALEZ ET. AL. (2018) debido a que es una fuente más actualizada, y más cercana geográficamente a la Región Metropolitana (ver tabla 3.3).

Tabla 3.2: Comparación de fuentes sobre el análisis último. Elaboración en base a [20] y [21]

<i>Especie</i>	<i>Unidad</i>	FIGSIVATA ET AL.	GONZALEZ ET. AL.
<i>C</i>	% base seca sin cenizas	42	51,2
<i>H</i>	% base seca sin cenizas	5	7,9
<i>O</i>	% base seca sin cenizas	53	37,3
<i>N</i>	% base seca sin cenizas	<1	2,8
<i>S</i>	% base seca sin cenizas	<0,1	0,5

### 3.2.2. Humedad

La humedad del flujo de residuos orgánicos domiciliarios tiene relevancia en el trabajo ya que afecta de diferentes formas el desempeño de cada tecnología considerada. En el caso de la incineración se busca minimizar al máximo la masa de agua presente en el combustible, ya que de lo contrario parte de la energía interna liberada se consumiría en el proceso de evaporación del agua y no sería aprovechable.

Tabla 3.3: Resumen caracterización de residuos orgánicos domiciliarios en la Región Metropolitana. Elaboración en base a [21].

<i>Especie</i>	<i>Unidad</i>	<i>Valor</i>
<i>C</i>	% base seca sin cenizas	51,2
<i>H</i>	% base seca sin cenizas	7,9
<i>O</i>	% base seca sin cenizas	37,3
<i>N</i>	% base seca sin cenizas	2,8
<i>S</i>	% base seca sin cenizas	0,5
<i>Cenizas</i>	% base seca	10
<i>Humedad</i>	% mm	86

En el caso de la digestión anaeróbica, aeróbica y recuperación de gases a partir de rellenos sanitarios, requieren de la presencia de agua y así generar un ambiente adecuado para los

microorganismos, ya sean aeróbicos o anaeróbicos. Sin embargo, debido a que el proceso de digestión aeróbica requiere la presencia de oxígeno, la humedad debe ser suficiente para que la masa de residuos orgánicos sea lo suficiente porosa para permitir el paso del oxígeno en el sistema. Así como en el caso del análisis último, se consideró la humedad reportada por GONZALEZ ET. AL. (2018), equivalente a 86 % en base seca (ver tabla 3.3)[20].

Otras características de la composición de los residuos orgánicos domiciliarios, no señalados por GONZALEZ ET. AL. (2018), se explicitan en el Anexo 7 en base al estudio realizado por FIGGATIVA ET AL. (2016).

### 3.3. Metodología Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta comparativa que permite analizar el impacto ambiental relativo de dos o más objetos de estudio mediante el análisis de todas las etapas productivas que están involucradas en su ciclo de vida.

La herramienta se define como un evaluador relativo ya que no evidencia el impacto que el objeto de estudio genera en el ambiente, si no que mide un indicador objetivo que se le asocia a un impacto medioambiental. Por ejemplo, un ACV no logra medir el impacto del objeto de estudio en el calentamiento global, sino que mide el flujo de gases de efecto invernadero, bajo la unidad de dióxido de carbono equivalente ( $CO_2eq$ ), que emite su ciclo de vida. Así, se asocia el flujo de  $CO_2eq$  al Potencial de Calentamiento Global ya que existe evidencia de la correlación entre la variable medida y el impacto en cuestión. [22]

Los objetos de estudio pueden ser categorizados en tres grupos principales: productos, procesos y servicios. Independiente del objeto de estudio el objetivo de la metodología es evaluar todos los procesos por los cuales debe atravesar el producto, proceso o servicio, ya sean directos e indirectos, para cumplir su función. Esto considera desde la extracción de materias primas, producción de insumos y generación de energía, transporte, uso y disposición final. [23]

Actualmente existen dos normas ISO principales que estandarizan el proceso de aplicación de la herramienta Análisis de Ciclo de Vida: la ISO 14040:2006 y la ISO 14044:2006. La primera establece la definición de términos, una descripción general de la herramienta y un marco de referencia metodológico para su aplicación. La segunda establece los requerimientos detallados que debe cumplir el estudio para que sea metodológicamente válido. [24][25]

La metodología está compuesta por cuatro etapas principales: (i) Definición de Objetivos y Alcances, (ii) Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV), (iii) Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV), y (iv) Interpretación de Resultados, las que se deben desarrollar de manera sucesiva pero no lineal, es decir, la metodología se aplica de manera iterativa si es necesario (ver figura 3.3).

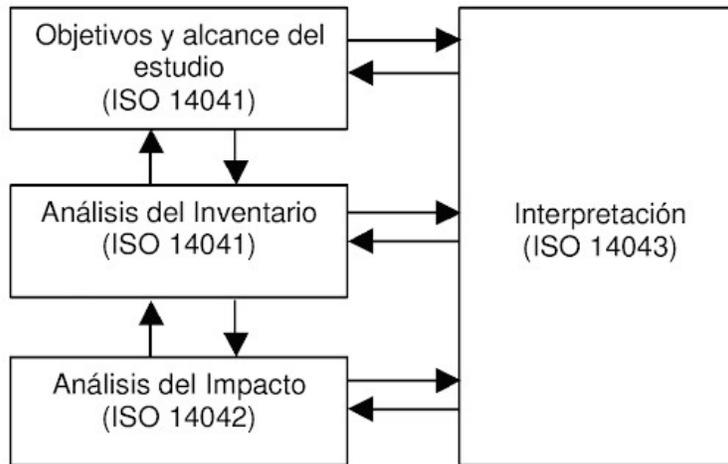


Figura 3.3: Relación gráfica entre las etapas del ACV [24].

### 3.3.1. Etapa 1: Definición de Objetivos y Alcances

La aplicación de la metodología comienza con la definición de objetivos, la cual consiste en una serie de declaraciones que en su conjunto conforman la definición de bases que contextualizan el estudio. Los principales puntos que componen la definición de objetivos son:

- **Intención de aplicación de los resultados:** La metodología Análisis de Ciclo de vida puede ser utilizada con diferentes fines, por ejemplo, comparar el desempeño ambiental de productos o procesos, la identificación de etapas ambientalmente críticas en un proceso productivo o la evaluación ambiental de cambios en procesos. Este punto debe definir la pregunta que el estudio pretende responder. La importancia de declarar la intención de aplicación de los resultados es debido a que condicionará definiciones de etapas futuras como la definición de alcances.
- **Limitaciones debido a la elección de metodología:** En este punto se debe declarar la razón de la elección de la metodología en base a lo que se puede lograr responder y lo que no. Es decir, se caracteriza la información que el estudio va a generar y cómo se podrá utilizar dicha información.
- **Razones para llevar a cabo el estudio:** A diferencia de la intención de aplicación este punto debe contextualizar el estudio en el escenario (social, tecnológico, político, etc.) donde se está realizando la comparación, dando a entender la relevancia de la información resultante. Este punto responde al por qué de la realización del estudio.
- **Público objetivo:** Tanto el reporte de la aplicación de la metodología como la socialización de los resultados obtenidos varían en su tecnicidad en función de quien sea el público a quien está dirigido el estudio. Los receptores del estudio pueden ser consumidores, empresas, gobiernos, etc., lo que condiciona el nivel de complejidad al momento de relatar el cómo se realizó el estudio y la forma en la que se interpretan los resultados.

La definición de alcances consiste en la definición del marco en el que se aplicará la metodología. En este momento de la etapa se declaran los sistemas considerados en el estudio. Junto con esto se definen los alcances del estudio en función de los sistemas que se someterán a comparación. Los principales puntos que conforman la definición de alcances son:

- **Objetos de estudio:** Debido a que la comparación ambiental de dos alternativas puede no ser justa, la definición de los objetos de estudio tiene como fin validar la comparación que se realiza en el estudio. Para lograrlo es necesario definir tres objetos: la función, la unidad funcional y el flujo de referencia.
- **La función:** Para que la comparación de dos alternativas sea válida hay que encontrar una figura sobre la cual sea válida hacer la comparación. Y esa figura es la función de las alternativas. Esto ya que por la naturaleza de la metodología buscamos comparar dos o más alternativa que tengan por objetivo cumplir con una función. Este objeto de estudio debe ser común para todas las alternativas. **La unidad funcional:** Como lo dice su nombre es una unidad que define a la función. Esta medida será la base con la que se comparan las alternativas del estudio y responde a el qué, cómo, por cuanto tiempo, donde y cuan bien. Por ejemplo, si se quiere comparar dos lubricantes para el motor de un automóvil la unidad funcional de podría definir como “la lubricación de un motor X durante 1 año en condiciones de movilidad en zonas urbanas”. Este objeto de estudio debe ser común para todas las alternativas.
- **Flujo de referencia:** Es el flujo de producto necesario para cumplir con la unidad funcional. Es llamado “de referencia” ya que todos los flujos del proceso que se definen posteriormente están en equivalencia a este flujo.
- **Definición del marco de referencia:** existe dos marcos de referencia para la metodología, el modelo atribucional y el modelo consecuencial. El atribucional busca responder sobre los impactos asociados al ciclo de vida de un producto o proceso sin considerar los impactos que generan la elección de una u otra alternativa. El consecuencial, a diferencia del atribucional, además de considerar los impactos asociados al ciclo de vida considera también el impacto que la alternativa genera en el contexto del estudio. Por ejemplo, si se estudia el proceso de compostaje, una aproximación atribucional consideraría solo los impactos que se asocian al proceso necesario para producir el compost; sin embargo, una aproximación consecuencial consideraría también el impacto de la sustitución de fertilizantes artificiales por el compost producido.
- **Definición de los límites del sistema:** El proceso productivo de un bien no está aislado del resto de la economía, sino que depende de otros procesos productivos lo cuales en un principio dependen de la biosfera. La definición de límites del sistema busca crear una frontera ficticia entre lo que el estudio considera como parte del proceso productivo y lo que no. En teoría el límite de sistema ideal es aquel que logra considerar la trazabilidad de todos los flujos másicos y energéticos que convergen en el flujo de referencia a partir de la biosfera. Sin embargo, debido a la imposibilidad de contemplar la totalidad de los procesos involucrados en un proceso productivo se establecen los límites del sistema.

### **3.3.2. Etapa 2: Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV)**

Una vez definido el marco base sobre el cual se desarrollará el estudio se deben definir las alternativas en detalle. La etapa de análisis de inventario del ciclo de vida consiste en detallar todos los procesos unitarios que se consideran dentro del límite del sistema con sus flujos másicos y energéticos correspondientes. De esta forma se concluye la etapa con la caracterización de los sistemas que generan las alternativas comparadas. Los principales puntos que conforman el análisis de inventario del ciclo de vida son:

- **Identificación de los procesos:** El primer paso de la etapa es caracterizar todos los procesos que están involucrados en la producción del flujo de referencia de acuerdo a los límites del sistema anteriormente definidos. Estos procesos pueden ser clasificados según su relevancia en la producción del producto de acuerdo a una clasificación de niveles que va de cero a cuatro: (0) El proceso que tiene asociado el flujo de referencia o el proceso que produce el producto de estudio, (1) los procesos que son necesarios para acondicionar los flujos másicos que se requieren para llevar a cabo el proceso cero, independiente de la etapa del ciclo de vida del producto; sin embargo, por definición todos los procesos de nivel uno ocurren antes que el proceso de nivel cero, (2) son los procesos de soporte necesarios para llevar a cabo el proceso de nivel cero, en esta categoría se consideran entre otros, los procesos de generación energética y transporte, (3) son los procesos administrativos que se deben llevar a cabo para que el producto cumpla su ciclo de vida, generalmente estos procesos son llevados a cabo por las instituciones o empresas a cargo de los procesos productivos, y (4) son los procesos necesarios para levantar la infraestructura del proceso principal, por ejemplo, la manufacturación de equipos o la construcción de infraestructura civil. La numeración de niveles es proporcional a la importancia relativa que tiene la actividad con el impacto del proceso estudiado, es decir, mientras menor el nivel más peso tendrá en los resultados. Por lo tanto, el límite del sistema debe ser simplificado de acuerdo al criterio de niveles recién explicitado.
- **Recolección de datos y construcción de procesos unitarios:** luego de que se hayan identificado los procesos unitarios que construyen el proceso en estudio se deben cuantificar todos los flujos másicos y energéticos asociados a cada proceso unitario. Para lograrlo se utilizan datos reales o bibliográficos dependiendo del nivel de incertidumbre de los procesos estudiados, si el estudio se está realizando en un contexto real, donde el proceso ya existe o ya está definido, o en un contexto hipotético, donde el proceso es una suposición de cómo será.

### **3.3.3. Etapa 3: Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV)**

La etapa de evaluación de impacto del análisis de ciclo de vida es el punto en la metodología donde se le atribuye la connotación de impacto a los procesos caracterizados en detalle en la etapa de análisis de inventario del ciclo de vida. La base teórica que sustenta la metodología consiste en la ponderación de los flujos que entran y salen del límite del sistema (flujos elementales) por factores que asocian un cierto impacto a la salida o entrada del flujo. Por lo tanto, en esta etapa se deben definir la parte que no tiene que ver con la caracterización

del proceso para que la ponderación se pueda realizar con el fin de llegar a un valor numérico que represente el impacto de un proceso. Los principales puntos que se deben cumplir en esta etapa son:

- Elección de las categorías de impacto: una vez teniendo en cuenta el funcionamiento de los procesos a comparar, las operaciones unitarias que compone a cada alternativa, y los flujos elementales asociados a cada operación unitaria, entonces se debe determinar la categorías de impacto sobre la que se realizará la comparación. Como se menciona anteriormente, la metodología no determina el impacto ambiental directo que tiene una acción en el medio ambiente, sino que busca asignarle un valor a un indicador que tenga directa relación con un efecto particular al que se le llama impacto ambiental. Así, a los diferentes indicadores se les llama categorías de impacto.

Existen variados indicadores que visibilizan diferentes impactos, entre los más conocidos, debido a su importancia en el contexto socio ambiental, están el potencial de calentamiento global y el agotamiento de recursos hídricos.

- Selección del método de evaluación de impacto ambiental:
- Clasificación: En este punto los flujos elementales son evaluados y asociados con diferentes categorías de impacto para su posterior evaluación.
- Caracterización: La caracterización es el momento donde todos los flujos elementales ( $E$ ) son ponderados por sus respectivos factores de emisión ( $FE$ ) (factores que representan el impacto asociado a una categoría de impacto para cada flujo dependiendo de su naturaleza) llegándose a una puntuación ambiental ( $PA$ ):

$$PA = \sum_i FE_i \cdot E_i \quad (3.1)$$

### 3.3.4. Etapa 4: Interpretación de resultados

Si bien esta etapa se muestra como última es transversal a la metodología y se puede aplicar después de concluir con cualquiera de las tres etapas anteriores. Consiste en analizar los resultados obtenidos y tomar decisiones, ya sea con respecto a la misma aplicación de la metodología y volver a aplicar alguna etapa con cambios motivados por el análisis de los resultados, o generar recomendaciones sobre el ciclo de vida del proceso o el producto debido a los resultados de la Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida. En general el análisis de resultados se realiza en función a las etapas definidas en el ciclo de vida con el fin de identificar procesos de alto impacto ambiental.

# Capítulo 4

## Procesos de conversión de residuos orgánicos: Alternativas a comparar

En el siguiente capítulo se explican las alternativas seleccionadas para comparar mediante el Análisis de Ciclo de Vida.

### 4.1. Digestión Aeróbica

La digestión aeróbica o compostaje es el proceso a través del cual la materia orgánica es degradada en presencia de oxígeno. Sus principales entradas son materia orgánica y oxígeno, mientras que sus principales productos son energía en forma de calor, dióxido de carbono ( $CO_2$ ), vapor de agua y materia orgánica descompuesta estabilizada, lo que implica que no siguen ocurriendo reacciones de descomposición [43]. El objetivo del proceso es transformar la materia orgánica estructurada (materia orgánica con una estructura definida proveniente de los procesos vitales de organismos vivos) en materia orgánica disponible para ser utilizada, principalmente, por el dominio vegetal en su ciclo de vida, lograr destruir semillas, insectos y sus huevos, agentes patógenos para humanos e infecciones que afecten a plantas, lo que hace del producto final apto para ser utilizado directamente como abono [44].

#### 4.1.1. Proceso de digestión aeróbica

Existen dos etapas principales en el proceso de digestión aeróbica: la etapa activa y la etapa de curado, las que tienen directa relación con la temperatura del sistema (ver figura 4.1). La etapa activa, es la primera etapa del proceso de degradación de la materia orgánica, comienza a operar en un régimen de temperatura mesófilo y transita a un régimen de temperatura termófilo, y es el momento en la que la mayoría de la descomposición ocurre. Junto en esto, es la etapa en la que se requiere la mayor rigurosidad en la inyección de oxígeno al sistema, tiene un alto potencial de generación de olores y ocurre la descomposición de la mayor parte de los sólidos volátiles biodegradables. La etapa de curado es la segunda del proceso de compostaje y es el momento en el que la materia orgánica termina de degradarse y estabilizarse. Se caracteriza por operar a una menor temperatura que la etapa activa (el sistema vuelve a un régimen de temperatura mesófilo), ya que existe menor actividad microbiana que genere calor, por lo tanto, la inyección de oxígeno al sistema puede ser menor o incluso nula en algunos

casos. Esta etapa tiene tres objetivos principales: (i) la degradación de orgánicos refractarios<sup>1</sup>, (ii) la estabilización de la población de microorganismos mesófilos, y (iii) permite que se ralentice la cinética del sistema [44].

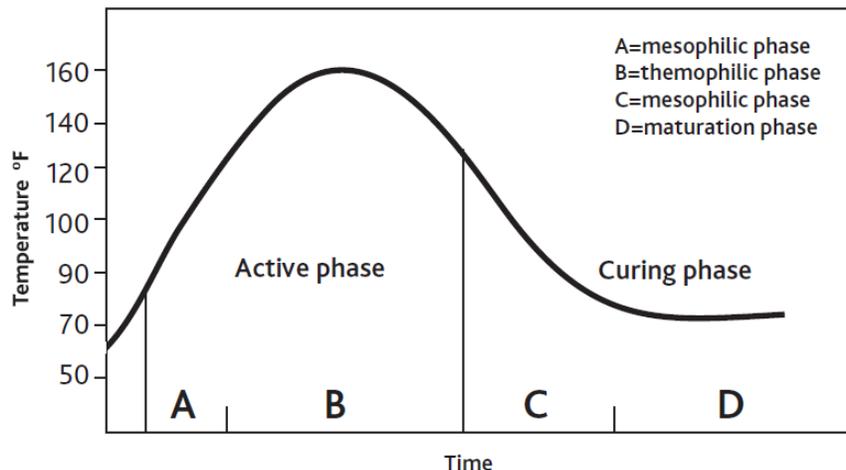


Figura 4.1: Comportamiento de la temperatura en las etapas de la digestión aeróbica [46].

#### 4.1.2. Variables que afectan el proceso

Las variables que afectan el proceso de compostaje y los efectos que tienen son variados, generando diferentes consecuencias en el producto final y afectando los subproductos que se generan. Los principales factores que afectan el proceso de digestión aeróbica son :

##### *Concentración de oxígeno*

El proceso de digestión aeróbica depende de la concentración de oxígeno en el flujo de aire alimentado: si la concentración de oxígeno es insuficiente se desarrollarán con mayor facilidad microorganismos anaeróbicos, aumentando la generación de metano ( $CH_4$ ) y malos olores. Los microorganismos aeróbicos son capaces de ejecutar sus funciones de manera óptima al estar en un ambiente con una concentración mayor al 10%, por lo tanto, es suficiente airear la materia orgánica con aire del ambiente, ya que presenta una concentración de oxígeno al rededor del 21% [47].

##### *Temperatura*

El compostaje es un proceso exotérmico, por lo tanto, la generación de calor aumenta la temperatura de la materia orgánica. Se ha observado que los sistemas de digestión aeróbica en regímenes termófilos (40°C a 70°C) tienen cinéticas más rápidas que los regímenes mesófilos o psicrófilo, además son condiciones que aseguran la destrucción de patógenos y semillas (agentes no deseados en el producto final). Sin embargo, el aumento de temperatura por sobre los 70°C inhibe la acción de los microorganismos aeróbicos ralentizando el proceso o incluso deteniéndolo. El rango óptimo de temperatura es entre 55°C y 65°C [47].

<sup>1</sup> Orgánicos refractarios: Mezcla heterogénea de compuestos orgánicos relativamente difíciles de biodegradar [45]

### *Humedad y porosidad del flujo de alimentación*

El agua presente en la materia orgánica es necesaria para el metabolismo de los microorganismos, pero el exceso hace que los poros de la mezcla se llenen de agua, evitando el paso de oxígeno y generando un ambiente anaeróbico. La humedad necesaria depende de la materia orgánica, mezclas con estructuras rígidas, como chips de madera o residuos de poda, pueden tener un contenido de agua por sobre el 60 % en masa; sin embargo, la humedad de los residuos orgánicos domiciliarios debe ser controlada con mayor rigurosidad debido a la heterogeneidad de la mezcla. La humedad óptima para mezclas heterogéneas es entre el 50 % y el 60 % en masa [47].

### *Acidez*

El pH de la materia orgánica define la presencia de diferentes microorganismos: mientras que las bacterias se desarrollan de forma óptima en un rango menor (6,0-7,5), los hongos tienen un desempeño óptimo en un rango más amplio (5,5-8,0). Los sistemas que operan por sobre el pH 7,5 promueven la generación de amonio en forma gaseosa (disminuyendo la masa de nitrógeno en el compost generado y generando malos olores); sin embargo, los residuos orgánicos domiciliarios son poco susceptibles a este problema debido a su carácter ácido [47].

### *Tamaño de partícula*

Si bien a menor tamaño de partícula existe una mayor área superficial, lo que hace que la degradación sea más rápida; también genera una menor porosidad impidiendo el paso del oxígeno. El tamaño ideal de partícula es de 0,3 [cm] a 1,2 [cm] [47].

### *Nutrientes*

Si bien existe una gran cantidad de especies necesarias para que los microorganismos realicen su actividad metabólica de forma óptima, los nutrientes críticos son el carbono y el nitrógeno. El carbono es clave para los microorganismos ya que forma parte del proceso a través del cual obtienen energía (oxidando la materia orgánica en presencia de oxígeno, generando dióxido de carbono) y es el bloque principal que construye su estructura física. Por otro lado, el nitrógeno es esencial para el metabolismo de las células, involucrándose en la construcción de proteínas, ácidos nucleicos y enzimas. La razón óptima entre el carbono y el nitrógeno (C:N) es entre 25:1 y 35:1. La alimentación en exceso de nitrógeno favorece la generación de amonio en forma gaseosa y olores, mientras que la escasez generará una falta de nutrientes para el metabolismo de los microorganismos, deteniendo el proceso de degradación [47].

A continuación se muestra una tabla resumen con los parámetros óptimos para los sistemas de degradación aeróbica.

Tabla 4.1: Resumen de parámetros óptimos para los sistemas de digestión aeróbica. Elaboración en base a [47]

<i>Parámetro</i>	<i>Rango óptimo</i>
<i>Oxígeno [% v/v]</i>	<i>&gt;10</i>
<i>Temperatura [°C]</i>	<i>55 - 65</i>
<i>Humedad [% en base seca]</i>	<i>50 - 60</i>
<i>Tamaño de partícula [cm]</i>	<i>0,3 - 1,2</i>
<i>Acidez [pH]</i>	<i>6,0-7,5</i>
<i>C:N</i>	<i>25:1 - 35:1</i>

### 4.1.3. Etapas del proceso industrial

El proceso de compostaje a escala industrial se compone de tres macroetapas principales: (i) el pre-procesamiento, (ii) la etapa de digestión aeróbica, y (iii) el post-procesamiento (ver figura 4.2). Mientras que la segunda etapa es en la que ocurre el proceso de transformación de la materia orgánica, la primera y tercera etapa cumplen la función de acondicionamiento de flujos según los requerimientos del proceso y del producto respectivamente [44].

#### *Pre-procesoamientos*

En primer lugar, los residuos orgánicos domiciliarios constituyen un flujo heterogéneo en composición y tamaño de partícula. Es necesario una primera operación de separación mecánica donde se depure el flujo de residuos orgánicos. Debido a que el flujo es generado a partir de la separación en el origen puede contener trazas de materiales como plásticos, vidrios, metales, u otros residuos que pueden afectar los equipos del proceso o la calidad del producto final. Luego, para asegurar la degradación uniforme de los residuos es necesario homogeneizar el tamaño de partícula del flujo, por lo tanto, la etapa de depurado debe ser sucedida por una etapa de triturado.

En segundo lugar, se deben ajustar los parámetros de humedad y nutrientes, para lograrlo existen dos elementos de modificación: elementos de modificación estructural y de humedad (*EMEH*), y elementos de modificación energética (*EME*). Los primeros son partículas orgánicas o inorgánicas que tienen por objetivo disminuir la densidad de la mezcla y aumentar su porosidad, por lo que deben cumplir con la característica de tener una baja humedad. Comúnmente se utiliza materia vegetal seca como residuos de poda o de la industria maderera con un tamaño de partícula mayor al de los residuos orgánicos, haciendo su degradación más lenta y posibilitando el reciclaje del elemento de modificación después de una etapa de secado. Los segundos son elementos que aporten al contenido nutricional de la mezcla. Se puede reciclar parte del producto obtenido para acondicionar los nutrientes de los residuos orgánicos, esto también ayuda a regular la porosidad y la humedad del flujo.

#### *Digestión aeróbica*

La digestión aeróbica está constituida por la etapa activa y la etapa de curado, descritas en la Sección 4.1.1.

### *Post-procesamiento*

El post-procesamiento es una segunda etapa de depuración, por lo tanto, su complejidad depende de la eficiencia de la etapa de depuración en el pre-procesamiento. En este punto se asegura la pureza del compost producido y se separan partículas o elementos no deseadas del producto final. En el caso de utilizar elementos de modificación estructural y de humedad son separados para ser recirculados.

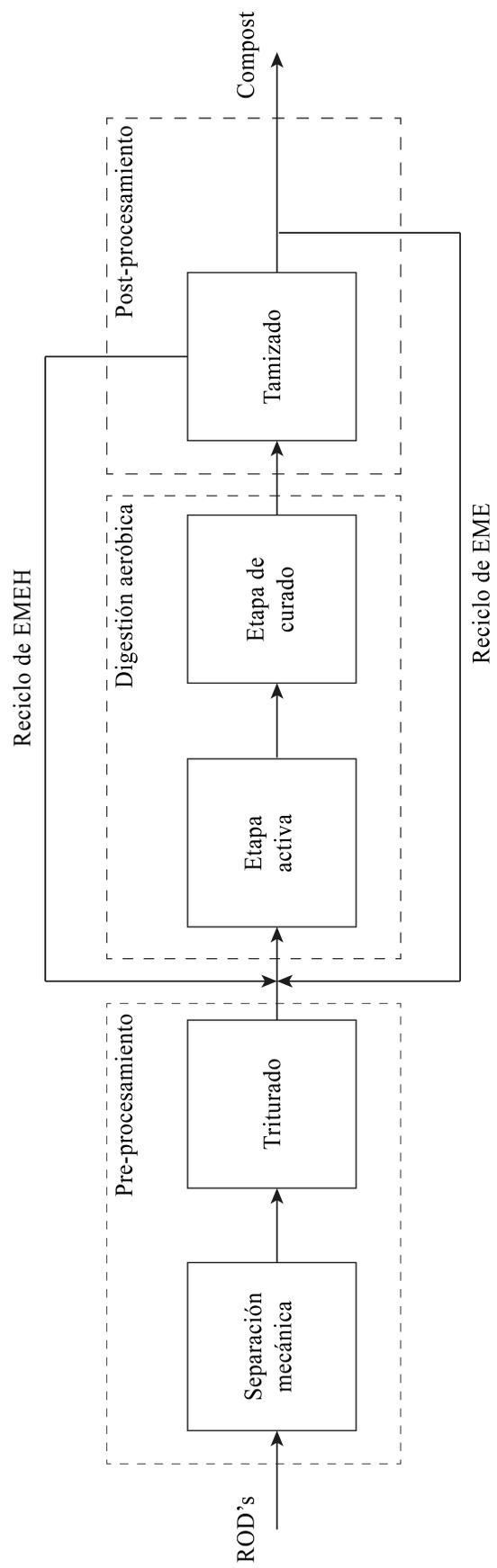


Figura 4.2: Etapas del proceso de digestión aeróbica industrial. Adaptado de [44].

## 4.2. Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso en el que se degradan compuestos orgánicos mediante la acción de microorganismos en ausencia de oxígeno hasta obtener primeramente metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ), además de otros compuestos como hidrógeno ( $H_2$ ), nitrógeno ( $N_2$ ) y amoníaco ( $NH_3$ ). Sin embargo, la producción de metano y dióxido de carbono son sustancialmente mayor que la de otros gases, alcanzando en promedio un 65 % y 30 % másico del biogás respectivamente. Debido a su alta concentración de metano es una buena alternativa para obtener energía, ya sea de manera directa aprovechando su poder calorífico o a través de la generación eléctrica [26].

### 4.2.1. Proceso de digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso que se compone de tres etapas que ocurren secuencialmente: hidrólisis, acidogénesis y acetogénesis, y metanogénesis (ver figura 4.3) [27, 28, 29].

#### *Hidrólisis*

Es la primera etapa del proceso de digestión aeróbica donde las macromoléculas orgánicas, como cadenas largas de polisacáridos, lípidos y proteínas son degradadas a sus respectivos monómeros. La ruptura de las cadenas orgánicas ocurre en el medio extracelular por medio de grupos enzimáticos especializados como lipasas, proteasas, amilasas y celulasas. Es considerada la etapa más estable del proceso de digestión anaeróbica, por lo tanto, poco susceptible a variaciones en el medio.

#### *Acidogénesis y acetogénesis*

Los monómeros producidos en la etapa de hidrólisis son convertidos en alcoholes, lactatos,  $CO_2$ ,  $H_2$ , formiatos, ácidos grasos volátiles (*AGV's*) como acetatos, propanoatos, butiratos y valeratos, entre otros compuestos orgánicos. Es considerada una etapa rápida, por lo tanto, es necesario observar la concentración de *AGV's* producidos para que el aumento en su concentración no disminuya el pH del sistema, ya que podría inhibir la metanogénesis.

Si bien un gran número de especies producidas en la acidogénesis pueden ser utilizadas directamente por microorganismos metanógenos, como el  $CO_2$ , el  $H_2$ , los formiatos, o el acetato, es necesario que las demás especies (especies intermedias) terminen de degradarse para poder ser consumidas en la etapa productora de metano. La acetogénesis es una etapa que convive con la etapa de acidogénesis en la que los productos intermedios, junto con cadenas orgánicas que no se hayan logrado degradar en la etapa de hidrólisis, son degradadas hasta obtener ácido acético,  $CO_2$  y  $H_2$ .

#### *Metanogénesis*

La última etapa del proceso de digestión anaeróbica es llevado a cabo por un grupo de arqueas llamadas metanógenas donde desatacan tres tipos: las acetoclásticas, que convierten el acetato en metano y dióxido de carbono; las hidrogenotróficas, que reducen

dióxido de carbono mediante hidrógeno o formiatos para formar metano; y las metilótroficas, que utilizan compuestos con radicales metilos presentes para producir metano. Sin embargo, en sistemas alimentados con residuos orgánicos domiciliarios la mayoría del metano (70 %) es producido por arqueas metanógenas del tipo acetoclásticas, seguidas por las hidrogenotróficas (27 %-30 %), y solo una pequeña fracción es producida por las metilótroficas. A diferencia de la hidrólisis, que es la etapa más susceptible a cambios en el ambiente como el pH y la temperatura.

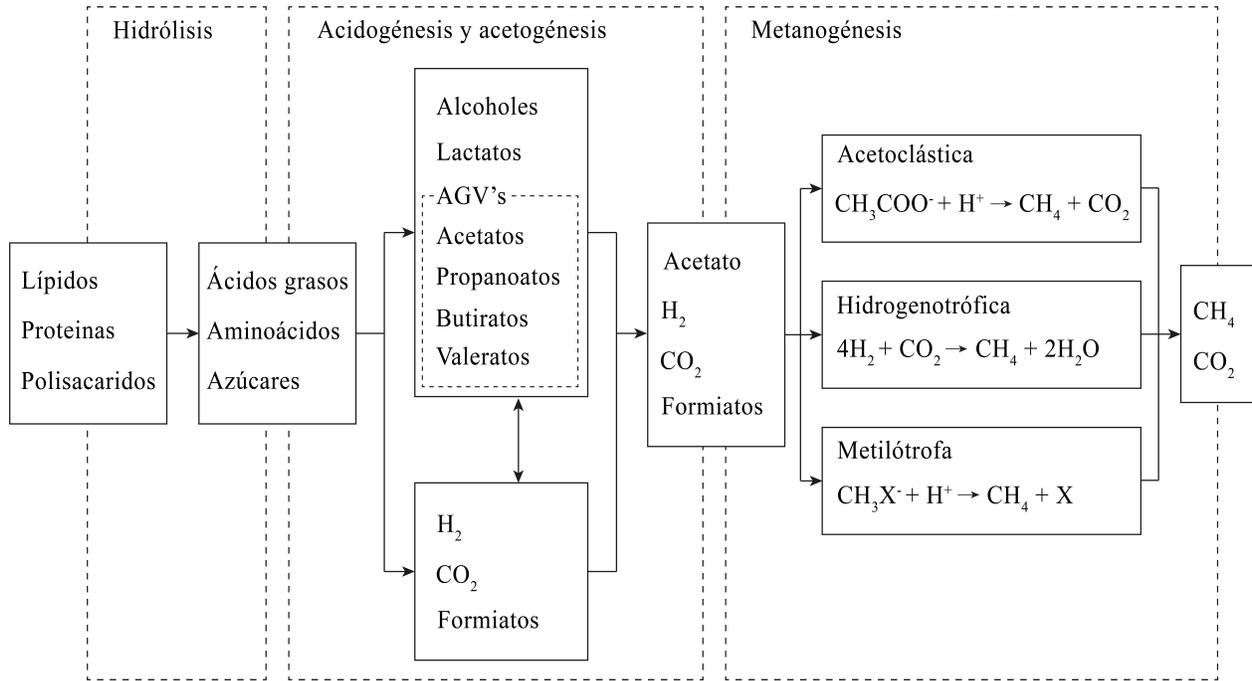


Figura 4.3: Proceso de la digestión anaeróbica. Elaboración propia.

#### 4.2.2. Variables que afectan el proceso

Las variables descritas a continuación afectan directamente el desempeño de la operación, influyendo en las características de los productos y subproductos del proceso. Los principales factores que afectan al proceso de digestión anaeróbica son:

##### *Temperatura*

La digestión aeróbica puede llevarse a cabo a diferentes temperaturas, definiéndose tres diferentes regímenes según la temperatura a la que se opere: psicrófilo, mesófilo y termófilo. Si bien los regímenes se diferencian según la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso, la diferencia en el desempeño está relacionada a los microorganismos que logran proliferar en diferentes temperaturas. De esta manera, los microorganismos psicrófilos se desempeñan mejor a temperaturas bajas (10°C-25°C), los mesófilos a temperaturas medias (28°C-37°C) y los termófilos a temperaturas altas (50°C-65°C) [30].

Operar los procesos de digestión anaeróbica en regímenes termófilos genera una tasa de digestión mayor, así como también una mayor recuperación de biogás. Algunos autores mencionan que podría compensar desventajas, como calentar el sistema a mayores temperaturas que regímenes mesófilos o psicrófilos [31].

A continuación, se muestra una tabla con las características de los tres regímenes (ver tabla 4.2).

Tabla 4.2: Características de los regímenes de operación según la temperatura de operación. Elaboración en base a [30] y [31].

<i>Parámetro</i>	<i>Psicrófilo</i>	<i>Mesófilo</i>	<i>Termófilo</i>
<i>Temperatura promedio de operación [°C]</i>	<i>10-25</i>	<i>28-37</i>	<i>50-65</i>
<i>Tasa de degradación</i>	<i>Baja</i>	<i>Media</i>	<i>Alta</i>
<i>Tiempo de residencia promedio [días]</i>	<i>50</i>	<i>25</i>	<i>10</i>
<i>Tolerancia a perturbaciones del sistema</i>	<i>Alta</i>	<i>Media</i>	<i>Baja</i>

### *Humedad*

Como ya se ha mencionado la presencia de agua en el proceso de digestión anaeróbica es necesaria para que los microorganismos tengan un medio donde realizar sus funciones vitales. Existen dos regímenes de digestión anaeróbica en función de la fracción de agua en el sistema: la digestión seca y la digestión húmeda, la primera si la masa total de sólidos es mayor al 15 %, y la segunda si la masa total de sólidos es menor al 15 % [32].

### *Tamaño de partícula*

El tamaño de partícula del flujo de residuos orgánicos influye directamente en el tiempo que demora el proceso de degradación de los residuos. Es necesario homogeneizar y reducir el tamaño de partícula antes de alimentar el flujo en el digester, con el objetivo de asegurar el avance más rápido posible del proceso de digestión en todos los puntos del sistema por igual. Además, al disminuir el tamaño de partícula se aumenta la viscosidad del flujo, evitando procesos de flotación que perjudiquen el funcionamiento del digester. Se recomiendan reducir el tamaño de partícula hasta el rango de entre 1 y 2[mm] [33].

### *Acidez*

El pH en el sistema varía a lo largo del proceso según la etapa de digestión en la que se encuentre, es más ácido en las primeras etapas (cercano a 6) y más alcalino cuando el sistema comienza a aumentar la producción de metano en la etapa de metanogénesis. El sistema se comporta como buffer dependiendo de la concentración de  $CO_2$  gaseoso, la concentración de amoníaco disuelto en la fase líquida y la fracción másica de agua en el sistema [34]. Es importante asegurar un pH relativamente estable entre 6,5 y 7,5. En este rango se asegura una mayor actividad de los microorganismos y aumenta la eficiencia de la degradación de la materia orgánica [31].

### *Tasa de alimentación*

El flujo de materia orgánica que es añadido al proceso debe ser el máximo posible aceptado por el sistema, considerando que existe una cota máxima. Si se alimenta mucha

materia orgánica los procesos de acidogénesis, más rápidos que los de metanogénesis, disminuirá el pH del medio debido al aumento de la concentración de  $AGV's$  y desestabilizará o detendrá el proceso de acidogénesis. Una tasa de alimentación promedio en plantas de tratamiento de aguas servidas es de entre 0,5 y 1,6 [kg  $SV/m^3/día$ ] [31].

#### *Nutrientes*

El carbono y el nitrógeno son dos nutrientes claves para el desarrollo celular. La razón entre carbono y nitrógeno varía según la naturaleza de la materia orgánica; sin embargo, para procesos de co-digestión o procesos de digestión en base a materia orgánica heterogénea, se ha reportado una proporción óptima cercana a 25:1 (C:N). Una menor proporción de C:N, o una mayor masa de nitrógeno relativa a la masa total de carbono, puede generar una mayor producción de amoníaco y  $AGV's$ . El aumento de ambos intermediarios puede generar la inhibición de los microorganismos metanógenos [31].

### **4.2.3. Etapas del proceso industrial**

El diseño de plantas de digestión anaeróbica es variado y obedece a las necesidades de cada flujo de alimentación y las variables ambientales del territorio; además de diferencias en la automatización de las plantas según el acceso a la tecnología de cada caso. Sin embargo, todas obedecen el mismo esquema general estructurado en tres macroetapas: pre-procesamiento, digestión anaeróbica y post-procesamiento (ver figura 4.4).

#### *Pre-procesamiento*

El pre-procesamiento tiene por objetivo acondicionar el flujo de residuos orgánicos para ser alimentado de forma óptima en la etapa de digestión anaeróbica. El acondicionamiento del flujo de alimentación contempla dos etapas principales: la separación de agentes contaminantes (plásticos, vidrios, metales, etc.) y la homogeneización del flujo a través de etapas de moliendas y mezclado. Además, se ajustan parámetros como la humedad a través de la inyección de agua fresca y la recirculación de percolado [32, 35].

#### *Digestión Anaeróbica*

Luego, el flujo es alimentado en el digestor donde ocurre la degradación de la materia orgánica. Existen diversas configuraciones de equipos que logren el objetivo de degradar los residuos orgánicos, el régimen de alimentación, el régimen de humedad, y el número de etapas o fases son los parámetros más importantes para definir la etapa de digestión anaeróbica. Por otro lado, es necesario considerar un sistema de intercambio de calor para mantener constante la temperatura de operación del sistema [32, 35].

#### *Post-procesamiento*

Finalmente, la última parte del proceso acondiciona los flujos de salida del digestor y está compuesta por dos líneas: la gaseosa y la sólido-líquida. La línea gaseosa está compuesta por tres etapas: la depuración del biogás, almacenaje del metano y recuperación energética, donde se utiliza el metano como combustible para obtener energía eléctrica. La obtención de energía eléctrica depende de la concentración de metano presente en el biogás, mientras más alta la concentración es posible extraer mayor energía por

metro cubico de biogás. Así, la etapa de depuración tiene dos subetapas, la primera, necesaria debido a normas ambientales, tiene por objetivo limpiar el biogás de impurezas que dañen los sistemas de recuperación energética o que generen especies dañinas en la combustión, como el  $H_2S$ , el  $NH_3$  y los  $COV$ s; la segunda, optativa, tiene por objetivo aumentar la calidad del biogás al separarlo del  $CO_2$  y aumentar la concentración de  $CH_4$ . La línea solido-líquida está compuesta por dos etapas: la separación entre el percolado y el digestato, y la estabilización del digestato (generalmente a través de procesos de digestión aeróbica) [32, 35].

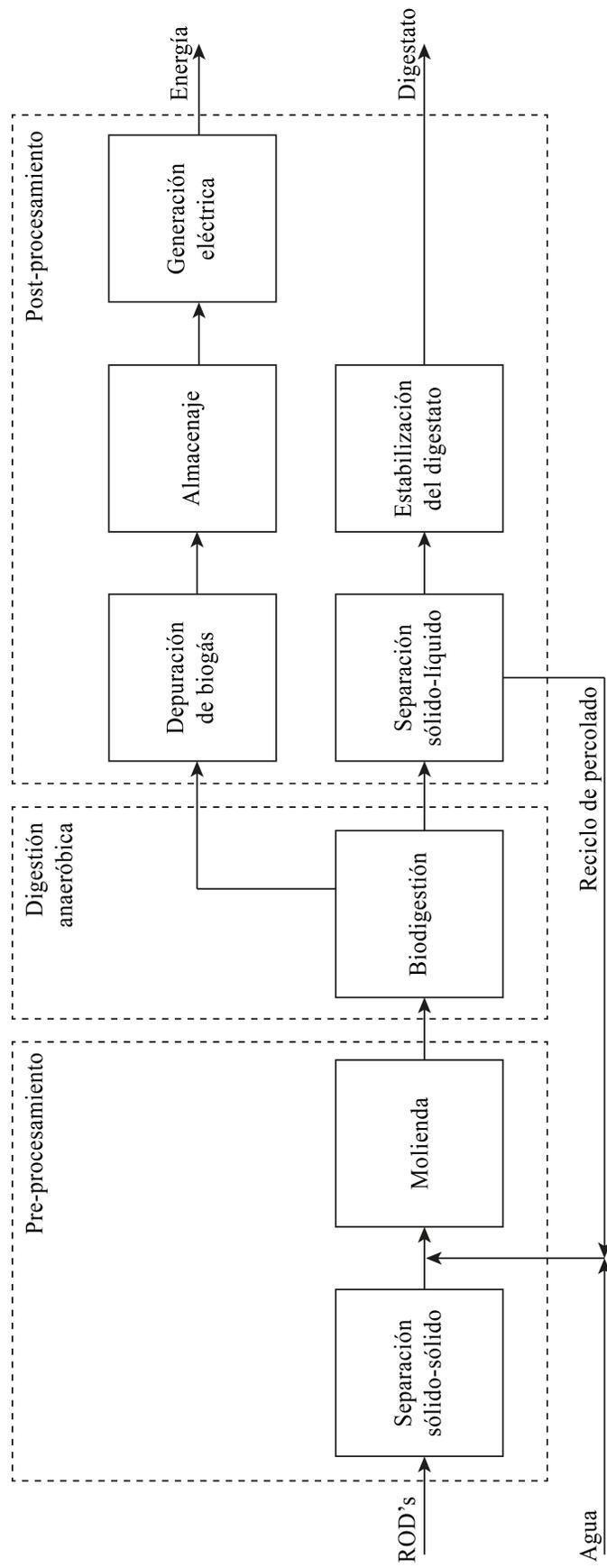


Figura 4.4: Etapas del proceso de digestión anaeróbica. Elaboración propia.

### 4.3. Recuperación de gases desde rellenos sanitarios

Los rellenos sanitarios son estructuras civiles que tienen por objetivo focalizar y administrar la disposición final de residuos sólidos generados por una comunidad reteniéndolos indefinidamente.

La estructura de los rellenos sanitarios está compuesta por cuatro partes principales: (i) las capas de residuos sólidos dispuestas en 'celdas' (volumen de residuos sólidos compactados en un día), (ii) las capas de aislante y tierra, (iii) el sistema de recolección de lixiviado, y (iv) el sistema de recolección de biogás. Las primeras dos son las partes que constituyen formalmente la estructura del relleno sanitario, mientras que los últimos dos son estructuras que sostienen la correcta gestión de los efluentes del sistema (ver figura 4.5). La estructura de capas intercaladas es esencial, cumplen la función de evitar la libre circulación de flujos de agua internos (la humedad de los residuos) y externos (aguas lluvia o aguas subterráneas), la canalización del lixiviado generado en el relleno, y contener las cámaras de biogás que se generan [48].

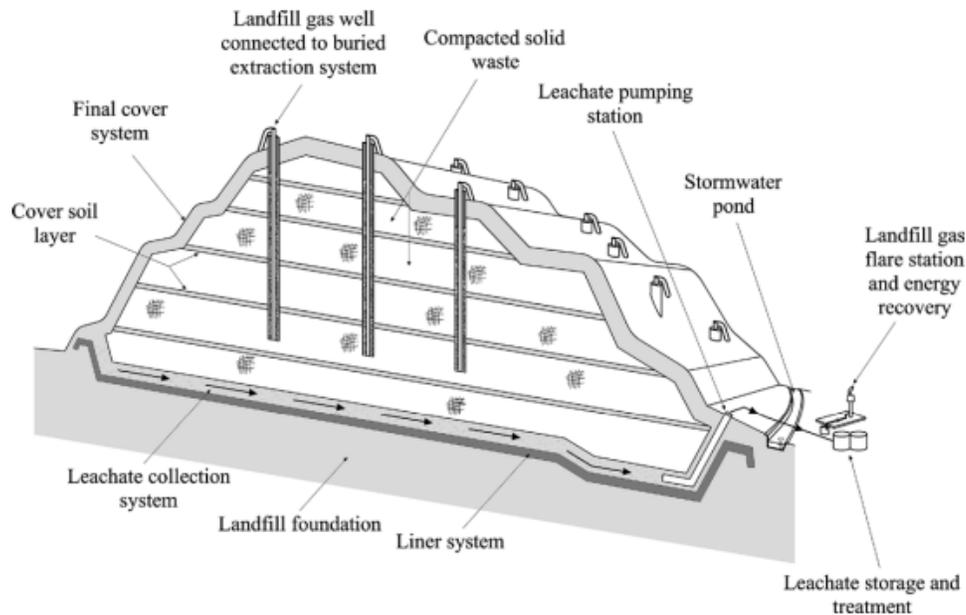


Figura 4.5: Estructura general de un relleno sanitario [48].

La estructura puede ser entendida como un reactor donde su composición varía en el tiempo debido a las reacciones que ocurren en su interior. Si bien la materia es transformada debido a procesos físicos, químicos y biológicos, es la degradación biológica de la materia orgánica la que influye en mayor medida la dinámica del sistema. Los principales flujos de entrada son: residuos sólidos y agua, mientras que las principales salidas son: lixiviados (líquido generado por la solución de especies en el agua que circula en la estructura) y biogás provenientes de la degradación anaeróbica de la materia orgánica. A diferencia de un reactor convencional, el relleno está expuesto en mayor medida a perturbaciones del ambiente no

controladas, lo que hace variable la composición de sus efluentes [49].

Los rellenos sanitarios son una alternativa atractiva para la recuperación energética debido a la generación de biogás dentro de la estructura. Actualmente, una forma viable de recuperar los gases producidos es recolectarlos a través de un sistema de tuberías y alimentarlos como combustible a generadores eléctricos, como motores a combustión [49].

#### 4.3.1. Mecanismo general de la generación de gases a partir de rellenos sanitarios

La generación de gases en los rellenos sanitarios se producen en las capas de residuos y son el resultado de la degradación de los compuestos orgánicos en presencia de microorganismos aeróbicos y anaeróbicos. Si bien la mayoría de la descomposición se genera en ambientes anóxicos, es cierto que debido a la naturaleza de la estructura no es posible llegar a esta condición sin antes haber sido cubierta por la capa de aislante. Por lo tanto, desde el punto de vista de la degradación de materia orgánica, la generación de gases en rellenos sanitarios es una combinación entre el proceso de digestión aeróbica y anaeróbica [48].

El proceso de degradación de la materia orgánica está compuesto por cinco etapas: (i) la etapa aeróbica, (ii) la etapa anóxica, (iii) la etapa metanogénica inestable, (iv) la etapa metanogénica estable, y (v) la etapa metanogénica decreciente (ver figura 4.6):

##### *Etapa aeróbica*

Los microorganismos aeróbicos gobiernan esta etapa debido al oxígeno atrapado entre los residuos en el proceso de compactación. Ocurren los procesos de descomposición aeróbica descritos en la sección 4.1.1 y termina cuando el oxígeno es consumido por completo. En esta etapa la concentración de  $CO_2$  aumenta junto con la concentración de ácidos grasos volátiles, mientras que la concentración de  $O_2$  llega a valores cercanos a cero [48].

##### *Etapa anaeróbica*

Una vez la concentración de oxígeno comienza a disminuir la población de microorganismos aeróbicos decrece mientras la población de microorganismos anaeróbicos aumenta. Desde este punto comienza a gobernar la descomposición anaeróbica descrita en la sección 4.2.1. En esta etapa se terminan de generar los ácidos grasos volátiles, lo que supone una mayor concentración de microorganismos acidogénicos [48].

##### *Etapa metanogénica inestable*

Comienza la producción de metano en el sistema y la concentración de  $CO_2$  y ácidos grasos volátiles caen. Por lo tanto, los microorganismos que gobiernan esta etapa son los acetogénicos [48].

##### *Etapa metanogénica estable*

El sistema comienza a ser gobernado por microorganismos metanógenos y la producción de metano se estabiliza [48].

### *Etapa metanogénica decreciente*

La concentración de materia orgánica no degradada comienza a agotarse y las colonias de microorganismos comienzan a morir por falta de sustrato. Finalmente, la concentración de metano disminuye junto con la concentración de  $CO_2$  [48].

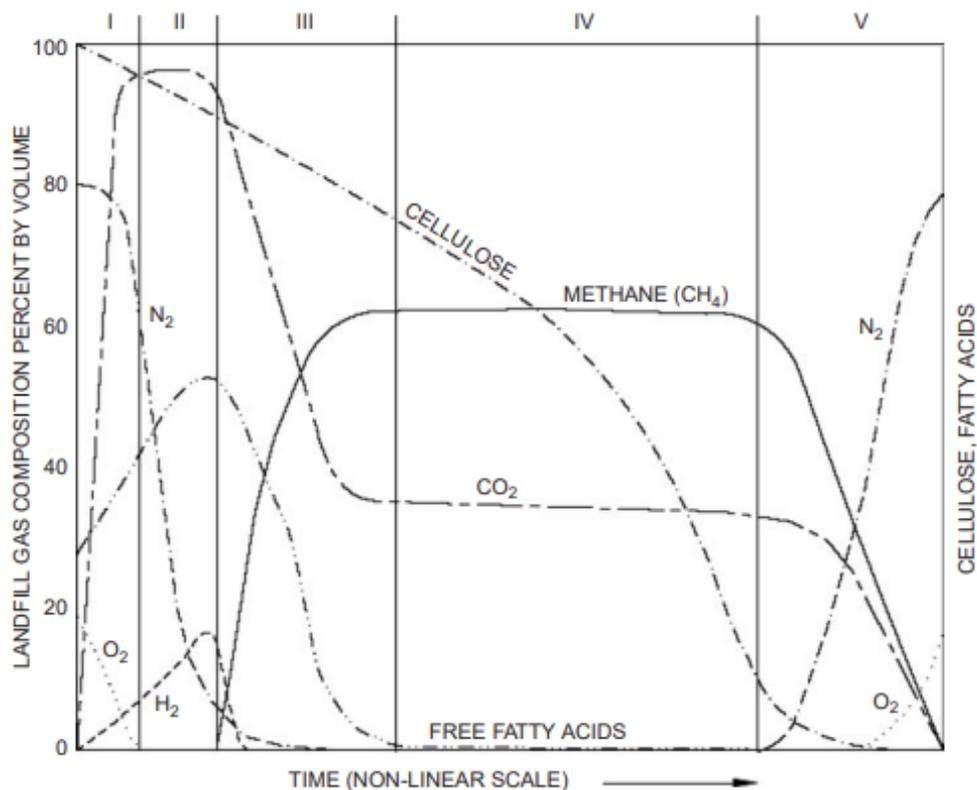


Figura 4.6: Concentración de especies principales en función de las etapas de descomposición de materia orgánica en rellenos sanitarios [50].

Si bien los procesos de degradación son técnicamente los mismos que en las alternativas de digestión anaeróbica, lo cierto es que demoran un tiempo mayor debido a la dispersión de materia orgánica en el sistema y las perturbaciones que afectan al sistema (ver tabla 4.3).

Tabla 4.3: Intervalos de tiempo que demoran las etapas de degradación de materia orgánica en rellenos sanitarios. Elaboración en base a [50].

<i>Etapas</i>	<i>Rango de tiempo que demora la etapa</i>
<i>Aeróbica</i>	<i>Horas a semanas</i>
<i>Anóxica</i>	<i>1 a 6 meses</i>
<i>Metanogénica inestable</i>	<i>3 meses a 3 años</i>
<i>Metanogénica estable</i>	<i>8 a 40 años</i>
<i>Metanogénica decreciente</i>	<i>1 a 40 años</i>

### 4.3.2. Variables que afectan el proceso

Debido a su naturaleza, el proceso de generación de gases en rellenos sanitarios se ve afectado directamente por las mismas variables que el proceso de digestión anaeróbica expuestas en la sección 4.2.2. Vale destacar que en el caso de los rellenos sanitarios ninguna variable es regulada antes de depositar los residuos en la estructura, esto hace más lentos los procesos de degradación.

Además de las variables que afectan directamente la degradación anaeróbica, el sistema está expuesto a variables ambientales que no son controladas debido a que es un sistema abierto. Las principales variables no controladas son condiciones atmosféricas que afectan la temperatura, la presión y la humedad del sistema:

#### *Temperatura atmosférica*

Como ya se ha mencionado, la variación de temperatura afecta directamente la degradación de materia orgánica. La fluctuación de temperatura ambiental hace que las capas externas del relleno sanitario tengan una tasa de degradación más inestable que las capas internas. Ya que la degradación anaeróbica es un proceso exotérmico, las capas internas son afectadas en menor medida por las fluctuaciones de temperatura atmosférica debido al calor generado por el sistema. Los factores que afectan la temperatura del sistema y su relación con la temperatura atmosférica son: la profundidad del relleno, la densidad de los residuos compactados y la humedad del sistema [50].

#### *Presión atmosférica*

La presión atmosférica afecta directamente al sistema de extracción de gases del relleno sanitario. Un gradiente negativo de presión entre el interior y el exterior del sistema generará una disminución temporal del flujo de gas extraído, mientras que un gradiente positivo implicará un aumento temporal del flujo de gas extraído. La temporalidad del aumento o disminución del flujo de gas se debe a que eventualmente el sistema llega a un punto de equilibrio con el exterior [50].

#### *Precipitación*

El agua es necesaria en el sistema para que los microorganismos tengan un ambiente adecuado para desarrollarse; sin embargo, la inyección de agua externa (en su mayoría precipitaciones) tiene una directa relación con el aumento del flujo de lixiviado que genera el sistema. Por lo tanto, si bien el agua es un componente necesario es ambientalmente deseable minimizar el flujo de lixiviado generado. En particular, las precipitaciones afectan el proceso debido al oxígeno disuelto que inyectan en el sistema, haciendo vulnerable a los microorganismos anaeróbicos para los cuales el oxígeno es tóxico [50].

### 4.3.3. Etapas del proceso industrial

Las etapas del proceso industrial se pueden agrupar en tres: el pre-procesamiento, son las operaciones que se deben llevar a cabo para que la degradación ocurra; la estabilización del relleno sanitario, es la etapa donde ocurre la degradación de la materia orgánica; y el post-procesamiento, que contempla las operaciones a las que son sometidos los efluentes del

relleno sanitario, ya sea confines de valorización o acondicionamiento de los efluente por razones ambientales y/o sanitarias.

#### *Pre-procesamiento*

A diferencia de las alternativas de digestión anaeróbica, incineración y digestión aeróbica, la alternativa de recuperación de gases desde rellenos sanitarios no presupone la separación en el origen, es decir, el flujo de alimentación al sistema no son los *RODs* si no que los residuos municipales sólidos totales (*RMSs*), lo que contempla los *RODs* más los residuos inorgánicos. Las etapas necesarias para generar las condiciones estructurales y ambientales del relleno sanitario son dos: la primera, es el transporte de los residuos desde el ingreso al sitio hasta la cima del relleno, la segunda, es la formación de las 'celdas', esto incluye el proceso de compactación de los residuos y la disposición de las capas de aislante [50].

#### *Estabilización del relleno sanitario*

La etapa contempla todo el proceso de degradación de los residuos, además de las reacciones o interacciones que pueda tener con flujos externos como el ingreso de aguas lluvia a la estructura [50].

#### *Post-procesamiento*

Está compuesta por dos líneas paralelas, cada una con el objetivo de estabilizar o valorizar un efluente del relleno sanitario.

La primera es la línea gaseosa, que tiene por objetivo valorizar la energía interna de los gases generados y minimizar el impacto que tienen en el ambiente. La primera etapa consiste en la recuperación de biogás, donde se extraen los gases del relleno sanitario mediante un sistema de tuberías. Luego, el biogás es depurado hasta obtener la calidad de gas natural (con una mayor concentración de metano), se extraen las especies no deseadas en la quema del combustible, como ácido sulfúrico, dióxido de carbono y agua. Finalmente, el gas natural es alimentado a la etapa de recuperación energética mediante un motor de combustión interna [50].

La segunda es la línea líquida, que tiene por objetivo estabilizar el lixiviado. Está compuesta por dos etapas principales, la recolección del lixiviado mediante un sistema de tuberías y bombas, y la estabilización del lixiviado. La última etapa está conformada por operaciones unitarias diseñadas para degradar los compuesto orgánicos presentes en el lixiviado. Comúnmente se utilizan piscinas de aireación y luego se concentran lo lodos resultantes, un proceso similar el de las plantas de tratamiento de aguas servidas [51].

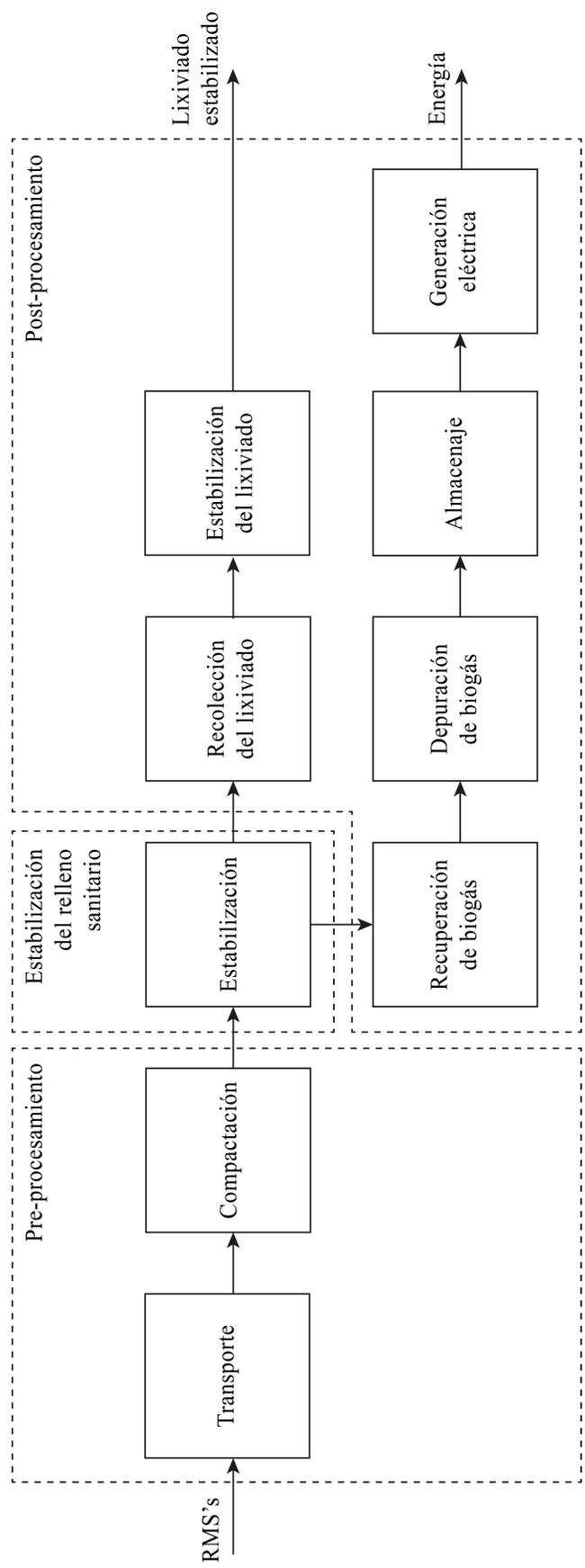


Figura 4.7: Etapas del proceso de recuperación desde rellenos sanitarios. Elaboración propia.

## 4.4. Incineración

La incineración es un proceso donde se degrada un combustible (por ejemplo, residuos orgánicos domiciliarios) en presencia de un comburente (por ejemplo, oxígeno) mediante un proceso de oxidación que libera la energía interna del combustible, dióxido de carbono, material particulado y cenizas. Ha sido una técnica atractiva debido a la reducción de volumen que genera en el combustible, el poder de desintegrar agentes patógenos e infecciosos, y principalmente por la posibilidad de aprovechar la energía interna de los combustibles. El objetivo de esta tecnología es incinerar el combustible bajo condiciones controladas con el fin de minimizar la combustión incompleta y maximizar la energía extraída [36].

Existen dos grandes clasificaciones para los procesos de incineración: sistemas basados en la de '*Combustión de Masa*' y sistemas basados en '*Combustibles Derivados de Residuos*'. Las primeras se caracterizan por el aprovechamiento energético del flujo de residuos sin acondicionar, es decir, se alimenta el proceso indiscriminadamente de las características físicas y químicas del combustible, mientras que las segundas realizan procesos de acondicionamiento con el fin de homogeneizar el flujo de alimentación de acuerdo a características físicas y químicas, y evitar el ingreso de elementos no combustibles o peligrosos para la combustión. Si bien las primeras tienen beneficios en costos de inversión, costos operacionales (debido al menor número de etapas) y son más resilientes a las características del flujo de alimentación, las segundas hacen más predecible la operación de la planta y reducen la generación de especies peligrosas en los efluentes gaseosos y sólidos debido a las etapas de depuración en el pre-procesamiento [37]. Para efectos del estudio se considerará el proceso de incineración como un sistema basado en '*Combustibles Derivados de Residuos*' debido a la naturaleza del residuo, forzado por el supuesto de que se realiza la separación en el origen.

### 4.4.1. Proceso de incineración

La incineración es un proceso que comprende cinco etapas principales: (i) el aumento de la temperatura de la biomasa, la mayoría del calor suministrado por el sistema es utilizado para aumentar la temperatura del combustible; (ii) la deshidratación de la biomasa, el combustible se seca ya que el agua presente en la biomasa es evaporada; (iii) la desvolatilización, se generan especies volátiles y cenizas; (iv) la combustión de las especies volátiles; y (v) la combustión de las cenizas. [38]

Las primeras dos etapas, en particular la etapa de deshidratación, cumplen un rol fundamental en el proceso de combustión ya que afecta directamente a su eficiencia. Si se tienen grandes fracciones de agua en el combustible, entonces gran parte de la energía suministrada al sistema para hacer entrar al combustible en el estado de ignición se usará como calor latente en la evaporación del agua. Además, el agua evaporada afecta directamente la estabilidad de la llama en la etapa de combustión de especies volátiles y cenizas, por lo que se busca evaporar poca agua para que su concentración en estado gaseoso sea la mínima. Para mejorar el desempeño del proceso de incineración se utilizan etapas de acondicionamiento del combustible para disminuir la fracción másica de agua presente.

La etapa de desvolatilización es la etapa previa a la combustión. En este punto una gran fracción de la masa de combustible es transformada a compuestos volátiles. Para el caso particular de los residuos orgánicos domiciliarios esta etapa comienza cuando el flujo alcanza temperaturas cercanas a los 400°C [39]. Las características de los productos obtenidos a partir de la combustión dependen de dos factores principales: la temperatura final y la tasa de aumento de la temperatura en el sistema, ambos influenciados por el tamaño de las partículas de biomasa. Así, una rápida transferencia de calor promueve la generación de compuestos volátiles, mientras que una lenta transferencia de calor promueve la generación de gases por sobre los compuestos volátiles.

Las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo la etapa de combustión de compuestos volátiles están directamente relacionadas con la magnitud del flujo y el tipo de emisiones que se generan (Compuestos Volátiles Orgánicos, hollín, hidrocarburos aromáticos y alquitranes). Así, la presencia de otros compuestos como Nitrógeno (N), Cloro (Cl), y fósforo (P) toman relevancia en las reacciones subsecuentes a la combustión de compuestos volátiles por su contribución a la generación de compuestos contaminantes. De la misma manera en la combustión de las cenizas influye la temperatura final alcanzada, por ejemplo, la relación entre el contenido final de oxígeno en las cenizas es inversamente proporcional a la temperatura final alcanzada en el sistema.

#### **4.4.2. Variables que afectan el proceso**

Existen diversas variables que afectan al proceso de incineración dentro de las que destacan cuatro:

##### *Temperatura, Turbulencia y Tiempo*

Los tres parámetros de operación en el proceso de incineración, en particular en la etapa de combustión, son la temperatura, la turbulencia y el tiempo. El sistema debe suministrar la energía suficiente para lograr la temperatura óptima y que el combustible llegue al estado de ignición, que la mezcla entre el combustible y el comburente estén en un régimen turbulento para maximizar la interacción entre ambas partes, y que el tiempo de operación del sistema sea suficiente para que se lleven a cabo las reacciones de oxidación [36].

##### *Humedad*

En el caso de incineración de biomasa, otra variable fundamental es la masa de agua presente en el combustible, la fracción de agua no puede superar el 50% de humedad. Por lo tanto, cuando se considera la incineración de flujos con alto contenido de humedad, como los residuos orgánicos domiciliarios (85% w/w), se debe contemplar una etapa de pretratamiento o acondicionamiento que reduzca el porcentaje de agua en el combustible. [36]

### *Tamaño de partícula*

Los sistemas basados en 'combustibles derivados de residuos' generalmente utilizan sistemas de suspensión en sus hornos, así se asegura la turbulencia y el contacto entre el combustible y el comburente. Para lograrlo es necesario homogeneizar el tamaño de partícula entre 5 y 0,2 [cm] [37].

### **4.4.3. Etapas del proceso industrial**

EL proceso de incineración contempla cuatro etapas principales: (i) el pre-procesamiento, (ii) la combustión, (iii) la recuperación energética, (iv) el post-procesamiento (ver figura 4.8).

#### *Pre-procesamiento*

Para asegurar la optimización del proceso de combustión se debe acondicionar el flujo de residuos orgánicos, principalmente con respecto a la humedad y el tamaño de partícula. El flujo entra a una etapa de separación sólido-sólido donde se extraen del flujo contaminantes no deseados, como metales, vidrios o plásticos. Luego, se regula el tamaño de partícula en la etapa de molienda [37, 40]. También, existen procesos auxiliares para el caso de la combustión de residuos orgánicos domiciliarios, los que regulan la humedad y el desempeño en el proceso de quema. Debido a que los *ROD's* tienen un alto contenido de humedad es necesaria una etapa de deshidratación donde se fije la fracción másica de agua al menos por debajo del 50%. Además, se ha evidenciado los beneficios de etapas que homogeneizen la forma de las partículas a través de procesos de peletización [41].

#### *Combustión y recuperación energética*

La etapa de combustión es la principal en el proceso de incineración, es donde ocurre la liberación de energía interna del combustible y queda disponible para ser aprovechada por la etapa de recuperación energética [41].

La etapa de recuperación energética consiste en un proceso de intercambio de calor, donde la energía de los gases de combustión es cedida al agua de un ciclo térmico cerrado. El ciclo puede ser simplificado por tres partes principales, el aumento de temperatura del agua o vaporización del agua, la generación eléctrica a través de una turbina, y la condensación del agua [41].

#### *Post-procesamiento*

La etapa de post procesamiento tiene por objetivo depurar los gases de combustión y minimizar el impacto en el medio ambiente y la salud de las comunidades que puedan entrar en contacto con especies dañinas. Las principales especies que se deben extraer de los gases de combustión son: material particulado, gases ácidos y precursores de gases ácidos ( $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $HCl$ , etc.), y compuestos orgánicos volátiles [42]. Se necesitan dos etapas principales: la separación sólido-gaseosa y la depuración de especies tóxicas.

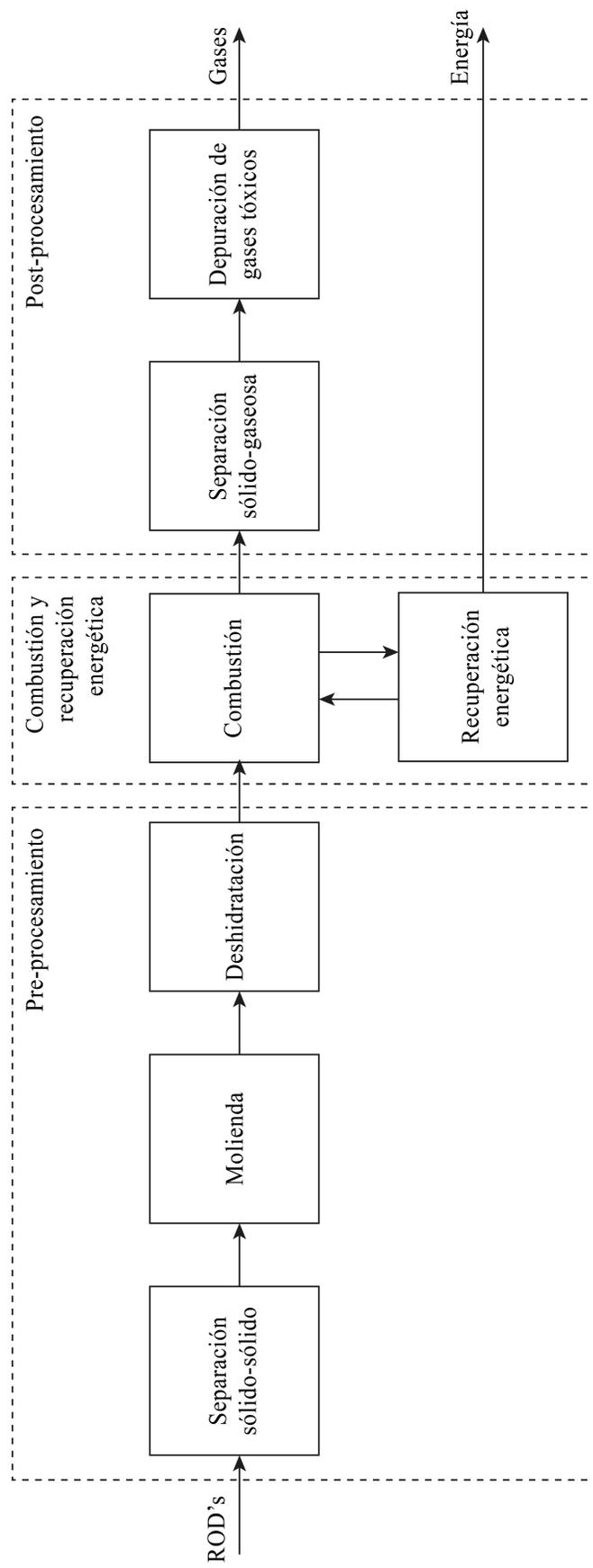


Figura 4.8: Etapas del proceso de incineración. Elaboración propia.

# Capítulo 5

## Análisis de Ciclo de Vida de las alternativas de valorización de residuos orgánicos

### 5.1. Objetivos y Alcances

En el siguiente subtítulo se desarrolla la definición de objetivos y alcances del estudio. En particular se define: la intención de aplicación de los resultados, las limitaciones debido a la elección de la metodología, las razones para llevar a cabo el estudio, el público objetivo, los objetos de estudio, la definición del marco de referencia y la definición de los límites del sistema de acuerdo a la etapa 1 del análisis de ciclo de vida definida en la Sección Metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

#### 5.1.1. Intención de aplicación de los resultados

El presente estudio tiene por finalidad comparar el desempeño ambiental de cuatro alternativas de valorización de residuos orgánicos domiciliarios: a través de la digestión anaeróbica (o biodigestión), la digestión aeróbica (o compostaje), la incineración y el aprovechamiento de biogás desde rellenos sanitarios. Los resultados del estudio tienen como propósito el ayudar a grupos de interés en la toma de decisiones con respecto a qué proyectos de valorización de residuos orgánicos llevar a cabo desde una perspectiva ambiental. Así, aportar con información para la generación de políticas públicas que favorezcan algún tipo de valorización de ROD, o para grupos interesados en levantar proyectos dentro de la industria de valorización de ROD.

#### 5.1.2. Limitaciones debido a la elección de la metodología

Los resultados obtenidos representan un parámetro cuantificable asociado a una categoría de impacto en particular y dan cuenta del potencial impacto que tiene cada alternativa respecto a las otras. No es válido comparar los resultados obtenidos en otros escenarios o con otras alternativas no consideradas, si se quiere considerar otra alternativa se debe realizar

el estudio nuevamente en base a una definición de alcances y objetivos en común. También, los resultados reflejan el potencial impacto asociado solo a un número acotado de categorías de impacto, por lo tanto, si se considerasen otras categorías de impacto los resultados no reflejarán una comparación válida entre las alternativas.

La metodología no entrega información con respecto a los riesgos físicos, económicos o sociales asociados a cada alternativa. Ni información sobre la dificultad de poner en marcha el desarrollo cada alternativa a escalas suficientes para suplir la demanda del Gran Santiago, principalmente debido a los esfuerzos asociados con la educación sobre la separación en el origen y la logística de transporte diferenciado para residuos que se deben implementar a nivel estatal que requieren tres de las alternativas comparadas.

### **5.1.3. Razones para llevar a cabo el estudio**

El modelo de producción circular se ha propuesto como una herramienta para enfrentar los síntomas de la crisis climática. Esto implica el rediseñar los procesos productivos para que deje de existir el concepto de desecho (flujo másico saliente del sistema productivo) y aprovechar energéticamente y materialmente los flujos que salen actualmente del sistema productivo lineal. Chile propone, a través de la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos 2040, reincorporar los residuos orgánicos generados por la sociedad impulsando el mercado de la valorización de residuos orgánicos, principalmente a través de la digestión aeróbica (compostaje) y anaeróbica (biodigestión). Actualmente en Chile se aplican métodos de valorización de orgánicos indirectos, como la recuperación de biogás a partir de rellenos sanitarios. Además, existen métodos utilizados a nivel mundial, como el aprovechamiento energético por incineración, que son relativamente fáciles de implementar.

El desarrollo de un nuevo mercado a través de tecnologías poco implementadas en Chile, como la digestión aeróbica, digestión anaeróbica o incineración, supone una gran inversión de recursos públicos y privados. Por el contrario, la adaptación de rellenos sanitarios para recuperar el combustible gaseoso generado en la infraestructura de forma natural podría implicar una menor inversión pública debido a que no serían necesarios impulsar cambios como: la separación desde el origen, la promoción de nuevas tecnologías a través de fondos concursables, la modificación del plan regulador comunal para la instalación de plantas de valorización, entre otros.

Debido a que el cambio de paradigma de producción lineal viene motivado desde una base ambiental es necesario contar con información que ayude a desarrollar el mercado de la valorización de residuos orgánicos con fundamentos ambientales. Por ello, el estudio pretende jerarquizar las alternativas consideradas en función de su impacto ambiental con el fin de que se estimule el desarrollo de unas más que otras.

### 5.1.4. Público objetivo

El estudio va dirigido a especialistas que estén involucrados en la generación de políticas públicas o que incidan en el otorgamiento de fondos públicos a proyectos de revalorización de residuos orgánicos. También, se dirige a equipos técnicos que desarrollen proyectos privados de valorización de residuos orgánicos a los cuales les interese evaluar el impacto ambiental de las alternativas consideradas.

### 5.1.5. Objetos de estudio

Los objetos de estudio a definir son la función, la unidad funcional y el flujo de referencia, con el fin de que la comparación entre las cuatro alternativas sea válida (ver tabla 5.1).

- **Función:** Independientemente del desempeño de cada alternativa o los beneficios que sus productos tengan en el sistema productivo, la función que cumplen las cuatro alternativas a comparar es valorizar residuos orgánicos domiciliarios. Es decir, la degradación y recuperación de productos bajo las capacidades y limitaciones de cada alternativa.
- **Unidad funcional:** La unidad funcional definida como punto de comparación entre las cuatro alternativas es la degradación total, de acuerdo a la degradabilidad de compuestos orgánicos en cada alternativa, de una tonelada de residuos orgánicos domiciliarios en el Gran Santiago.
- **Flujo de referencia:** El flujo de referencia sobre el cual se compararán las alternativas es el flujo de residuos orgánicos domiciliarios que entran al proceso de degradación principal, es decir, la etapa de degradación aeróbica, la etapa de degradación anaeróbica, la etapa de incineración y estabilización respectiva de cada alternativa. Se establece la magnitud del flujo de referencia igual a 100000 [ton/año].

Tabla 5.1: Resumen objetos de estudio. Elaboración propia.

<i>Objetos de estudio</i>	
<i>Función</i>	<i>Valorización del flujo de residuos orgánicos domiciliarios generados en el Gran Santiago.</i>
<i>Unidad funcional</i>	<i>La degradación total, según la capacidad técnica de cada alternativa, de 1 tonelada de residuos orgánicos domiciliarios generados en el Gran Santiago.</i>
<i>Flujo de referencia</i>	<i>Flujo de residuos orgánicos domiciliarios, equivalente a 100000 [ton/año], que entra a la etapa de degradación: degradación aeróbica, degradación anaeróbica, incineración y estabilización, según corresponda.</i>

### 5.1.6. Marco de referencia

El estudio utilizará el marco de referencia atribucional. No se considerarán los impactos que tengan los productos de cada alternativa estudiada en el sistema productivo. Por lo tanto, el estudio busca definir los impactos ambientales asociados a valorizar los residuos orgánicos de una determinada manera. Por ejemplo, no se tomará en cuenta el impacto que genere el reemplazo de fertilizantes artificiales por la utilización de compost o digestato.

### 5.1.7. Límites del sistema

Se considerará dentro del límite del sistema todo proceso que se lleve a cabo desde el retiro de los residuos orgánicos domiciliarios en los domicilios hasta la generación del producto valorizado final respectivo de cada alternativa: compost, asociado a la digestión aeróbica; digestato y energía eléctrica, asociados a la digestión anaeróbica; gases lavados y energía eólica, asociados a la incineración; y energía eléctrica y lixiviado estabilizado, asociado a la extracción de biogás a partir de rellenos sanitarios.

Los procesos considerados dentro del límite del sistema están representados en el diagrama de bloques general y categorizados, para las cuatro alternativas, en cuatro subprocesos: recolección, preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento (ver figura 7.5). La recolección corresponde al transporte de los residuos orgánicos domiciliarios desde los lugares de generación hasta las plantas de tratamiento respectivas, sin considerar posibles puntos intermedios como estaciones de acumulación. La etapa de preprocesamiento corresponde al proceso de acondicionamiento de los residuos orgánicos para cumplir con los parámetros necesarios para ser ingresados a la etapa de recuperación primaria. La recuperación primaria es el proceso que valoriza el flujo de residuos orgánicos, ya sea a través de procesos químicos, biológicos o físicos. Finalmente, la recuperación secundaria corresponde a la valorización de los productos provenientes de la recuperación primaria que no son directamente aprovechables, que en la mayoría de las alternativas corresponde a la generación eléctrica. En el anexo 7 se puede observar un mayor detalle en el límite del sistema de cada alternativa, la relación entre el límite del sistema, la tecnósfera y la biosfera, y sus respectivos flujos elementales.

El estudio considera los procesos de nivel cero, uno y dos, es decir, los procesos que estén involucrados de manera directa en la degradación, recuperación y valorización, del flujo de residuos orgánicos domiciliarios. No se consideraran los procesos de nivel tres y cuatro, es decir, los procesos administrativos y los procesos mediante los que se genera la infraestructura involucrados en el proceso estudiado.

#### *Especies no consideradas.*

El estudio excluye especies que estén presente en bajas concentraciones en los procesos analizados. Principalmente se debe a que la calidad de la información para los procesos es diferente; sin embargo, para que la comparación entre las alternativas sea válida el detalle de los procesos debe ser similar, por lo tanto, se decidió considerar las especies en mayor proporción dentro del inventario de emisiones. También, debido a que el estudio considera

un escenario hipotético y no compara procesos en funcionamiento o diseños de procesos con un nivel de ingeniería de detalle, entonces existe un grado de incertidumbre respecto a la fracción másica que cada especie en las diferentes corrientes.

La energía que demandan los procesos para el transporte de los flujos másicos entre las operaciones unitarias no será considerado dentro del límite del sistema. El flujo energético de transporte se excluye del análisis debido a que depende de factores específicos de la planta, como la disposición física de las etapas y el tipo de tecnología que se utilice para transportar los flujos másicos. Es válido cuestionar la validez de los resultados al excluir un flujo energético predominante en los procesos; sin embargo, la aplicación de la metodología sigue siendo válida ya que el flujo energético se excluye por igual para las cuatro alternativas comparadas.

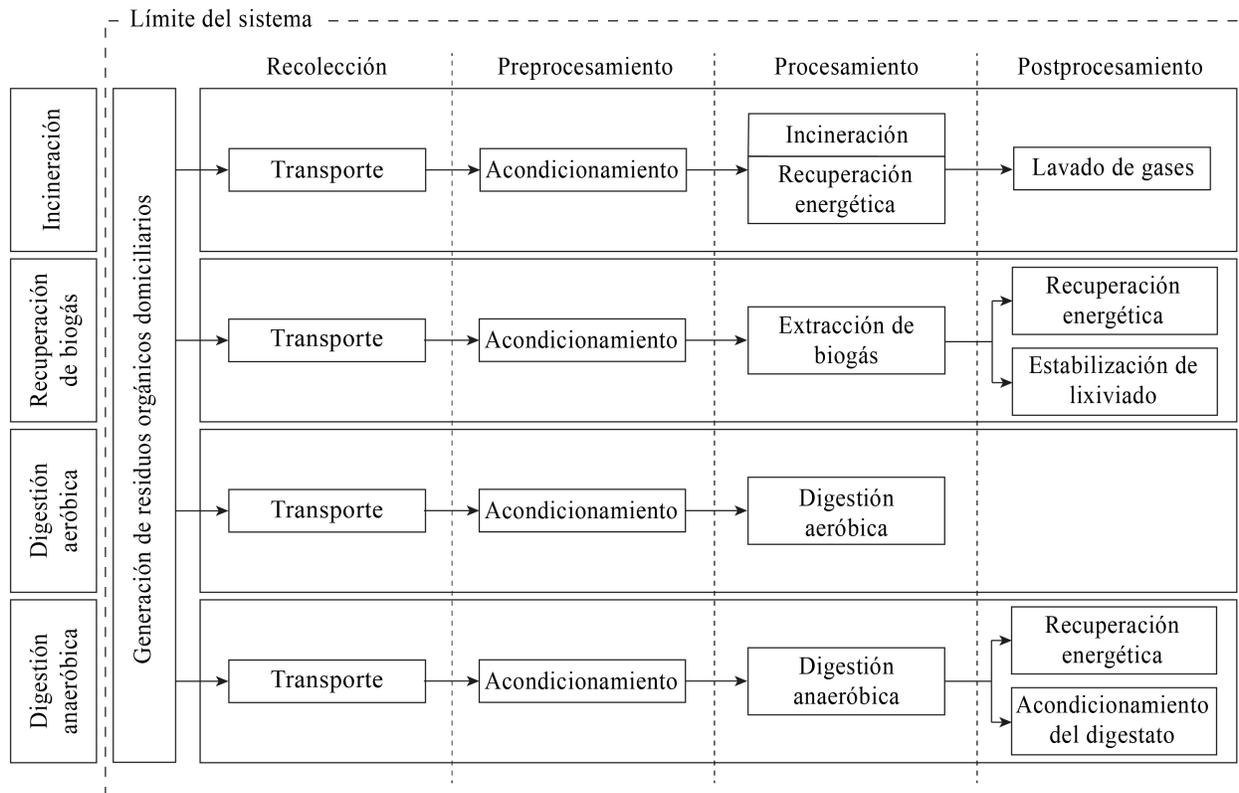


Figura 5.1: Límite del sistema simplificado de las cuatro alternativas estudiadas. Elaboración propia.

### 5.1.8. Calidad de los datos

Para la construcción del estudio se utilizaron datos de diferentes fuentes según la completitud y la calidad de la información. En primer lugar, la construcción de los balances de masa se realizó en base a textos sobre el diseño de plantas y trabajos de título en el que se hayan evaluado procesos similares a los analizados en las alternativas del estudio. Para la propuesta del proceso de digestión aeróbica y anaeróbica se utilizaron principalmente textos de diseño de plantas, *The practical handbook of compost engineering* [44] y *The biogas hand-*

book - *Science, production and applications* [34] respectivamente. Para las alternativas de recuperación de gases desde rellenos sanitarios e incineración se utilizaron trabajos de título como guías en el planteamiento de los procesos. En el caso de la incineración se tomó como referencia el trabajo de título *Evaluación de procesos de co-incineración de lodos de PTAS y otros residuos para la obtención de energía* [55]. Para la recuperación de gases se consideró el trabajo de título *Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios* [49].

Por otro lado, la estimación de la demanda energética de los procesos fue extraída de diferentes fuentes bibliográficas, principalmente publicaciones en revistas y textos de diseño de plantas.

Las tecnologías de los procesos que conforman las alternativas fueron elegidas bajo dos criterios: (i) lo más probable que ocurra, es decir, las más típicas para llevar a cabo operaciones unitarias en contextos similares, y (ii) lo más simple, asumiendo que las plantas de valorización no serán concebidas necesariamente bajo los estándares más altos en innovación. Respecto a los parámetros bajo los que opera cada etapa fueron elegidos los promedios o valores típicos.

Para la categoría de impacto *PCG*, los factores de emisión fueron extraídos de la base de datos Ecoinvent <sup>2</sup> en su mayoría. Con excepción a los casos donde se consideró que la base de datos no ofrecía una actividad representativa del proceso en cuestión o que la actividad propuesta generara incertidumbre debido a la poca especificidad en su descripción. De no considerarse el factor de emisión de Ecoinvent se estimó un factor de emisión en base al factor de caracterización de los gases emitidos por la etapa, extraídos del IPCC 2013, y el factor de emisión de la matriz energética de Chile, extraído del Ministerio de Energía de Chile.

Para la categoría de impacto *CE*, *SH* y *AR*, los factores de emisión fueron extraídos en su totalidad de la base de datos de Ecoinvent <sup>2</sup>. En los casos en que las actividades ofrecidas por la base de datos generan incertidumbre, se obvia el impacto y no se considera en la evaluación. Debido a la complejidad de estimar factores de emisión endpoint no se estima un factor de emisión propio.

### 5.1.9. Categorías de impacto

El estudio considera cuatro categorías de impacto: (i) potencial de calentamiento global (*PCG*), (ii) calidad del ecosistema (*CE*), (iii) salud humana (*SH*) y (iv) agotamiento de recursos (*AR*). La categoría de *PCG* es calculada a través del método IPCC 2013 bajo el horizonte de tiempo de 100 años, y corresponde a una categoría midpoint. Mientras que las otras tres son calculadas a través del método ReCiPe y corresponden a las tres categorías endpoint del método.

---

<sup>2</sup> La base de datos de *Ecoinvent* fue facilitada por el Dr. Felipe Díaz Alvarado, Director del Centro ProSus de la Facultad de Ciencia Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

### 5.1.9.1. Potencial de calentamiento global

El potencial de calentamiento global, también conocida como huella de carbono, es una de las categorías de impacto más utilizadas actualmente. Es un indicador que estima la contribución de un gas de efecto invernadero al calentamiento global relativo a un kilogramo de dióxido de carbono. Cabe dentro de la clasificación de indicadores de impacto midpoint sobre cambio climático, ya que evalúa la contribución que tiene un proceso al aumento del forzamiento radiativo en la tierra [22].

Matemáticamente el potencial de calentamiento global es el coeficiente entre la acumulación del forzamiento radiativo de un  $GEI_i$  en un periodo de tiempo  $T$  y la acumulación del forzamiento radiativo de el  $CO_2$  en el mismo periodo de tiempo (ver ecuación 5.1).

$$GW P_i = \frac{\int_0^T a_i \cdot C_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot C_{CO_2}(t) dt} \quad (5.1)$$

con,

- $T$ : horizonte de tiempo
- $a_i$ : forzamiento radiativo del gas  $i$  [ $\frac{W}{m^2 \cdot ppm}$ ].
- $C_i(t)$ : concentración del gas  $i$  en el tiempo  $t$  [ $ppm$ ].

El método IPCC 2013 tiene tres variaciones dependiendo del horizonte de tiempo que considera para el efecto que causan los gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera. El horizonte a 20 años, a 100 años, y a 500 años. De esta forma se observa que GEIs de vida corta, relativa a la vida del dióxido de carbono, como el metano ( $\sim 12$  años), muestran una disminución considerable al comparar su  $PCG$  a 20 años y su  $PCG$  a 100 años. A diferencia de  $GEIs$  de vida larga, relativa a la vida del carbono, como el óxido nitroso ( $\sim 120$  años), que muestran una disminución insignificante al comparar su  $PCG$  a 20 y 100 años (ver tabla 5.2) [52].

Tabla 5.2: Potencial de calentamiento global de gase de vida corta y larga en función del horizonte de tiempo. Elaboración en base a [52].

$GEI$	Tiempo de vida media en la atmosfera [años]	$PCG_{20}$ [ $kg_{CO_2eq}/kg_{GEI}$ ]	$PCG_{100}$ [ $kg_{CO_2eq}/kg_{GEI}$ ]
$CO_2$	-	1	1
$CH_4$	$\sim 12$	84	28
$N_2O$	$\sim 120$	265	264

Para el contexto de generación de políticas públicas es consensuado el utilizar un horizonte de tiempo de 100 años, por lo tanto, debido a la intención de aplicación de los resultados se

considera dicho horizonte de tiempo para la categoría de impacto.

El método no considera los impactos del  $CO_2$  ni el  $CO$  biogénicos, es decir, su factor de caracterización es equivalente a cero. Para el caso de las demás especies biogénicas, como el  $CH_4$ , el factor de caracterización es considerado como el mismo que para la combustión o degradación, física o química, de la materia orgánica.

### 5.1.9.2. Calidad del ecosistema, salud humana y agotamiento de recursos

Las categorías *CE*, *SH* y *AR* corresponden a categorías endpoint calculadas por el método ReCiPe. Así, son la ponderación de un conjunto de categorías de impacto midpoint (ver figura 5.3), y representan el potencial impacto en un "Área de Protección" de interés para la sociedad.

Tabla 5.3: Relación entre categorías de impacto midpoint y endpoint según el método ReCiPe. Elaboración en base a [53].

Categoría endpoint	Categoría midpoint	Especie relevante
Calidad del ecosistema	Calentamiento global	GEI
	Uso de agua	Agua
	Ecotoxicidad de agua fresca	Especies tóxicas
	Eutofización de agua fresca	Especies con P y N (ion o gas)
	Formación de ozono troposférico	NOx, COV
	Ecotoxicidad terrestre	Especies tóxicas
	Acidificación terrestre	NOx, NH3, SO2
	Uso de tierra	Superficie utilizada/transformada
	Ecotoxicidad marina	Especies tóxicas
	Salud humana	Material particulado
Formación de oxono troposférico		NOx, COV
Radiación ionizante		Emisiones radiactivas
Agotamiento de ozono estratosférico		Especies gaseosas con Cl y Br
Toxicidad humana (cancerígeno)		Especies tóxicas
Toxicidad humana (no cancerígeno)		Especies tóxicas
Calentamiento global		GEI
Agotamiento de recursos	Uso de agua	Agua
	Agotamiento de recursos minerales	Mienrales
	Agotamiento de recursos fósiles	Combustibles fósiles

<sup>a</sup> La categoría contabiliza las emisiones primarias de material particulado con un diametro menor a 10[ $\mu m$ ] y las emisiones secundarias generadas por la reacción de los gases mencionados en la atmosfera.

El método ofrece tres variaciones de las categorías endpoint según la temporalidad de los

efectos que tienen las acciones humanas en el medio ambiente (ver tabla 5.4). Para el estudio se considerará la perspectiva jerárquica (Hierarchist) para la evaluación del impacto en las tres categorías debido a que consideran un balance entre los efectos a largo y corto plazo [22].

Tabla 5.4: Aproximación temporal de los factores de emisión para el método Re-CiPe. Elaboración en base a [22].

Aproximación temporal	Nombre en inglés	Perspectiva temporal
Individualista	Individualist	Corto plazo
Jerárquico	Hierarchist	Mediano plazo
Igualitaria	Egalitarian	Largo plazo

De las tres categorías endpoint propuestas para evaluar las alternativas solo la categoría de calidad del ecosistema apunta directamente a la intención de aplicación de los resultados: comparar el desempeño ambiental de las alternativas de valorización de ROD. Sin embargo, se considera pertinente evaluar también la salud humana y el agotamiento de recursos ya que son indicadores que relacionan el medio ambiente con la sociedad, la primera desde una perspectiva del bienestar de las personas y la segunda desde una perspectiva productiva.

## 5.2. Análisis de inventario

A continuación se muestra el análisis de inventario. El subtítulo está dividido en dos secciones, la primera, describe el inventario de los procesos incluyendo su descripción y el valor de los flujos principales, y la segunda, muestra los factores de emisión seleccionados para representar el impacto de cada etapa. Las tablas de factores de emisión muestran en orden consecutivo de las columnas: la etapa del proceso, el sentido del flujo (entrante o saliente), el número del flujo representado en los diagramas de bloque de las respectivas alternativas, las especies que componen el flujo, el estado de agregación (E<sup>o</sup>A) del flujo, sólido (S), líquido (L) o Gas (G), el sistema de origen o destino (biósfera o tecnósfera), y la magnitud del flujo con su respectiva unidad.

### 5.2.1. Procesos

#### 5.2.1.1. Digestión aeróbica

##### 5.2.1.1.1. Descripción del proceso

A continuación se describe el proceso de digestión aeróbica. La descripción se realiza etapa por etapa de forma consecutiva (ver figura 5.2).

El proceso comienza en la generación de ROD, donde está implícita la separación en el origen. Luego, los residuos son transportados a través del camión recolector desde los domicilios hasta la planta de tratamiento de residuos orgánicos. A la etapa se alimenta, además del flujo de ROD, el flujo de diesel, y la salida corresponde a los gases de escape del

camión recolector. Una vez ingresados a la planta, el flujo de residuos entra a la etapa de separación. La etapa consiste en una cinta transportadora donde se retiran los materiales inertes (vidrio, metales, plásticos, etc.) de forma mecánica.

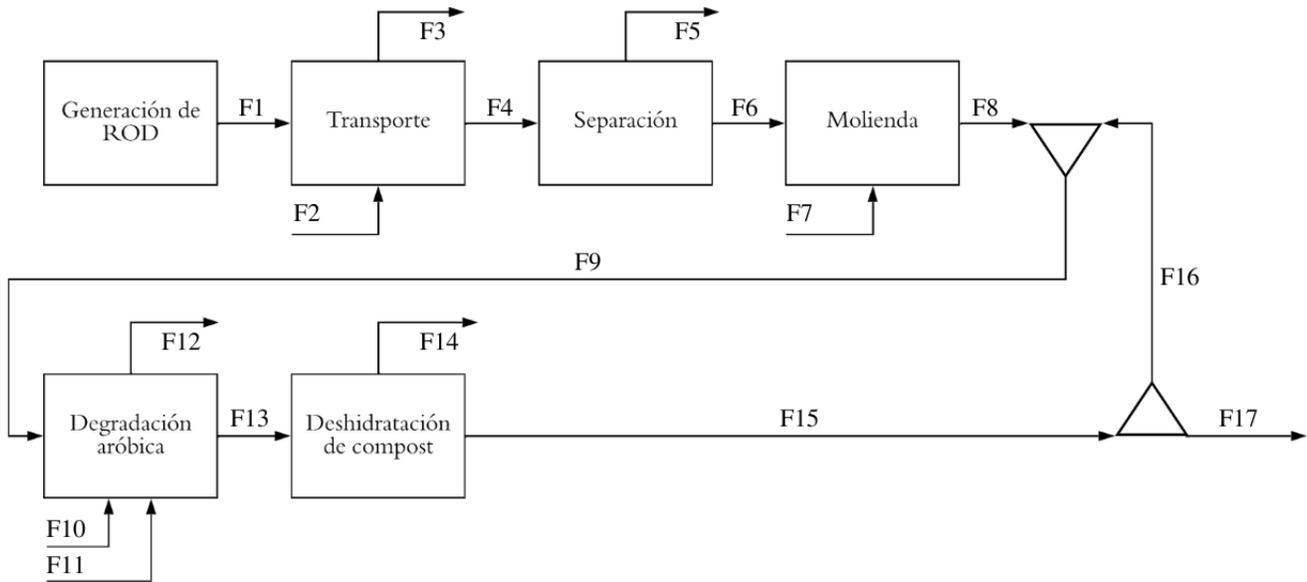


Figura 5.2: Diagrama de bloques etapas foreground del proceso de digestión aeróbica. Elaboración propia.

Después de haber retirado los contaminantes los residuos orgánicos entran a la etapa de molienda, donde se reduce el tamaño de partícula hasta 2 [mm] aproximadamente. La entrada corresponde al flujo energético necesario para operar el proceso. Luego, se ajusta la humedad de los residuos orgánicos frescos mediante la mezcla con una fracción del flujo de residuos orgánicos procesados con baja humedad, disminuyéndola desde el 80 % al 60 %. Una vez ajustado el tamaño de partícula y la humedad se alimenta en la etapa de degradación aeróbica en pila con aireación forzada. El proceso de degradación se puede realizar en múltiples etapas en función del grado de maduración (o degradación) de los compuestos orgánicos; sin embargo, es simplificada como una única etapa donde las principales entradas son el flujo de aire y la energía eléctrica necesario para inyectar el aire en la pila de compostaje. La principal salida es el flujo de gases generados por la actividad de microorganismos aeróbicos. Una vez degradados los residuos se retira el exceso de humedad en un proceso de secado al aire libre hasta llegar a un 40 %. Finalmente, del producto obtenido se recircula aproximadamente el 90 % para ajustar la humedad de la alimentación de la etapa de degradación aeróbica.

#### 5.2.1.1.2. Entradas y salidas del proceso

A continuación se muestra una tabla con las entradas y salidas a la etapas foreground del proceso de digestión aeróbica.

Tabla 5.5: Entradas y salidas de las etapas foreground del proceso de digestión aeróbica. Elaboración propia.

Etapa	Sentido del flujo	N° Flujo	Especie	E°A	Origen/ Destino	Flujo	Unidad	
Generación de ROD	Entradas	-	-	-	-	-	-	
	Salidas	F1	ROD	S	Tec.	105263	[ton/año]	
Transporte	Entradas	F2	Diesel	L	Tec.	37065	[l/año]	
	Salidas	F3	$CO_2$	G	Bio.	1502	[ton/año]	
			$NO_2$	G	Bio.	32	[ton/año]	
			CO	G	Bio.	17	[ton/año]	
Separación	Entradas	F4	FR (ROD)	S	Tec.	100000	[ton/año]	
	Salidas	F5	Otros	S	Tec.	3367	[ton/año]	
			Plásticos	S	Tec.	1122	[ton/año]	
			Vidrio	S	Tec.	449	[ton/año]	
			Metales	S	Tec.	112	[ton/año]	
Molienda	Entradas	F7	EE	-	Tec.	2E06	[kWh/año]	
	Salidas	-	-	-	-	-	-	
Degradación aeróbica	Entradas	F10	$O_2$	G	Bio.	26447	[ton/año]	
			$N_2$	G	Bio.	87178	[ton/año]	
			$H_2O$	G	Bio.	768	[ton/año]	
	Salidas	F12	F11	EE	-	Tec.	6E05	[kWh/año]
			$H_2O$	G	Bio.	13521	[ton/año]	
			$CO_2$	G	Bio.	31498	[ton/año]	
Deshidratación de compost	Salidas	F15	$NH_3$	G	Bio.	112	[ton/año]	
			F14	$H_2O$	G	Bio.	70889	[ton/año]
			Compost	S	Tec.	11408	[ton/año]	

## 5.2.1.2. Digestión anaeróbica

### 5.2.1.2.1. Descripción del proceso

A continuación se describe el proceso de digestión aeróbica. La descripción se realiza etapa a etapa de forma consecutiva (ver figura 5.3).

El proceso de digestión aeróbica comienza con la mismas cuatro etapas del proceso de digestión aeróbica. Después del proceso de molienda el flujo de orgánicos es alimentado al proceso de degradación anaeróbica. Las entradas al proceso, además de los residuos orgánicos, es la energía térmica recirculada del proceso de recuperación energética. Se agrega una etapa ficticia llamada "degradación anaeróbica sin recuperación", que representa la degradación de

orgánicos de la fracción no convertida en el digestor. De la etapa de degradación la línea del proceso se divide en dos: la línea gaseosa y la línea sólido-líquida. El biogás generado en la descomposición es alimentado a la etapa de depuración de biogás, donde se separa el metano del resto de las especies presentes (principalmente dióxido de carbono y agua).

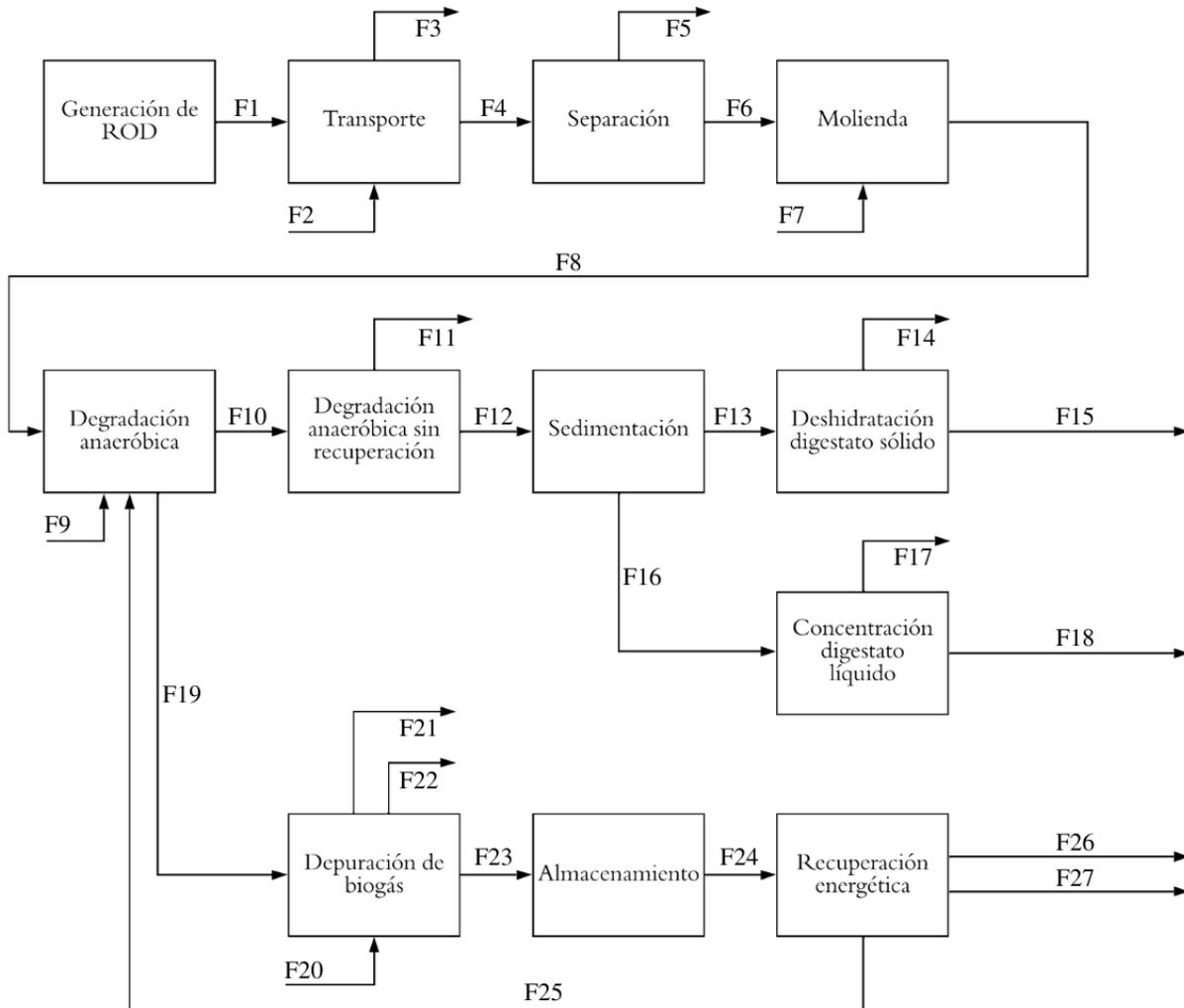


Figura 5.3: Diagrama de bloques etapas foreground del proceso de digestión anaeróbica. Elaboración propia.

El proceso de depuración de biogás para la planta está compuesto por dos etapas principales: la remoción del vapor de agua mediante su condensación y la separación de los gases no deseados a través de un sistema de adsorción PSA. Sin embargo, la etapa es simplificada en el diagrama como un solo bloque donde ocurren ambos procesos. La etapa es alimentada, además del biogás, por energía eléctrica necesaria para su operación. El biometano que sale de la etapa de depuración es almacenado con el fin de alimentar la etapa de recuperación energética de forma controlada. La última etapa es la recuperación energética, donde el metano es utilizado como combustible en motores a gas con recuperación térmica y eléctrica. La energía eléctrica es inyectada en su totalidad en el Sistema Nacional Eléctrico. Por otro

lado, la energía térmica no es recuperada en su totalidad y solo es redirigida la necesaria para acondicionar el digestor. La línea sólido-líquida comienza con la etapa de separación a través de un sedimentador, donde se obtiene una corriente sólida (digestato sólido) y una corriente líquida (digestato líquido). Esta etapa ocurre por la diferencia de densidad de las dos fases, por lo tanto, no se consideran flujos energéticos. Después, tanto el digestato sólido como el líquido disminuyen su concentración de agua en piscinas o pilas de deshidratación.

### 5.2.1.2.2. Entradas y salidas del proceso

A continuación se muestra una tabla con las entradas y salidas a la etapas foreground del proceso de digestión anaeróbica.

Tabla 5.6: Entradas y salidas de las etapas foreground del proceso de digestión anaeróbica. Elaboración propia.

Etapa	Sentido del flujo	N° Flujo	Especie	E°A	Origen/ Destino	Flujo	Unidad
Generación de ROD	Entradas	-	-	-	-	-	-
	Salidas	F1	ROD	S	Tec.	105263	[ton/año]
Transporte	Entradas	F2	Diesel	L	Tec.	37065	[l/año]
	Salidas	F3	CO <sub>2</sub>	G	Bio.	1502	[ton/año]
			NO <sub>2</sub>	G	Bio.	32	[ton/año]
			CO	G	Bio.	17	[ton/año]
Separación	Entradas	F4	FR (ROD)	S	Tec.	100000	[ton/año]
	Salidas	F5	Otros	S	Tec.	3367	[ton/año]
			Plásticos	S	Tec.	1122	[ton/año]
			Vidrio	S	Tec.	449	[ton/año]
			Metales	S	Tec.	112	[ton/año]
Molienda	Entradas	F7	EE	-	Tec.	2E06	[kWh/año]
	Salidas	-	-	-	-	-	-
Degradación anaeróbica	Entradas	F9	EE	-	Tec.	8,8E06	[kWh/año]
	Salidas	-	-	-	-	-	-
Degradación anaeróbica sin recuperación	Entradas	-	-	-	-	-	-
	Salidas	F11	CO <sub>2</sub>	G	Bio.	665	[ton/año]
			CH <sub>4</sub>	G	Bio.	327	[ton/año]
			NH <sub>3</sub>	G	Bio.	8	[ton/año]
			H <sub>2</sub> S	G	Bio.	4	[ton/año]

*Continuación en la siguiente página*

Tabla 5.5 Continuación: Entradas y salidas de las etapas foreground del proceso de digestión anaeróbica. Elaboración propia.

Etapa	Sentido del flujo	N° Flujo	Especie	E°A	Origen/ Destino	Flujo	Unidad
Sedimentación	Entradas	-	-	-	-	-	-
	Salidas	-	-	-	-	-	-
Concentración Dig-S	Entradas	-	-	-	-	-	-
	Salidas	F14	$H_2O$	G	Bio.	2743	[ton/año]
F15		Dig-S	S	Bio.	5280	[ton/año]	
Concentración Dig-L	Entradas	-	-	-	-	-	-
	Salidas	F17	$H_2O$	G	Bio.	36429	[ton/año]
		F18	Dig-L	L	Tec.	33456	[ton/año]
Depuración de biogás	Entradas	F20	EE	-	Tec.	3,7E06	[kWh/año]
		F21	$H_2O$	L	Bio.	2442	[ton/año]
	Salidas	F22	$CO_2$	G	Bio.	12551	[ton/año]
			$CH_4$	G	Bio.	358	[ton/año]
			$NH_3$	G	Bio.	80	[ton/año]
		$H_2S$	G	Bio.	84	[ton/año]	
Almacenamiento	Entradas	-	-	-	-	-	-
	Salidas	-	-	-	-	-	-
Recuperación energética	Entradas	-	-	-	-	-	-
		F25	ET	-	Tec.	4E07	[kWh/año]
	Salidas	F26	EE	-	Tec.	3,1E07	[kWh/año]
		F27	$H_2O$	G	Bio.	13185	[ton/año]
			$CO_2$	G	Bio.	16152	[ton/año]
		$NH_3$	G	Bio.	80	[ton/año]	

### 5.2.1.3. Recuperación de gases desde rellenos sanitarios

#### 5.2.1.3.1. Descripción del proceso

A continuación se describe el proceso de recuperación de gases desde rellenos sanitarios. La descripción se realiza por etapa de forma consecutiva (ver figura 5.4).

El proceso de recuperación de gases desde rellenos sanitarios comienza desde la generación de RSM en los domicilios. A diferencia de las otras tres alternativas en este caso no se considera la separación en el origen, los residuos orgánicos e inorgánicos constituyen una misma corriente. Después de generados los residuos son transportados hasta el relleno sanitario. Al igual que las demás alternativas, el principal flujo de entrada en la etapa es el diesel y el

principal de salida son los gases de combustión.

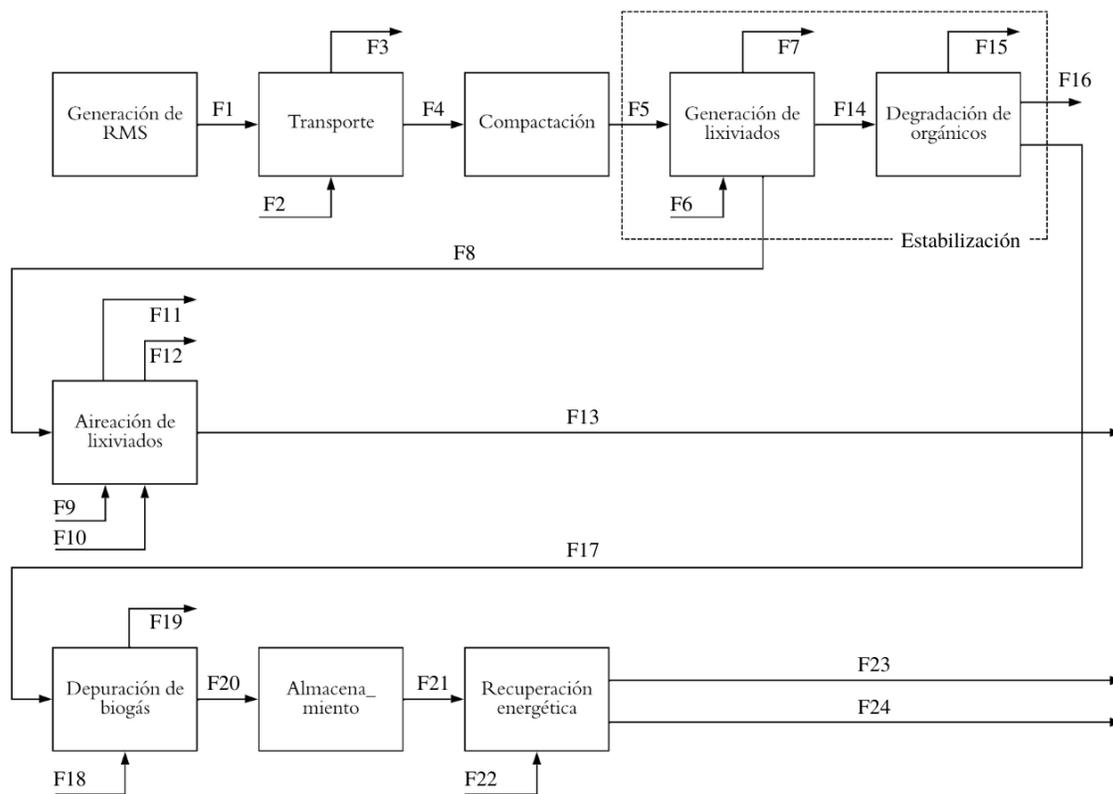


Figura 5.4: Diagrama de bloques etapas foreground del proceso de recuperación de gases a partir de rellenos sanitarios. Elaboración propia.

Una vez en el relleno sanitario, los residuos son compactados en la estructura civil conformadas por las "celdas". Luego, los residuos entran en la etapa de estabilización donde ocurren dos procesos de manera simultánea: la generación de lixiviados y la degradación de orgánicos. Sin embargo, por simplicidad las etapas se representan como consecutivas en el proceso, primero la generación de lixiviado y luego la degradación de orgánicos. En la generación de lixiviados la principal entrada es la lluvia que es primeada dentro de las celdas del relleno, y la principal salida es el lixiviado y la evaporación de la humedad del relleno. En la degradación de orgánicos existe una única salida correspondiente a los gases generados por la actividad microbiana; sin embargo, este flujo es representado por dos salidas para diferenciar el gas que es recuperado del que es emitido directamente a la atmósfera. Desde la etapa de estabilización se generan dos líneas: la línea líquida, correspondiente al tratamiento de lixiviados, y la línea gaseosa, asociada al aprovechamiento energético de los gases generados. La línea líquida está compuesta por una única etapa, la aireación de lixiviados, donde se disminuye la concentración de materia orgánica en presencia de aire para lograr la norma de descarga de efluentes en alcantarillados. Las principales entradas son el flujo energético utilizado por los compresores para inyectar el aire en la laguna y el aire mismo. Las principales salidas corresponden a los gases generados de la degradación aeróbica y la evaporación de la piscina. Por otro lado, la línea gaseosa está conformada por las mismas etapas que la línea gaseosa de la alternativa de degradación anaeróbica: la depuración de biogás

### 5.2.1.3.2. Entradas y salidas del proceso

A continuación se muestra una tabla con las entradas y salidas a la etapas foreground del proceso de recuperación de gases desde rellenos sanitarios.

Tabla 5.7: Entradas y salidas de las etapas foreground del proceso de recuperación de gases desde rellenos sanitarios. Elaboración propia.

Etapa	Sentido del flujo	N° Flujo	Especie	E°A	Origen/ Destino	Flujo	Unidad	
Generación de RSM	Entradas	-	-	-	-	-	-	
	Salidas	F1	RSM	S	Tec.	149254	[ton/año]	
Transporte	Entradas	F2	Diesel	L	Tec.	131203	[l/año]	
	Salidas	F3	CO2	G	Bio.	5316	[ton/año]	
			NO2	G	Bio.	113	[ton/año]	
			CO	G	Bio.	61	[ton/año]	
Compactación	Entradas	F4	FR (ROD)	S	Tec.	100000	[ton/año]	
	Salidas	-	-	-	-	-	-	
Generación de lixiviados	Entradas	F6	H2O	L	Bio.	21533	[ton/año]	
	Salidas	F7	H2O	G	Bio.	11972	[ton/año]	
Degradación de orgánicos	Entradas	-	-	-	-	-	-	
	Salidas	F16	CO2	G	Bio.	29134	[ton/año]	
			CH4	G	Bio.	7080	[ton/año]	
			NH3	G	Bio.	235	[ton/año]	
			H2S	G	Bio.	96	[ton/año]	
		F17	RSM	S-L	Bio.	1,2E06	[ton/año]	
Aireación de lixiviados	Entradas	F9	O2	G	Bio.	75	[ton/año]	
			N2	G	Bio.	283	[ton/año]	
			EE	-	Tec.	8532	[kWh/año]	
	Salidas	F12	F11	H2O	G	Bio.	55	[ton/año]
			CO2	G	Bio.	90	[ton/año]	
			NH3	G	Bio.	0,3	[ton/año]	
			F13	Lix. Tratado	L	Tec.	12083	[ton/año]

*Continuación en la siguiente página*

Tabla 5.6 Continuación: Entradas y salidas de las etapas foreground del proceso de recuperación de gases desde rellenos sanitarios. Elaboración propia.

Etapa	Sentido del flujo	N° Flujo	Especie	E°A	Origen/ Destino	Flujo	Unidad
Depuración de biogás	Entradas	F18	EE	-	Tec.	1,3E06	[kWh/año]
			CO2	G	Bio.	7262	[ton/año]
	Salidas	F19	CH4	G	Bio.	89	[ton/año]
			NH3	G	Bio.	29	[ton/año]
			H2S	G	Bio.	24	[ton/año]
Almacenamiento	Entradas	-	-	-	-	-	-
	Salidas	-	-	-	-	-	-
Recuperación energética	Entradas	F23	EE	-	Tec.	9,2E06	[kWh/año]
			H2O	G	Bio.	3778	[ton/año]
	Salidas	F24	CO2	G	Bio.	4634	[ton/año]
			NH3	G	Bio.	29	[ton/año]

#### 5.2.1.4. Incineración

##### 5.2.1.4.1. Descripción del proceso

A continuación se describe el proceso de incineración. La descripción se realiza por etapa de forma consecutiva (ver figura 5.5).

El proceso de incineración comienza con la mismas cuatro etapas del proceso de digestión aeróbica. Después de la molienda los ROD pasan directamente a la etapa de incineración donde se alimenta con aire precalentado, además del flujo de combustible, y se extraen las cenizas pesadas (parte de las cenizas suficientemente pesadas como para ser arrastradas por la corriente gaseosa). Los gases de combustión generados entran a un intercambiador de calor para calentar el aire inyectado en la etapa de incineración como comburente. Luego, los gases de combustión entran a la etapa de recuperación energética donde ceden su energía a través de un intercambiador a un ciclo de vapor cerrado. La principal salida de la etapa es la energía eléctrica generada. Una vez cedido el calor de los gases entra a un intercambiador de calor que disminuye su temperatura antes de entrar a la etapa de depuración de gases. En la depuración de gases se utilizan equipos de absorción en base a agua: torres de lavado y scrubber venturitis, ambos equipos que buscan absorber gases en un régimen contracorriente con agua pulverizada. Las principales entradas de la etapa son la energía eléctrica utilizadas por las bombas y el agua fresca necesaria para el lavado; mientras que la principal salida es el flujo de agua cargada de gases contaminantes disueltos y/o especies generadas de las posibles reacciones entre los gases absorbidos y el agua.

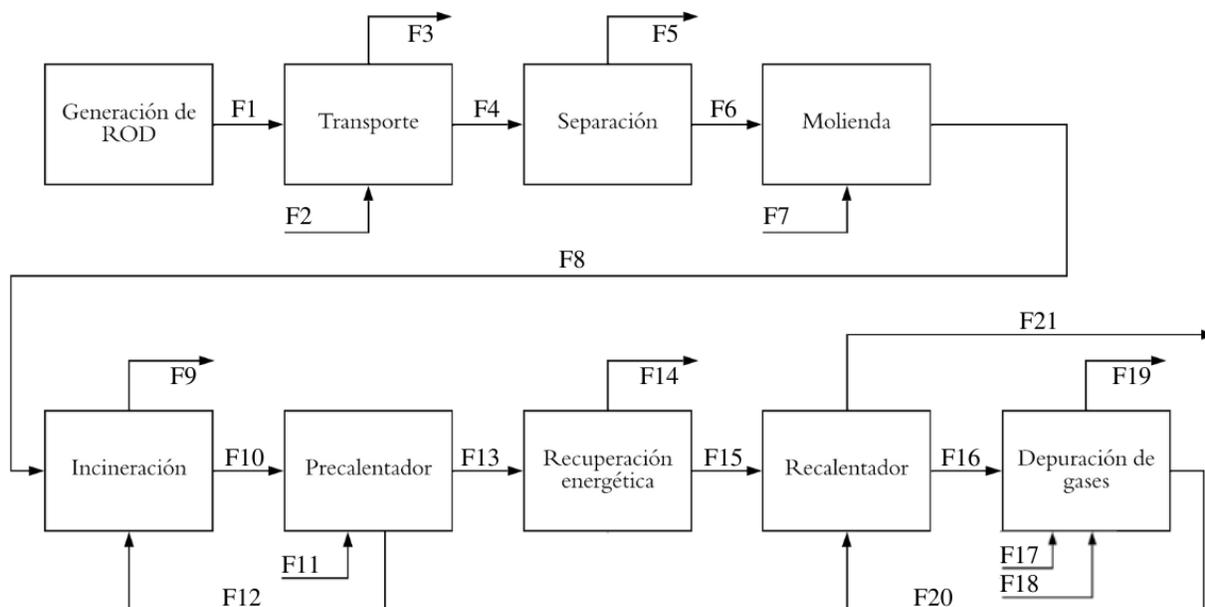


Figura 5.5: Diagrama de bloques etapas foreground del proceso de incineración. Elaboración propia.

#### 5.2.1.4.2. Entradas y salidas del proceso

A continuación se muestra una tabla con las entradas y salidas a la etapas foreground del proceso de incineración.

Tabla 5.8: Entradas y salidas de las etapas foreground del proceso de incineración. Elaboración propia.

Etapa	Sentido del flujo	N° Flujo	Especie	E°A	Origen/ Destino	Flujo	Unidad
Generación de ROD	Entradas	-	-	-	-	-	-
	Salidas	F1	ROD	S	Tec.	105263	[ton/año]
Transporte	Entradas	F2	Diesel	L	Tec.	37065	[l/año]
	Salidas	F3	CO <sub>2</sub>	G	Bio.	1502	[ton/año]
			NO <sub>2</sub>	G	Bio.	32	[ton/año]
			CO	G	Bio.	17	[ton/año]
Separación	Entradas	F4	FR (ROD)	S	Tec.	100000	[ton/año]
	Salidas	F5	Otros	S	Tec.	3367	[ton/año]
			Plásticos	S	Tec.	1122	[ton/año]
			Vidrio	S	Tec.	449	[ton/año]
			Metales	S	Tec.	112	[ton/año]

*Continuación en la siguiente página*

Tabla 5.7 Continuación: Entradas y salidas de las etapas foreground del proceso de incineración. Elaboración propia.

Etapa	Sentido del flujo	N° Flujo	Especie	E°A	Origen/ Destino	Flujo	Unidad
Molienda	Entradas	F7	EE	-	Tec.	2E06	[kWh/año]
	Salidas	-	-	-	-	-	-
Incineración	Entradas	-	-	-	-	-	-
	Salidas	F9	Cenizas	S	Tec.	2273	[ton/año]
Precalentador	Entradas	-	-	-	-	-	-
	Salidas	-	-	-	-	-	-
Recuperación energética	Entradas	-	-	-	-	-	-
	Salidas	F14	EE	-	Tec.	9,5E06	[kWh/año]
Recalentador	Entradas	-	-	-	-	-	-
	Salidas	-	-	-	-	-	-
Depuración de gases de combustión	Entradas	F17	EE	-	Tec.	2,8E07	[kWh/año]
		F18	H2O	L	Tec.	1,7E06	[ton/año]
	F19	H2O	L	Tec.	1,7E06	[ton/año]	
		Cenizas	S	Tec.	562	[ton/año]	
		SO2	Sol	Tec.	735	[ton/año]	
		N2O	Sol	Tec.	6330	[ton/año]	
		Cenizas	S	Tec.	6	[ton/año]	
		H2O	G	Bio.	82107	[ton/año]	
	F21	CO2	G	Bio.	20380	[ton/año]	
		C2H4	G	Bio.	4616	[ton/año]	
SO2		G	Bio.	39	[ton/año]		
N2O		G	Bio.	64	[ton/año]		
Salidas	-	-	-	-	-	-	

### 5.2.1.5. Discusiones

A continuación se discute el inventario de los procesos propuestos. Cada alternativa se discute de forma individual respecto a la estructura del proceso y los supuestos considerados, en función a el preprocesamiento, el procesamiento y el postprocesamiento. La etapa de transporte se discute para todas las alternativas en común debido a que no existe mayor diferencia entre ellas.

#### 5.2.1.5.1. Transporte

La etapa de transporte es común para las cuatro alternativas y no se diferencia en el tipo de vehículo utilizado ni en la distancia que se recorre para llegar desde el punto de recolección

hasta el punto de procesamiento. Esto implica que la potencial localización de la planta de tratamiento es la misma para todas las alternativas independiente si se trata de un relleno sanitario, una planta de compostaje u otra. El supuesto se tomó por simplicidad pero no necesariamente representa un escenario posible. Para la localización se consideran puntos de alta densidad industrial (Quilicura, San Bernardo y Maipú), pero es probable que para el caso del relleno sanitario, debido a su tamaño, se sitúe más lejos de los puntos de recolección que para los casos de la digestión aeróbica, anaeróbica o incineración.

En caso de que cualquiera de las cuatro alternativa se localice más lejos que otra de los puntos de recolección, implicaría una subestimación en el impacto de la alternativa lejana. Sin embargo, se espera que el impacto del transporte no sea un punto de inflexión al comparar las alternativas debido a su bajo impacto relativo a las otras etapas de los procesos.

#### **5.2.1.5.2. Digestión aeróbica**

El preprocesamiento de digestión aeróbica tiene por objetivo acondicionar el flujo de residuos orgánicos para ser alimentado en la etapa de degradación aeróbica. Se deben modificar cuatro parámetros: la fracción de inertes contaminantes, el tamaño de partícula y la humedad. La modificación de las primeras dos se realizan a través de procesos convencionales que se ajustan a los principios de probabilidad y simplicidad. Sin embargo, para reducir la humedad del flujo se optó por recircular una parte importante (90 %) del flujo de compost deshidratado. Se podría haber optado por incorporar elementos de modificación estructural y de humedad externos como chips de madera, pero esto hubiese implicado un insumo extra además de una operación de secado más (para deshidratar los chips recirculados), por lo tanto no se considera una opción.

El procesamiento está compuesto por la degradación aeróbica únicamente. En esta etapa se considera la degradación total de los sólidos volátiles digeribles según un modelo que simplifica el proceso de degradación como una reacción química que tiene solo tres productos: dióxido de carbono, agua, amoníaco gaseoso y amonio fijado en el producto sólido. La simplificación del proceso es aceptable únicamente porque se utilizan factores de emisión asociados al flujo de ROD que se degradan. En el caso de utilizar factores de caracterización para calcular alguna categoría de impacto el no considerar la emisión de algunas especies, por ejemplo, compuestos volátiles orgánicos, NO<sub>x</sub> u otros gases de efecto invernadero implicarían una subestimación del impacto del proceso.

El postprocesamiento es necesario para ajustar la humedad del producto y se considera que son deshidratados en pilas por el gradiente de concentración de agua entre la pila y el ambiente. Se elige un proceso sin demanda energética debido a que el producto no necesita un control riguroso y la magnitud del flujo hace que aumenten los costos si se deshidratasen a través de equipos con demanda energética como secadores rotatorios.

#### **5.2.1.5.3. Digestión anaeróbica**

Las etapas del preprocesamiento del proceso de digestión anaeróbica son la separación de inertes y la molienda de los ROD, mismas etapas que para la digestión aeróbica. Al igual que

su contra parte las etapas son elegidas de acuerdo a los principios de probabilidad y simplicidad. Se consideran las mismas discusiones que para el caso de las etapas en el proceso aeróbico.

El procesamiento está compuesto por la etapa de degradación anaeróbica. Al igual que para la alternativa aeróbica se usa un modelo simplificado para estimar los productos de la degradación, que considera la generación de dióxido de carbono, metano, amoníaco y ácido sulfhídrico únicamente. También se utiliza un factor de emisión asociado a la masa de ROD alimentada el proceso para evaluar el impacto, por lo tanto, la simplicidad del modelo no genera mayores errores en el impacto de la etapa. Sin embargo, del modelo se deduce el flujo volumétrico de gas que es depurado y recuperado en etapas posteriores. En ese caso, si hay especies no consideradas por el modelo, existirá un error en el impacto de las etapas donde se utilizaron factores de emisión asociadas al flujo volumétrico de gas.

El postprocesamiento está compuesto por las líneas gaseosas y sólido-líquida. La primera con el objetivo de recuperar la energía interna del metano, y la segunda, acondicionar el digestato líquido y sólido para su comercialización.

Para la recuperación gaseosa es necesaria la limpieza o depuración de gases con el fin de evitar que ciertas especies estén presentes en el proceso de combustión. Sin embargo, el proceso propuesto considera el aumento de la calidad del biogás transformándolo en biometano al aumentar su concentración. Esta última etapa no es necesaria legalmente, pero se considera dentro del proceso ya que aumenta el poder calorífico del biogás casi en un 100 %<sup>3</sup>. Considerar aumentar la calidad del biogás en el proceso implica un aumento en su impacto debido a la energía requerida en la etapa. Si bien el estudio no alcanza a percibir los beneficios de generar más energía, debido al marco de referencia atribucional y no consecuencial, es sensato económicamente y ambientalmente considerarlo.

Por otro lado, se propone que tanto la depuración como el aumento de la calidad ocurren en una misma etapa por medio de un equipo PSA, pero no se considera una etapa de absorción de gases no deseados. Los sistemas PSA dividen flujos gaseosos selectivamente a través de la adsorción, esto implica que los gases no deseados, separados del metano, siguen en estado gaseoso. Se debiese considerar una etapa de absorción, por ejemplo, por medio de torres de lavado, para que las especies no deseadas salgan como efluentes líquidos y no emitidos a la atmósfera. Sin embargo, la omisión de la etapa de absorción no debiese afectar los resultados ya que se asume que el factor de emisión utilizado para el proceso de depuración de gases considera la no emisión gaseosa de las especies no deseadas.

Por otro lado, para la línea sólido-líquida se proponen procesos comúnmente utilizados en procesos de tratamiento de digestato. La humedad final de cada digestato se eligió por valores típicos.

---

<sup>3</sup> Un aumento en la fracción volumétrica del metano de 55 % a 97 % muestra un aumento del poder calorífico bajo de 21 [ $MJ/Nm^3$ ] a 41 [ $MJ/Nm^3$ ] [54]

#### 5.2.1.5.4. Recuperación de gases desde rellenos sanitarios

El pretratamiento de la alternativa está compuesto por dos etapas además de la generación de RSM, que a diferencia de las demás alternativas no contempla la separación en el origen. El transporte ocurre de manera similar que para las demás alternativas, pero en este caso es una operación multifuncional, ya que el mismo proceso cumple la función del transporte de RSM y ROD. La compactación no contempla la energía necesaria para llevar a cabo la operación. Generalmente el proceso se lleva a cabo con palas mecánicas dependiente de combustibles fósiles, por lo tanto, no considerar el flujo de diesel alimentado ni las emisiones de gases de combustión implican una subestimación de los flujos másicos en el inventario de los procesos. Sin embargo, para efectos del estudio se categorizó el flujo de diesel como energía de transporte (energía necesaria para transportar los flujos másicos dentro de la planta), por lo tanto, quedan fuera de los límites del sistema.

El procesamiento está compuesta por una única etapa, la estabilización de los residuos en las celdas. Para el balance de masa se desagregó la etapa en dos subetapas por simplicidad: la generación de lixiviado y la degradación de orgánicos; sin embargo, es importante mencionar que ocurren de manera simultánea. Además, es importante mencionar que el relleno sanitario es un sistema heterogéneo, en el que las capas inferiores presentan un nivel de degradación mayor que las capas superiores. Estos dos factores, la simultaneidad de las subetapas y la heterogeneidad del sistema, hacen que el flujo de lixiviado presente características variables en el tiempo. La magnitud del flujo de lixiviados varía en función de las lluvias principalmente, y tanto la concentración como el tipo de especies lixiviadas varía en función de la edad del relleno. El periodo de mayor actividad del relleno sanitario ocurre en la fase metanogénica estable, entre 8 a 40 años (ver figura 4.6), por lo tanto se tomaron valores de lixiviados emitidos durante ese periodo para calcular el impacto del proceso. También, las emisiones gaseosas varían su composición con el tiempo igual que el lixiviado. Mientras más joven el relleno mayor concentración de dióxido de carbono tendrá el flujo de gases generado. Por lo tanto, se tomaron valores promedio de la composición del relleno sanitario. Así, el proceso, y en consecuencia los resultados, reflejan la actividad un relleno sanitario en su vida media y no refleja el impacto del proceso en su etapa joven ni madura.

La fracción de gas recuperado es un parámetro que influye considerablemente en el impacto de la alternativa. El valor de la recuperación se estableció de acuerdo al valor propuesto por el IPCC para un relleno sanitario promedio, equivalente a un 20 % del gas generado por el relleno sanitario. Eso implica que el metano contenido en el 80 % no aprovechado es emitido directamente en la atmósfera.

El postprocesamiento está compuesto por la línea gaseosa, con el objetivo de recuperar la energía del biogás, y la líquida, que acondiciona el lixiviado generado en el relleno para ser descargado en el sistema de alcantarillado. La línea gaseosa está compuesta por las mismas etapas que la línea gaseosa de la digestión aeróbica, por lo tanto sus discusiones aplican para la recuperación de gases. A diferencia de la digestión anaeróbica, el biogás del relleno sanitario tiene una concentración más baja, 38 %v/v contra 47 %v/v, lo que aumenta la demanda energética para llegar a la concentración de 97 %v/v. La demanda energética del proceso en función de la fracción de metano en la entrada se estimó según la ecuación 5.2:

$$Demanda\ energética\ [kWh/Nm^3] = -0,1 \cdot C_{CH_4}[\%v/v] + 0,235 \quad (5.2)$$

También, el biogás del relleno sanitario puede presentar especies que no se encuentran en el flujo de biogás de la digestión aeróbica, lo que puede variar el impacto si se necesitasen mayor insumos, como el agua, para lavar los gases.

La línea líquida se plantea en el escenario de un relleno sanitario en su fase metanogénica estable, por las razones mencionadas anteriormente. Solo se consideran las especies orgánicas como contaminante, debido a su predominancia en el flujo y a que es la especie que comúnmente hace necesario el tratamiento de lixiviados. Así, el balance de la etapa se realiza en función de los orgánicos, asumiendo que se degradan bajo la misma reacción que ocurre en el proceso de digestión aeróbica. Esto afecta directamente al flujo de aire alimentado y en consecuencia el flujo energético demandado. Sin embargo, no se consideran otras especies contaminantes que podría ser necesario remover para descargar en el sistema de alcantarillado, lo que afectaría el impacto del proceso si fuese necesario añadir etapas para removerlas.

### 5.2.1.5.5. Incineración

El pretratamiento para la alternativa de incineración está compuesto por las mismas etapas de separación y molienda que para la alternativa de digestión aeróbica. De la misma forma, las tecnologías fueron seleccionadas de acuerdo a los principios de probabilidad y simplicidad.

Tabla 5.9: Caracterización de ROD v/s caracterización de lodos considerados en el estudio guía. Elaboración en base a [21] y [55]

Parámetro	Unidad	ROD	Lodos
C	% base seca sin cenizas	51	52,1
H	% base seca sin cenizas	7,9	8
O	% base seca sin cenizas	37,3	32,2
N	% base seca sin cenizas	2,8	5,5
S	% base seca sin cenizas	0,5	2
Cenizas	% base seca	10	30
Humedad	% m/m	86	79

El procesamiento y postprocesamiento se estableció en base a un trabajo de título que evalúa técnicamente la incineración y co-incineración de diferentes flujos de lodos generados por PTAS. El trabajo considera el modelo propuesto por MARIAS, F. ET. AL. (2015) para predecir la composición de los gases de combustión a través de un mecanismo de reacción propuesto, en base al análisis último del combustible alimentado a la etapa de incineración. Una de las alternativas evaluadas considera un flujo de lodos que tiene un análisis último y humedad muy similares a los de los ROD (ver tabla 5.9). Por lo tanto, se decidió utilizar el trabajo como estudio guía y asumir la misma composición de gases de combustión. Sin embargo, se excluyeron los gases de combustión con una fracción másica menor al 0,05 % para hacer válida la comparación con las otras alternativas en las que se consideraron modelos de

degradación menos específicos.

La diferencia más significativa entre los flujos de combustible comparados son el porcentaje másico de ceniza y el porcentaje de humedad. La primer especie no reacciona en el proceso de combustión, por lo tanto, su variación no debería tener efectos en la composición de los gases; sin embargo, la mayor presencia de agua pudiese afectar a la composición.

El postprocesamiento está compuesto por la recuperación energética y la depuración de gases. Se asume que la temperatura alcanzada por los gases será la misma en el caso de la incineración de ROD, por lo tanto, la energía recuperada no debiese variar significativamente. Escalar las etapas de depuración de gases se considera válido ya que las concentraciones son las mismas y solo varía la magnitud del flujo.

### 5.2.2. Factores de emisión

En el siguiente subtítulo se muestran los factores de emisión seleccionados para representar el impacto de las operaciones unitarias que componen los procesos de las cuatro alternativas comparadas. La información de los factores de emisión fue obtenida mediante la base de datos Ecoinvent y estimaciones en base al balance de masa y energía de los procesos. Las tablas muestran la siguiente información (en el orden consecutivo de las columnas):

- Etapa: Muestra la etapa del proceso considerado en el estudio. Hace referencia a las etapas consideradas en el análisis de inventario, procesos (ver sección 5.2.1).
- Nombre de la actividad de referencia: Corresponde a la actividad, seleccionada de la base de datos Ecoinvent, en base a la que se calcularon los factores de emisión.
- Locación: Muestra la ubicación geográfica donde se evaluaron los factores de emisión de cada actividad seleccionada. Se utilizan cuatro categorías: China, representa procesos ocurridos en China, GLO (global), representa el promedio de la producción mundial, RdM (resto del mundo), representa el promedio de la producción mundial menos la producción de regiones disponibles, y Alternativa, representa los factores de emisión calculados a partir del balance de masa y energía de los procesos.
- Unidad: Muestra la unidad del flujo de referencia que está asociado el factor de emisión de la actividad. Por ejemplo, la unidad de la actividad "tratamiento de residuos biológicos, compostaje" es  $kg$ , por lo tanto, su factor de emisión para la categoría PCG tiene unidades de  $[kgCO_{2eq}/kg_{ROD}]$ .
- Fuente: Indica la fuente de los factores de emisión, Ecoinvent, si se extrajo de la base de datos, Supuesto, si no es considerada, y Calculo, si fue calculado en base a los balances de masa y/o energía.
- PCG: Factor de emisión para la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global, en unidades de  $[kgCO_{2eq}]$ .
- CE: Factor de emisión para la categoría de impacto de Calidad del Ecosistema, en unidades de  $[Puntos]$ .

- SH: Factor de emisión para la categoría de impacto de Salud Humana, en unidades de [*Puntos*].
- AR: Factor de emisión para la categoría de impacto de Agotamiento de Recursos, en unidades de [*Puntos*].

Tabla 5.10: Factores de emisión seleccionados para el proceso de digestión aeróbica. N/C: no se considera. Elaboración propia.

Etapa	Acción de referencia	Locación	Unidad	Fuente	PCG [kgCO2eq]	CE [puntos]	SH [puntos]	AR [puntos]
Generación de ROD	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Transporte	Transporte, transporte, camión de 16-32 toneladas, EURO 5	RdM	ton*km	Ecoinvent	0,15695	0,00378	0,00742	0,00799
Separación de inertes	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Molienda	Tratamiento de residuo de madera, post consumo, molienda	RdM	kg	Ecoinvent	0,01262	0,00032	0,00069	0,00054
Digestión aeróbica	Tratamiento de residuos biológicos, compostaje	China	kg	Ecoinvent	4,10043	0,09290	0,19086	0,13135
Deshidratación del compost	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C

Tabla 5.11: Factores de emisión seleccionados para el proceso de digestión anaeróbica. N/C: no se considera. Elaboración propia.

Etapa	Acción de referencia	Locación	Unidad	Fuente	PCG [kgCO2eq]	CA [puntos]	SH [puntos]	AR [puntos]
Generación de ROD	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Transporte	Transporte, transporte, camión de 16-32 toneladas, EURO 5	RdM	ton*km	Ecoinvent	0,15695	0,00378	0,00742	0,00799
Separación sólido-sólido	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Molienda	Tratamiento de residuo de madera, post consumo, molienda	RdM	kg	Ecoinvent	0,01262	0,00032	0,00069	0,00054
Degradación anaeróbica	Tratamiento de estiércol y residuos biológicos a través de DAn	RdM	kg	Ecoinvent	0,47657	0,01415	0,01974	0,00566
Degradación aeróbica sin recuperación	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Separación sólido-líquido	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Deshidratación digestato-sólido	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Concentración digestato-líquido	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Depuración de biogás	Tratamiento de biogás, purificación a metano 96 % vol	RdM	m3	Ecoinvent	1,09170	0,01794	0,03643	0,01745
Almacenamiento de biometano	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Recuperación Energética -Eléctrica	Co-generación de energía eléctrica y térmica, gas natural, 1MW	China	MJ	Ecoinvent	0,02666	0,00047	0,00085	0,00123
Recuperación Energética - Térmica	energía eléctrica, mezcla pobre	China	kWh	Ecoinvent	0,55466	0,01006	0,01741	0,02527

Tabla 5.12: Factores de emisión seleccionados para el proceso de recuperación de gases desde rellenos sanitarios. N/C: no se considera. Elaboración propia.

Etapa	Acción de referencia	Locación	Unidad	Fuente	PCG [kgCO2eq]	CA [puntos]	SH [puntos]	AR [puntos]
Generación de RSM	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Transporte	Transporte, transporte, camión de 16-32 toneladas, EURO 5	RdM	ton*km	Ecoinvent	0,15695	0,00378	0,00742	0,00799
Compactación de RSM	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Estabilización (Lixiviación/Degradación)	Tratamiento de residuos sólidos municipales, relleno sanitario	RdM	kg	Ecoinvent	-	0,00900	0,02061	0,00107
	Tratamiento de RSM, relleno sanitario con recuperación de biogás del 20 %	Alternativa	kg	Calculo	1,52713	-	-	-
Aireación de lixiviados	Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, aireación	Alternativa	kg	Calculo	0,29214	N/C	N/C	N/C
Tratamiento RILES en PTAS	Tratamiento de aguas residuales, promedio, capacidad 9,5E10	China	m3	Ecoinvent	0,24566	0,00623	0,01825	0,01231
Depuración de biogás	Tratamiento de biogás, purificación a metano 96 % vol	RdM	m3	Ecoinvent	1,09170	0,01794	0,03643	0,01745
Almacenamiento de biometano	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Recuperación energética	Co-generación de energía eléctrica y térmica, gas natural, 1MW EE, mezcla pobre	China	kWh	Ecoinvent	0,59414	0,01083	0,01871	0,02711

Tabla 5.13: Factores de emisión seleccionados para el proceso de incineración. N/C: no se considera, N/A: no aplica. Elaboración propia.

Etapa	Acción de referencia	Locación	Unidad	Fuente	PCG [kgCO <sub>2</sub> eq]	CA [Puntos]	SH [Puntos]	AR [Puntos]
Generación de ROD	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Transporte	Transporte, transporte, camión de 16-32 toneladas, EURO 5	RdM	ton*km	Ecoinvent	0,15695	0,00378	0,00742	0,00799
Separación sólido-sólido	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Molienda	Tratamiento de residuo de madera, post consumo, molienda	RdM	kg	Ecoinvent	0,01262	0,00032	0,00069	0,00054
Incineración	Tratamiento de residuos biológicos, incineración municipal	GLO	kWh	Ecoinvent	0,24442	0,10867	0,01228	0,00744
Precalentador	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Recuperación energética	N/A	-	-	-	N/A	N/A	N/A	N/A
Recalentador	N/C	-	-	Supuesto	N/C	N/C	N/C	N/C
Depuración de gases de combustión	Tratamiento de biogás, purificación a metano 96 % vol	RdM	m <sup>3</sup>	Ecoinvent	1,09170	0,01794	0,03643	0,01745
Tratamiento de RILES	Tratamiento de aguas residuales, promedio, capacidad 9,5E10	China	m <sup>3</sup>	Ecoinvent	0,24566	0,00623	0,01825	0,01231

### 5.2.2.1. Discusiones

A continuación se discute la selección de los factores de emisión para cada etapa de los procesos. Cada etapa es discutida de forma individual mencionando la actividad representativa a la que están asociados los factores de emisión.

#### 5.2.2.1.1. Digestión aeróbica

**Etapa:** Generación de ROD

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

La actividad de generación de residuos, considerando la separación en el origen, no se puede representar a través de ninguna actividad contenida en la base de datos. Se asumen que factor de emisión de la actividad es cero debido a que en su operación no existen flujos materiales ni energéticos significativos, con excepción al del flujo material que representa el uso de bolsas como empaque de los residuos. Esta suposición es válida ya que el estudio solo considera las etapas nivel 0, 1 y 2. Por el contrario, si se considerase las etapas nivel 3 o 4, por ejemplo, las construcciones de los equipos, entonces se debiesen considerar también el uso de contenedores de residuos.

El supuesto adoptado implica una subestimación del impacto de la actividad; sin embargo, el flujo másico de bolsas utilizadas se considera insignificante en contraste al impacto que tiene el resto del proceso.

**Etapa:** Transporte

**Actividad representativa:** Transporte, transporte, camión de 16-32 toneladas, EURO 5

La base de datos ofrece factores de emisiones asociados al transporte en camión según: masa del camión y tecnología de combustión y tratamiento de gases. Se selecciona la categoría de 16-32 toneladas debido a que la masa media de camiones recolectores de residuos es 16 toneladas [55].

Tabla 5.14: Emisiones vehículos categoría EURO 5 y valores emisiones máximas permitidas por norma

Emisión [g/km]	Valor emisión máxima establecido por norma	Valor emisión de vehículos categoría EURO 5
NO <sub>x</sub>	2	0,18
CO	5	0,5
MP	0,1	0,05
HC	0,14	0,05

La tecnología de combustión y tratamiento de gases está definida según normas europeas (EURO) numeradas del 1 al 6, donde 1 representa tecnologías más antiguas y 6 tecnologías más nuevas. Se elige la categoría EURO 5 debido a que es la categoría más antigua que cumple con la norma chilena para emisiones de vehículos pesados (DS 55 del Ministerio de

Transporte y Telecomunicaciones) (ver tabla 5.14) [56]. Se considera que el factor de emisión seleccionado representa el impacto del transporte en los procesos propuestos y no debería significar una subestimación o sobrestimación en los resultados obtenidos.

**Etapa:** Separación

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

La actividad de separación no se puede representar a través de ninguna actividad contenida en la base de datos, por lo tanto, se omite el impacto que la actividad tenga. El proceso de separación propuesto para el proceso consiste en la separación manual debido a la diversidad de impurezas que contienen los residuos orgánicos domiciliarios. Esto implica que el único flujo alimentado al proceso es la energía que requiera el sistema mecánico para mover o dispersar los residuos y hacer más fácil para los operarios retirar las impurezas. Fue imposible estimar con un nivel aceptable de certeza el flujo energético que requiere la etapa debido a que varía caso a caso según el diseño de la planta. La no consideración del flujo energético de la actividad implica una subestimación del impacto en el proceso.

**Etapa:** Molienda

**Actividad representativa:** Tratamiento de residuo de madera, post consumo, molienda

De todos los factores de emisión presentes en la base de datos que describen procesos de molienda el único que evalúa el tratamiento de materia orgánica es el relacionado a madera, los demás consideran flujos materiales de minerales y metales. Se elige el flujo material más parecido al de residuos orgánicos bajo el parámetro de dureza del material. El factor de emisión elegido arrojará un indicador sobrestimado para la etapa de molienda debido a que probablemente es necesario una mayor energía específica para moler madera que residuos orgánicos domiciliarios.

**Etapa:** Degradación aeróbica

**Actividad representativa:** Tratamiento de residuos biológicos, compostaje

De los procesos disponibles en la base de datos el seleccionado es el único que hace referencia al tratamiento de residuos orgánicos a través de la digestión aeróbica. El valor del factor de emisión para el potencial de calentamiento global es alto considerando que no se cuenta el impacto del  $CO_2$  por ser biogénico. El valor puede deberse a el potencial de calentamiento global de otros gases generados, junto con el impacto asociado a la operación del proceso que asegura la disponibilidad de oxígeno en el sistema (sistemas de inyección de oxígeno por aireación forzada o pasiva, o sistemas mecánicos que agiten la mezcla). Estudios muestran que en promedio el PCG de la operación de compostaje es responsabilidad de los dos factores mencionados, contribuyendo más la generación de GEI (74 %) que la demanda energética necesaria para la operación (21 %) [58]. Si bien la base de datos no explicita la tecnología utilizada para llevar a cabo la operación, se asume que el factor lo considera, en consecuencia no se estimará el impacto del proceso de aireación aparte y se asume como considerado.

También, la localidad del impacto es china; sin embargo, es una variable que no debería

afectar en gran cantidad debido a que se asume que el proceso de digestión aeróbica ocurre de manera similar en cualquier contexto ambiental normal (excluyendo los contextos ambientales en los que la temperatura sea mucho mayor o mucho mejor al promedio global).

Si bien el factor de emisión es mayor en comparación a las emisiones de dióxido de carbonos directas del balance de masa para el proceso de digestión aeróbica, es cierto que no se está considerando el impacto de otros gases ni el funcionamiento de la operación. Por lo tanto, se considera que el factor expresa una estimación del impacto aceptable.

**Etapa:** Deshidratación

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

La deshidratación del compost no es una actividad que se pueda representar a través de las actividades disponibles en la base de datos. Para la etapa de deshidratación se propone un proceso de secado solar, un fenómeno que ocurre por el intercambio de agua entre las pilas de producto con el medio ambiente por el gradiente de concentración de agua en ambos medios. Se observan dos flujos principales en la etapa: la energía utilizada para homogeneizar la humedad en la pila, por ejemplo, mediante palas mecánicas, y el flujo de agua evaporado. El flujo energético no se estimó debido a que varía caso a caso y depende del diseño de la etapa, por lo que no considerarlo implica una subestimación del impacto del proceso. El flujo de agua evaporado no genera un impacto debido a que es un proceso que se da de forma natural. Si bien el vapor de agua es uno de los gases de efecto invernadero con mayor potencial de calentamiento global, no es considerado en las evaluaciones de impacto ambiental. Esto debido a que el vapor de agua es una especie que tiene un tiempo de vida medio en la atmósfera de días o semanas [?].

#### 5.2.2.1.2. Digestión anaeróbica

**Etapa:** Generación de ROD

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

Aplican las mismas discusiones que para la generación de ROD en la digestión aeróbica.

**Etapa:** Transporte

**Actividad representativa:** Transporte, transporte, camión de 16-32 toneladas, EURO 5

Aplican las mismas discusiones que para el transporte en la digestión aeróbica.

**Etapa:** Separación

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

Aplican las mismas discusiones que para la separación en la digestión aeróbica.

**Etapa:** Molienda

**Actividad representativa:** Tratamiento de residuo de madera, post consumo, molienda

Aplican las mismas discusiones que para la molienda en la digestión aeróbica.

**Etapa:** Degradación anaeróbica

**Actividad representativa:** Tratamiento de estiércol y residuos biológicos a través de digestión anaeróbica

La base de datos ofrece solo un factor de emisión para la actividad de digestión anaeróbica. No entrega factores según la diversificación de la alimentación, solo considera la co-digestión de estiércol con residuos biológicos (una generalización de los residuos orgánicos, sin especificar su procedencia), ni el régimen de operación del proceso unitario, no se menciona si se lleva a cabo bajo un régimen psicrófilo, mesófilo o termófilo. Sin embargo, se puede deducir de la comparación entre los factores de emisión de la digestión anaeróbica ( $0,477 [kgCO_2eq/kg_{ROD}]$ ) y la digestión aeróbica ( $4,1 [kgCO_2eq/kg_{ROD}]$ ) para la categoría de impacto de Potencial de Calentamiento Global, que la actividad considera la no emisión directa de los gases generados a la atmósfera. Debido a que la digestión anaeróbica genera metano como principal producto gaseoso, en contraste con su contraparte aeróbica donde el principal producto gaseoso es dióxido de carbono, si la actividad considerara la emisión directa de los gases generados entonces debiese tener un factor de emisión mucho mayor al de la digestión aeróbica debido a que el metano tiene un potencial de calentamiento global 24 veces mayor que el del dióxido de carbono bajo un horizonte de tiempo de 100 años.

Al observar las entradas principales (energía térmica) y salidas principales del proceso (productos gaseosos), se asume que el valor del factor de emisión es un reflejo del consumo de energía de la actividad (asumiendo que es energía extraída de la matriz energética no necesariamente renovable) y posibles flujos gaseosos emitidos a la atmósfera por una eficiencia de recuperación cercana pero menor al 100 %. Debido a que el proceso propuesto considera el aprovechamiento de la energía térmica recuperada en la etapa de recuperación energética, entonces el factor de emisión sería una sobrestimación de lo que ocurre en el caso propuesto.

**Etapa:** Degradación anaeróbica sin recuperación

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

La degradación anaeróbica sin recuperación es una etapa ficticia en el proceso, incluida para representar la degradación de los residuos orgánicos no degradados en la etapa de degradación anaeróbica. Si bien el no considerar el impacto de esta etapa supone una subestimación considerable, también es sensato pensar que el impacto que intenta retratar esta etapa en el balance de masa está contenida en el factor de emisión para la digestión anaeróbica. Así, considerar que esta no tiene un impacto no genera una subestimación o sobrestimación del impacto del proceso.

**Etapa:** Separación sólido-líquido

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

La base de datos no ofrece factores de emisión para actividades de separación sólido líquido. Los procesos de separación del digestato sólido con el digestato líquido se llevan a cabo por proceso que aprovechan las diferencias de densidad de las fases para separarlas, por ejemplo, proceso de decantación o sedimentación [57]. Debido a que se aprovechan procesos naturales de separación, las operaciones no tiene demandas energéticas asociadas al proceso además de las necesarias para transportar los flujos materiales dentro y fuera de los equipos. La no consideración de la energía requerida para el movimiento de los flujos materiales en la etapa genera una subestimación en el impacto del proceso.

**Etapas:** Deshidratación del digestato sólido

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

No se definen factores de emisión para operaciones de deshidratación o secado en la base de datos. Sin embargo, debido a que para la etapa de secado se propone un procesos de secado solar, por a la magnitud del flujo de digestato sólido que se debe deshidratar, no existen flujos energéticos o másicos significativos en la operación. Los principales flujos identificados son la energía de transporte, necesaria para alimentar y extraer el flujo de la operación, y el flujo de agua evaporado. La energía de transporte no es considerada dentro del límite del sistema. El flujo de agua evaporado no es considerado como una especie que contribuya al impacto ambiental, particularmente al potencial de calentamiento global. Por otro lado, el agitar el digestato durante la operación contribuye a homogeneizar la mezcla y favorecer las tasas de evaporación, por lo que es una actividad que pudiese ser incluida en potenciales líneas de tratamiento de digestato. Si fuese el caso, la no consideración del impacto ambiental de la etapa implicaría la subestimación de su impacto ambiental debido a que no se incluye la energía necesaria (distinta de la energía de transporte) para llevar a cabo la operación.

**Etapas:** Concentración del digestato líquido

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

La etapa de concentración del digestato no se puede representar a través de ninguna actividad propuesta por la base de datos. El considerar piscinas de evaporación para llevar a cabo la operación unitaria implica que no existen flujos energéticos o másicos involucrados en la etapa, además del flujo energético de transporte y el flujo de agua evaporada, el primero excluido del límite del sistema del estudio y el segundo no considerado como una especie que genere impacto en el potencial de calentamiento global. Así, no se considera que exista una subestimación o sobrestimación del impacto de la etapa.

**Etapas:** Depuración de biogás

**Actividad representativa:** Tratamiento de biogás, purificación a metano 96 %v/v

La base de datos ofrece diferentes factores de emisión para la mejora en la calidad del gas (aumento de la fracción de metano en el gas). Se selecciona la única actividad que no considera el transporte del biogás hasta el usuario ya que la alternativa utiliza el combustible en la misma planta. La actividad considera una mejora hasta el 96 %v/v, lo que no genera problemas debido a que el biogás en los procesos propuestos se depura hasta una fracción

muy similar (97 %v/v). Sin embargo, solo se entrega información sobre la concentración de metano en el producto, y no se menciona la eficiencia del proceso. Esto va a generar un error en los resultados debido a que la energía alimentada en la etapa es proporcional a la diferencia de concentración de metano en la salida y la entrada. Por lo tanto, el factor de emisión para la recuperación de gases desde rellenos sanitarios debiese ser mayor que el de la digestión anaeróbica ya que la fracción volumétrica del gas en la entrada de la etapa es un 10 % menor, por lo tanto, tiene una demanda energética mayor.

**Etapa:** Almacenamiento

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

El almacenamiento no es una actividad que pueda ser representada a través de los factores de emisión disponibles en la base de datos. No considerar su potencial impacto no genera una subestimación o sobrestimación debido a que no existen flujos materiales o energéticos intercambiados entre la etapa y su entorno. La energía utilizada por compresores para transportar el gas a través del proceso queda fuera del límite del sistema.

**Etapa:** Recuperación energética

**Actividad representativa:** Co-generación de energía eléctrica y térmica, gas natural, 3,6 [MW] energía eléctrica, mezcla pobre

Se pudo encontrar diferentes actividades sobre recuperación energética eléctrica y térmica a través de procesos de co-generación en la base de datos. En un principio se filtró por el tipo de combustible que se utiliza, eligiéndose el gas natural como el combustible que más se acerca al proceso estudiado. Debido a la composición del biometano producido en la etapa de depuración de biogás asumirlo como gas natural no debiese representar un error mayor al suponer que el factor de emisión para gas natural es el mismo que para biometano.

Luego, se filtró por la capacidad de la planta de co-generación energética. La base de datos ofrece factores de emisión para plantas con capacidad de 0,05 [MW], 0,2 [MW], 0,5 [MW] y 1 [MW]; sin embargo, la capacidad de la planta determinada a través del balance de masa y energía del proceso es de 3,6 [MW]. Para estimar el factor de emisión de una planta de 3,6 [MW] se realizó una regresión potencial para el comportamiento de los factores de emisión según cada categoría de impacto en función de la capacidad de las plantas. Así, se obtuvo una función para cada factor de emisión en función de la capacidad de la planta (ver anexo 7). Se observó que el comportamiento de todos los factores de emisión para cada categoría de impacto es el mismo, decreciente, con una clara disminución en la variación del factor de emisión a medida que la capacidad de la planta aumenta. Esto es esperable debido al aumento de la eficiencia de las operaciones unitarias al aumentar su capacidad. Evidenciándose una relación entre la eficiencia de un proceso y su factor de emisión.

Otro parámetro que ofrece la base de datos en relación a esta actividad es el lambda o razón de alimentación estequiométrica entre combustible y comburente al proceso. Se seleccionó la co-generación energética de quema pobre o razón de alimentación no estequiométrica debido a que el proceso de alimentación estequiométrica involucra tecnologías más avanzadas

las que no necesariamente sean utilizadas en los posibles procesos implementados en el contexto del estudio.

Los datos utilizados para hacer el ajuste de parámetros son calculados geográficamente en china, lo podría suponer una diferencia con el caso de estudio; sin embargo, se asume que el proceso de combustión de metano y sus emisiones dependen directamente del equipo, sin tener mayor incidencia el lugar donde se realice la actividad.

De todos los factores propuestos por la base de datos para caracterizar la actividad el que más incertidumbre genera al aplicarlo en el caso de estudio es la capacidad de la planta de co-generación; sin embargo, con el ajuste realizado se considera que el error es minimizado. En consecuencia la estimación del factor de emisión no representan una sobrestimación o subestimación.

### 5.2.2.1.3. Recuperación de gases desde rellenos sanitarios

**Etapas:** Generación de ROD

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

Aplican las mismas discusiones que para la generación de ROD en la digestión aeróbica. Sin embargo, vale destacar que a diferencia de las otras tres alternativas, la recuperación de gases a partir de rellenos sanitarios no contempla la separación en el origen.

**Etapas:** Transporte

**Actividad representativa:** Transporte, transporte, camión de 16-32 toneladas, EURO 5

A diferencia de las otras tres alternativas, la etapa de transporte para la recuperación de gases desde rellenos sanitarios no considera la separación en el origen. Por lo tanto, la etapa considera el transporte del 100 % de los RSM y no el 55 %, parte correspondiente a de los ROD. Este caso corresponde a un proceso multifuncional, es decir, el mismo proceso tiene dos funciones: el transporte de la fracción orgánica y el transporte de la fracción inorgánica de los RSM. Para que la comparación se valida el factor de emisión se pondera sólo por el flujo másico de ROD resultando una equivalencia en el impacto de de la etapa en comparación a la misma etapa para las otras alternativas. Sin embargo, cabe destacar que el impacto representa exclusivamente el transporte de la fracción orgánica de los RSM y no de la fracción inerte. De lo contrario sería injusto comparar un transporte que se haga cargo de residuos que no están contemplados en los otras alternativas.

**Etapas:** Compactación

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

La base de datos no ofrece una actividad compatible con la compactación de los residuos en el relleno sanitario. El impacto puede ser calculado a través de la estimación del gasto de combustible o a través de las actividades relacionadas al transporte que ofrece la base de datos. Sin embargo, dicha actividad cabe dentro de la categoría de energía de transporte

(energía utilizada para mover los flujos materiales dentro de un proceso), la que no está contemplada dentro del límite del sistema.

**Etapas:** Estabilización (Lixiviación/Degradación)

**Actividad representativa para las categorías de: CE, SH y AR:** Tratamiento de residuos sólidos municipales, relleno sanitario

**Actividad representativa para la categoría de PCG:** Tratamiento de residuos sólidos municipales, relleno sanitario con recuperación de biogás del 20 %

Se seleccionó de la actividad "Tratamiento de residuos sólidos municipales, relleno sanitario" de la base de datos. La actividad seleccionada no especifica la recuperación de gases ni su proporción. Por lo tanto, frente a la incertidumbre de los factores que considera la actividad para el cálculo del factor de emisión se decide resolver de manera diferente las categorías de impacto de potencial de calentamiento global y los endpoints del método ReCiPe. Debido a que las categorías de impacto endpoint de ReCiPe son una ponderación de 18 categorías de impacto midpoint se aplica el factor de emisión propuesto por la base de datos por la complejidad de estimar los factores de emisión asociados. Para la categoría de impacto Potencial de Calentamiento Global a 100 años se estima un factor de emisión propio, el que considera exclusivamente el impacto generado por los gases generados en el relleno sanitario y no captados por el sistema de recuperación de gases, equivalente al 80 % de los gases generados (ver anexo 7).

Considerar los factores de emisión propuestos por la base de datos para las categorías de impacto endpoint del método ReCiPe genera incertidumbre en el resultado debido a que no se describe el proceso. De asumirse el proceso como la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios sin recuperación, entonces el resultado estaría sobrestimado para las tres categorías (calidad del ecosistema, salud humana y recursos). Sin embargo, la recuperación de gases es un factor que no afecta a todas las categorías midpoint por igual. Por ejemplo, el captar gases de efecto invernadero afecta directamente a la categoría midpoint de potencial de calentamiento global, pero de manera casi nula en la ocupación de tierra. Así, se considera que si bien el no considerar la recuperación implica una sobrestimación en el impacto del proceso, no es directo concluir que las tres categorías endpoint son sobrestimadas en la misma proporción.

El cálculo propio del factor de emisión para la categoría Potencial de Calentamiento Global implica sesgos, principalmente relacionados a la simplificación del balance de masa en relación a las especies gaseosas generadas. Ahora, las especies consideradas son las que se generan en mayor proporción, por lo tanto, el factor estimado se considera representativo del impacto asociado a la categoría de impacto. Vale desatacar que en el caso de que existan especies generadas no consideradas con un potencial de calentamiento global considerablemente mayores que el flujo de especies generadas consideradas, entonces no es posible asegurar una buena representación del impacto. Esto ya que el factor de emisión es calculado como la suma de la ponderación del flujo másico por el potencial de calentamiento global por especie. De esta forma se estaría subestimando el impacto de la etapa.

**Etapas:** Aireación de lixiviados

**Actividad representativa:** Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, aireación

La base de datos no ofrece una actividad compatible con la aireación de lixiviados. Para las categorías de impacto endpoint del método ReCiPe no se considera el impacto. Para la categoría de potencial de calentamiento global el factor de emisión es calculado en base a la energía demandada por el proceso y los gases de efecto invernadero emitidos en la operación (ver anexo 7). Omitir los factores de emisión en las categorías del método de ReCiPe implica una subestimación del impacto del proceso. Mientras que para la categoría de potencial de calentamiento global el error en la estimación del impacto está asociado a la estimación de la demanda energética y a la simplificación del balance de masa para los gases de efecto invernadero generados.

**Etapas:** Tratamiento de RILes en PTAS

**Actividad representativa:** Tratamiento de aguas residuales, promedio, capacidad 9,5E10

Para estimar el factor de emisión de la etapa se considera la actividad "Tratamiento de aguas servidas promedio". La base de datos entrega los factores de emisión para diferentes plantas promedio en función de su capacidad. Ya que el proceso considera que el flujo de lixiviado tratado se inyecta como efluente en la red de alcantarillados, implica que la carga orgánica que no se degradó en la etapa de aireación disminuye su concentración hasta la calidad necesaria para disposición final en una planta de tratamiento de aguas servidas. Así, se aproxima la capacidad de la planta tomando como referencia el caso de la PTAS La Farfana de Aguas Andinas, con una capacidad de 9,5E10 [l/año]. Para determinar los factores de emisión asociados al tratamiento del agua se realiza una regresión potencial (ver anexo 7). Se obtiene que a medida que la planta aumenta su capacidad el factor de emisión, representativo del impacto ambiental del proceso, disminuye, acercándose a una cota mínima.

Existen dos factores que generan incertidumbre al momento de definir si el factor de emisión seleccionado implica una sobrestimación o subestimación del impacto calculado. Por un lado, la locación del factor es china, lo que implica que las normas que regulan las emisiones de los procesos de tratamiento de aguas servidas cambian. También, las tecnologías utilizadas en el tratamiento de las aguas no está definida pudiéndose generar efluentes de diferentes naturalezas. Sin embargo, a pesar de los dos factores mencionados se estima que el factor de emisión no necesariamente se aleja del impacto generado por el escenario de la Región Metropolitana, ya que la actividad seleccionada representa un promedio.

**Etapas:** Depuración de biogás

**Actividad representativa:** Tratamiento de biogás, purificación a metano 96 % vol

Aplican las mismas discusiones que para la etapa de depuración de biogás en la alternativa de digestión anaeróbica.

**Etapa:** Recuperación energética

**Actividad representativa:** Co-generación de energía eléctrica y térmica, gas natural, 1MW energía eléctrica, mezcla pobre

Para la etapa de recuperación energética se toma el mismo factor de emisión que para la recuperación energética eléctrica de la digestión anaeróbica. Sin embargo, el factor no es escalado ya que la capacidad de la planta es muy similar a la de la actividad propuesta: 1[MW] de la actividad propuesta por la base de datos frente a 1,05[MW] del flujo energético de proceso. Se considera que el factor de emisión es representativo del impacto generado por la actividad.

#### 5.2.2.1.4. Incineración

**Etapa:** Generación de ROD

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

Aplican las mismas discusiones que para la generación de ROD en la digestión aeróbica.

**Etapa:** Transporte

**Actividad representativa:** Transporte, transporte, camión de 16-32 toneladas, EURO 5

Aplican las mismas discusiones que para el transporte en la digestión aeróbica.

**Etapa:** Separación

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

Aplican las mismas discusiones que para la separación en la digestión aeróbica.

**Etapa:** Molienda

**Actividad representativa:** Tratamiento de residuo de madera, post consumo, molienda

Aplican las mismas discusiones que para la molienda en la digestión aeróbica.

**Etapa:** Incineración

**Actividad representativa:** Tratamiento de residuos biológicos, incineración municipal

Se elige la actividad de tratamiento de residuos biológicos por incineración municipal como representante de la etapa. No se considera que la elección de la actividad genere una subestimación o sobrestimación en el resultado de las categorías de impacto. Se asume que el impacto generado por la actividad considera la operación del horno y la unidad de recuperación energética debido a la unidad del flujo de referencia [kWh]. Un factor que podría afectar el impacto es la composición de la alimentación a la etapa de incineración; sin embargo, se deduce que los gases generados no son liberados al ambiente en la etapa por su bajo potencial de calentamiento global.

**Etapa:** Precalentador

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

Los procesos de intercambio de calor no tienen actividades representativas en la base de datos. No existen flujos energéticos o másicos involucrados en la etapa mas que los flujos que ceden y captan la energía. El único flujo que se podría considerar entre la etapa y el ambiente es la perdida de calor del equipo por radiación y convección; sin embargo, no se considera que tengan impacto asociado. Se asume que la no consideración del impacto de la etapa no incurre en una subestimación o sobrestimación del impacto calculado.

**Etapa:** Recuperación energética

**Actividad representativa:** No aplica (N/A)

El factor de emisión es incluido en la etapa de incineración.

**Etapa:** Recalentador

**Actividad representativa:** No se considera (N/C)

Aplican las mismas discusiones que para el precalentador en la recuperación de gases desde rellenos sanitarios.

**Etapa:** Depuración de gases de combustión

**Actividad representativa:** Tratamiento de biogás, purificación a metano 96 % vol/vol

La base de datos no ofrece la actividad de tratamiento de gases provenientes de procesos de incineración. Para aproximar el impacto de la etapa se aplica el impacto generado por la purificación de metano. Si bien los procesos consideran diferentes entradas, el proceso de separación de fases gaseosas tiene similitudes para ambos casos. La principal diferencia es que en la depuración de metano está compuesta por tres operaciones unitarias: la deshidratación del gas, mediante la condensación del agua gaseosa en intercambiadores de calor; la limpieza del gas, a través de torres de lavado; y la remoción del dióxido de carbono por sistemas de adsorción; mientras que el lavado de gases de combustión está compuesto solo por el lavado del gas. En consecuencia, la aplicación de los factores de emisión de la depuración de metano para el lavado de gases de combustión generaría una sobrestimación de los impactos debido que los factores de emisión consideran más operaciones unitarias que el proceso en cuestión.

**Etapa:** Tratamiento de RILes

**Actividad representativa:** Tratamiento de aguas residuales, promedio, capacidad 9,5E10 [l/año]

La base de datos de Ecoinvent no contiene actividades que sean representativas del proceso de tratamiento de efluentes líquidos provenientes de procesos de lavado de gases de combustión. Se considera que, debido a la naturaleza de la tecnología (lavado con agua), el impacto del proceso se puede aproximar al impacto del tratamiento de aguas residuales. Así, se considera la actividad "tratamiento de aguas residuales, promedio" para calcular el impacto de la etapa.

## 5.3. Análisis de impacto

En el siguiente subtítulo se muestran los resultados del Análisis de Ciclo de Vida. El subtítulo está dividido en dos secciones, la primera, donde se dan a conocer los resultados de la aplicación de la metodología, y la segunda, donde se discuten los resultados obtenidos.

### 5.3.1. Resultados

En la categoría de impacto Potencial de Calentamiento Global se observa que la alternativa con menor impacto es la digestión anaeróbica con 870 [ $kgCO_2eq/ton_{ROD}$ ], seguida por la digestión aeróbica con 4100 [ $kgCO_2eq/ton_{ROD}$ ], la incineración con 5300 [ $kgCO_2eq/ton_{ROD}$ ], y finalmente la recuperación de gases con 13400 [ $kgCO_2eq/ton_{ROD}$ ]. Si se toma la alternativa con mayor impacto como referencia, en este caso la recuperación de gases, entonces la alternativa de incineración tiene un impacto equivalente al 39,7% de la referencia, la digestión aeróbica un 30,7% y la digestión anaeróbica un 6,4% (ver figura 5.6 (a)).

Luego, en la categoría de impacto Calidad del Ecosistema se muestra que la alternativa con menor impacto también es la digestión anaeróbica con 21 [ $Puntos/ton_{ROD}$ ], con una gran diferencia del resto de las alternativas que presentan un impacto similar. Es seguida por la recuperación de gases con 91,4 [ $Puntos/ton_{ROD}$ ], la digestión aeróbica con 93,5 [ $Puntos/ton_{ROD}$ ] y, finalmente la incineración con 97,6 [ $Puntos/ton_{ROD}$ ]. Así, el impacto de la digestión aeróbica representa un 95,7% del impacto de la incineración, la recuperación de gases un 93,6% y la digestión anaeróbica un 21,5% (ver figura 5.6 (b)).

Después, en la categoría de impacto Salud Humana la alternativa con menor impacto es la digestión anaeróbica con 32,7 [ $Puntos/ton_{ROD}$ ], seguida de la incineración con 178,5 [ $Puntos/ton_{ROD}$ ], luego, la digestión aeróbica con 192 [ $Puntos/ton_{ROD}$ ], y finalmente, la recuperación de gases con 208,9 [ $Puntos/ton_{ROD}$ ]. Si se toma la recuperación de gases como referencia, la digestión aeróbica representa un 91,9% del impacto de la referencia, la incineración un 85,4%, y la digestión anaeróbica un 15,6% (ver figura 5.6 (c)).

Finalmente, en la categoría de impacto Agotamiento de Recursos la alternativa con menor impacto es la recuperación de gases con 12,4 [ $Puntos/ton_{ROD}$ ], seguida por la digestión anaeróbica con 17,7 [ $Puntos/ton_{ROD}$ ], después la incineración con 86 [ $Puntos/ton_{ROD}$ ], y finalmente la digestión aeróbica con 132,3 [ $Puntos/ton_{ROD}$ ]. Si se toma la digestión aeróbica como referencia, la incineración representa un 65% de la referencia, la digestión anaeróbica un 13,3% y la recuperación de gases un 9,3% (ver figura 5.6 (d)).

Al analizar los resultados relativos al 100% del impacto de cada alternativa se puede observar que las etapas contenidas en la macroetapa de preprocesamiento tienen un impacto prácticamente nulo. Para todas las categorías de impacto evaluadas la alternativa en la que el preprocesamiento tiene mayor preponderancia es en la digestión anaeróbica, alcanzando su máximo en la categoría R con un 3,8% del impacto total de la alternativa (ver figura 5.7).

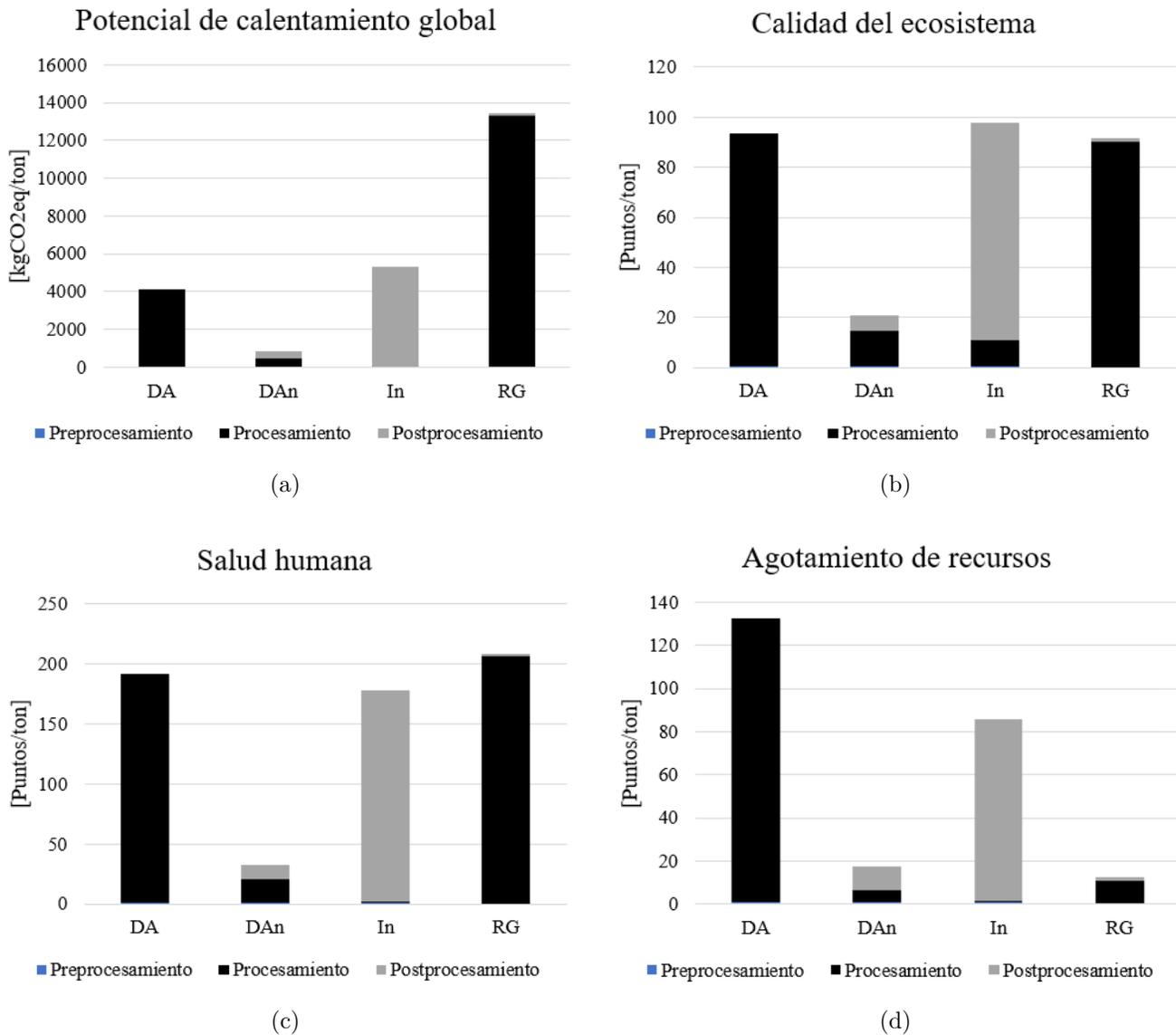


Figura 5.6: Impactos de la valorización de una tonelada de ROD a través de los procesos de DA (digestión aeróbica), DAn (digestión anaeróbica), In (incineración) y RG (recuperación de gases desde rellenos sanitarios) sobre las categorías de impacto: (a) PCG (potencial de calentamiento global), (b) CE (calidad del ecosistema), (c) SH (salud humana) y (d) AR (agotamiento de recursos). Elaboración propia.

El impacto de la digestión aeróbica en las cuatro categorías es contribuido prácticamente en su totalidad por el procesamiento. Esto ya que no se consideraron los posibles impactos de la etapa de deshidratación del compost generado.

Al impacto de la digestión anaeróbica contribuyen de manera más equitativa el procesamiento y postprocesamiento. El máximo aporte del procesamiento es en la Calidad del Ecosistema con un 67,5% y el mínimo aporte del procesamiento es en el Agotamiento de Recursos con un 32%.

En la incineración el aporte del postprocesamiento domina en las cuatro categorías con un mínimo en la Calidad del Ecosistema con un 88,9%, y un máximo en el Potencial de Calentamiento Global con un 99,2%.

Para la recuperación de gases el procesamiento es la etapa que más contribuye al impacto en las cuatro categorías. El máximo aporte lo hace en la categoría de Potencial de Calentamiento Global con un 99,3% y el mínimo en la categoría de Agotamiento de Recursos con un 86,2% (ver figura 5.7).

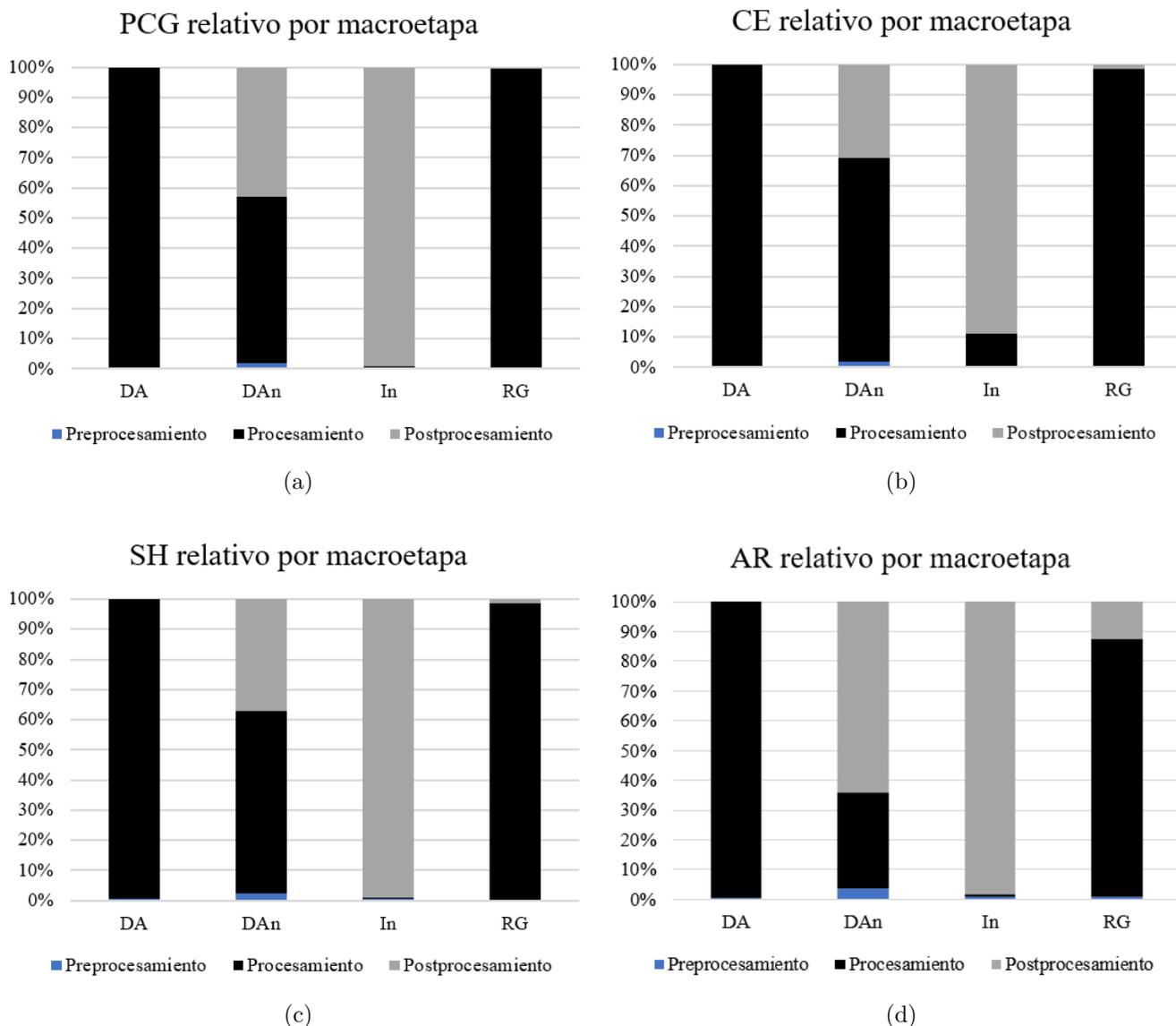


Figura 5.7: Impactos relativos por macroetapa de la valorización de una tonelada de ROD a través de DA (digestión aeróbica), DAn (digestión anaeróbica), In (incineración) y RG (recuperación de gases desde rellenos sanitarios) sobre las categorías de impacto: (a) PCG (potencial de calentamiento global), (b) CE (calidad del ecosistema), (c) SH (salud humana) y (d) AR (agotamiento de recursos). Elaboración propia.

Tabla 5.15: Impactos relativos desagregados por etapa de las alternativas de DA (digestión aeróbica), DAn (digestión anaeróbica), In (incineración) y RG (recuperación de gases desde rellenos sanitarios) sobre las categorías de impacto: (a) PCG (potencial de calentamiento global), (b) CE (calidad del ecosistema), (c) SH (salud humana) y (d) AR (agotamiento de recursos). No se incluyen las etapas no consideradas (N/C) mencionadas en la sección 5.2.2. Elaboración propia.

Macroetapa	Preprocesamiento (100%)		Procesamiento (100%)	Postprocesamiento (100%)				
Etapa	Transporte	Molienda	Degradación biológica	-	-	-	-	
DA	PCG	17%	100%	-	-	-	-	
	CE	16%	100%	-	-	-	-	
	SH	15%	100%	-	-	-	-	
	AR	20%	100%	-	-	-	-	
Etapa	Transporte	Molienda	Degradación biológica	Depuración de biogás	Recuperación EE	Recuperación ET	Recuperación	
DAn	PCG	17%	100%	51%	46%	-	2%	
	CE	16%	100%	49%	49%	-	2%	
	SH	15%	100%	53%	45%	-	2%	
	AR	20%	100%	27%	70%	-	3%	
Etapa	Transporte	-	Estabilización	Depuración de biogás	Recuperación EE	Tratamiento RILes	Aireación Lixiviados	
RG	PCG	100%	-	100%	9%	<0,1%	<0,1%	
	CE	100%	-	100%	10%	0,1%	<0,1%	
	SH	100%	-	100%	9%	0,1%	<0,1%	
	AR	100%	-	100%	76%	23%	0,1%	<0,1%
Etapa	Transporte	Molienda	Incineración	Depuración de gases	-	Tratamiento RILes	-	
In	PCG	17%	83%	100%	99,9%	-	0,1%	-
	CE	16%	84%	100%	99,9%	-	0,1%	-
	SH	15%	85%	100%	99,8%	-	0,2%	-
	AR	20%	80%	100%	99,7%	-	0,3%	-

En la tabla 5.15 se muestra el peso relativo de cada etapa en el total del impacto de la macroetapa a la que corresponde. Se observa que en la macroetapa de preprocesamiento la etapa de molienda tiene mayor relevancia que la etapa de transporte en todas las alternativas (excepto en la recuperación de gases donde no está contemplada la etapa de molienda), responsable de entre un 80 % a un 85 % del impacto total de la macroetapa. En el procesamiento todas las alternativas contienen una única etapa, por lo que todas ellas son responsables del total del impacto de la macroetapa. En el postprocesamiento se observa que la depuración de gases (biogás o gases de combustión) es la etapa que más influye para las alternativas de incineración y recuperación de gases desde rellenos sanitarios, entre un 76 % y un 99,9 %. En el caso de la digestión anaeróbica la depuración de biogás y la recuperación de energía eléctrica tienen un peso similar, equivalente a la mitad del impacto aproximadamente. Las etapas de tratamiento de RILes, aireación de lixiviado y recuperación de energía térmica no representan un impacto significativo en ninguna alternativa, menores al 3 % del impacto en todas las etapas.

### 5.3.2. Discusiones

El impacto de las alternativas en la categoría de potencial de calentamiento global es causado principalmente por dos factores: (i) las emisiones directas de GEI, compuestas por gases resultantes de la degradación de orgánicos y los gases de combustión generados por operaciones dependientes de combustibles fósiles en etapas del foreground, y (ii) las emisiones indirectas, compuestas por gases producidos por las mismas operaciones unitarias o consumo de combustibles fósiles en etapas del background.

La alternativa que obtiene el máximo impacto en la categoría es la recuperación desde rellenos sanitarios, siendo la macroetapa más significativa el procesamiento. Esta macroetapa está compuesta exclusivamente por la etapa de estabilización, donde se consideraron solo las emisiones directas. Por lo tanto, la razón del impacto es la magnitud de la emisión directa de metano a la atmósfera, causadas por el alto PCG de la especie y la baja fracción de recuperación de gases (20 %).

El proceso de incineración es la segunda alternativa con mayor impacto en la categoría, y prácticamente el total es atribuido por la macroetapa de postprocesamiento. El postprocesamiento está compuesto por las etapas de depuración de gases y tratamiento de riles, donde la primera es responsable del 99,9 % del impacto (ver tabla 5.15). Esto debido a la magnitud del flujo volumétrico de gases a tratar y la demanda energética (en base a carbón) asociada.

El potencial de calentamiento global de la digestión aeróbica es responsabilidad, casi en su totalidad, del procesamiento. Así, la macroetapa está compuesta únicamente por la etapa de degradación biológica o digestión aeróbica. Los flujos involucrados en la etapa son principalmente la alimentación energética para la inyección de oxígeno en las pilas (ya sea por ventilación forzada o por agitación de la pila), y la generación de GEI. Debido a que el dióxido de carbono generado no es contabilizado en el PCG y que la composición de posibles COV generados es una fracción pequeña (por estequiometría), entonces se deduce que la responsabilidad del impacto recae en la utilización de energía en base a carbón para oxigenar

las pilas de digestión.

En el caso de la digestión anaeróbica el procesamiento contribuye a un 55 % al potencial de calentamiento global, mientras que el postprocesamiento representa el 43 % del impacto. El procesamiento considera solo la etapa de digestión anaeróbica, donde el impacto está asociado a la operación del biodigestor. Si bien la base de datos no entrega información sobre los flujos considerados para calcular el indicador, se deduce que el principal flujo considerado es el flujo energético necesario para mantener la temperatura y la agitación del sistema. Aún sin tener certeza sobre la construcción del factor de emisión la magnitud del impacto tiene sentido al compararlo con el del resto de las alternativas. Esto debido a que, por un lado, la energía para mantener la temperatura del sistema es recuperada de la combustión del biogás; por otro lado, aun cuando sea necesario agitar el sistema como en su contraparte aeróbica, se espera que su impacto sea mucho menor ya que no se busca integrar oxígeno sino que homogeneizar el sistema para asegurar un desarrollo uniforme del proceso. Al impacto del postprocesamiento contribuye la depuración de biogás en un 51 % y la recuperación de energía eléctrica en un 46 % (ver tabla 5.15), El impacto de la primera etapa está asociado al consumo energético, sin embargo es mucho menor que la incineración debido a la magnitud del flujo volumétrico de gas tratado. El impacto de la recuperación de energía eléctrica se debe a la combustión de metano, a la que está asociada la emisión de GEI.

Para analizar las categorías de impacto endpoint es necesario considerar las categorías midpoint que las componen y las especies relevantes en su evaluación (ver sección 5.1.9.2). Se discutirá la relevancia de cada categoría midpoint en el resultado de las categorías endpoint en base a la presencia o ausencia de especies relevantes en el proceso; sin embargo, el análisis se realizará de forma cualitativa y no cuantitativa. Para realizar un análisis cuantitativo se debe analizar los resultados de las categorías midpoint, lo que queda fuera del alcance del trabajo. En particular, las categorías de ecotoxicidad no se discutirán por la diversidad de especies que contribuyen en el impacto y la poca certeza de la magnitud de su producción.

Luego, en la categoría calidad del ecosistema la alternativa con mayor impacto es la incineración, siendo el postprocesamiento su mayor contribución al impacto. La macroetapa está conformada por la etapa de depuración de gases y tratamiento de RILes; sin embargo esta última representa solo un 0,1 % del impacto de la macroetapa (ver tabla 5.15). Las categorías midpoint responsables del impacto son: el potencial de calentamiento global, por la demanda energética del proceso, el uso de agua, por la demanda hídrica del proceso, y la formación de ozono troposférico, por la posible liberación de NOx y COV al ambiente.

La digestión aeróbica es la segunda alternativa con mayor impacto en la categoría de calidad del ecosistema. Su impacto es responsabilidad prácticamente en su totalidad del procesamiento. Dentro de las categorías midpoint que más pueden estar influyendo principalmente son: potencial de calentamiento global, por la demanda energética, eutrofización de agua fresca, por la generación de especies en base a nitrógeno, y acidificación terrestre, por la generación de  $NH_3$ .

La alternativa de recuperación de gases desde rellenos sanitarios es la tercera con mayor

impacto, siendo el procesamiento la macroetapa con mayor responsabilidad en el impacto (98%). Las categorías midpoint que pueden influir de manera considerable son: potencial de calentamiento global, por las emisiones directas de metano en la atmosfera, la formación de ozono troposférico, por la generación de NOx y COV, y acidificación terrestre, por la generación de especies acidificantes.

La alternativa con menor impacto en la categoría endpoint es la digestión anaeróbica, con casi un 70% del impacto asociado a la etapa de procesamiento. Las categorías endpoint que probablemente influyan más en el impacto es la categoría de potencial de calentamiento global. La categoría de uso de agua puede influir de igual manera, sin embargo, el resto de las categorías midpoint no se considera que impacten de manera significativa debido a que la operación se realiza de forma cerrada en un reactor.

Después, en la categoría de impacto salud humana la alternativa de recuperación de gases desde rellenos sanitarios es la alternativa con mayoría impacto, esto se puede deber a la contribución de las categorías midpoint: material particulado, por la formación secundaria debido a las emisiones de SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub>, la formación de ozono troposférico, por la generación de NO<sub>x</sub> y COV, y el potencial de calentamiento global, por las emisiones directas de metano.

Le sigue la digestión aeróbica, que al igual que la recuperación de gases se realiza en un ambiente abierto, donde las emisiones secundarias (emisiones gaseosas que no consideran el CO<sub>2</sub> o CH<sub>4</sub>) se disponen directamente en el ambiente. Las categorías midpoint se consideran las mismas que para el relleno sanitario.

La incineración es la tercera alternativa con mayor impacto y su impacto se le atribuye a las categorías midpoint: el uso de agua, asociado también a la depuración de gases, material particulado, por la formación secundaria de material particulado debido a las emisiones del proceso de depuración de gases, y la formación de ozono troposférico por las emisiones de NO<sub>x</sub> y COV en la depuración de gases.

La alternativa con menor impacto en la categoría de salud humana es la alternativa de digestión anaeróbica, donde el 64% es responsabilidad del procesamiento. Probablemente, debido a que la operación es un sistema cerrado, el impacto se deba a la contribución de las categorías midpoint de uso de agua; sin embargo, no es un flujo que se vea reflejado en el inventario construido en el trabajo.

Por otro lado, la categoría de impacto de agotamiento de recursos está compuesta por las categorías midpoint de agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles. Sin embargo, en la operación de las alternativas estudiadas se considera que el flujo mineral es mínimo, si no nulo, en comparación a la utilización de combustibles fósiles. Por lo tanto, se asume que el indicador endpoint tiene una relación directa y exclusiva con la categoría midpoint de agotamiento de combustibles fósiles. En este sentido se observa que las alternativas con mayor consumo de combustibles fósiles son la digestión anaeróbica y la incineración. La primera por la energía que demanda la inyección de oxígeno en el sistema y

la segunda por el volumen de gas que se debe tratar. Las alternativas de digestión anaeróbica y recuperación de gases tienen un valor significativamente menor por la poca energía, en comparación a las otras dos alternativas, que requiere su operación.

Finalmente, se observa que hay una concordancia observada a través de las categorías de impacto en las macroetapas que influyen en mayor medida. En la digestión aeróbica el procesamiento, en la incineración el postprocesamiento, en la recuperación de gases el procesamiento y en la digestión anaeróbica una relación variable pero cercana al 50 % entre el procesamiento y postprocesamiento.

# Capítulo 6

## Discusiones generales

Bajo los resultados obtenidos se puede establecer en general a la digestión anaeróbica como la mejor alternativa al considerar las categorías relacionadas con el impacto ambiental (*PCG* y *CE*). Tanto en la categoría de potencial de calentamiento global como en la de calidad del ecosistema la alternativa obtuvo el menor impacto entre las cuatro comparadas. Por otro lado, las categorías de salud humana y agotamiento de recursos, si bien no son indicadores directos del impacto ambiental y apuntan a otras áreas de protección, nos entregan información para poner en una perspectiva más compleja los resultados, incorporando la relación de la sociedad con el medio ambiente. En la categoría de salud humana la digestión anaeróbica se muestra en una posición considerablemente mejor que la otras tres. Y es solo en la categoría de agotamiento de recursos donde la digestión anaeróbica queda en segundo lugar por un estrecho margen al compararla con la recuperación de gases desde rellenos sanitarios. Sin embargo, el alto impacto de la valorización de ROD a través de rellenos sanitarios en las otras tres categorías hace imposible considerarla como una alternativa atractiva ambientalmente.

De los resultados se puede deducir que la inversión en políticas públicas que fomenten la separación de orgánicos e inorgánicos en el origen es necesaria. Sin embargo, esta deducción es en base a parámetros ambientales y sobre la comparación de alternativas que si consideran la separación en el origen como responsabilidad de las personas. Para concluir sobre esta materia es necesario comparar las alternativas de valorización respecto a otras alternativas que consideren, por ejemplo, etapas de separación industrial.

Considerando que la información del estudio apunta a la generación de políticas públicas, un parámetro que genera incertidumbre en los resultados es la temporalidad. El estudio considera cuatro tecnologías actuales y asume que no van a tener variaciones significativas en el futuro, lo que no necesariamente sea así. Se está comparando procesos que tienen tiempos de residencia en la planta de horas, días o meses (In, DAn y DA, respectivamente) con procesos que demoran decenas de años (rellenos sanitarios). Así, el impacto de la valorización de residuos en las primeras tres alternativas será provocado en el corto plazo, pero el impacto de la valorización por rellenos sanitarios se verá materializado de un mediano a largo plazo. Esto genera incertidumbre ya que se está asumiendo el impacto del relleno sanitario con tecnologías de hoy cuando su impacto va a estar condicionado por las tecnologías que existan en un futuro.

No incluir la energía de transporte dentro del análisis generará variaciones en los resultados, principalmente por dos variables: la distancia que deben recorrer los flujos másicos y su estado de agregación. Así, la recuperación de gases desde rellenos sanitarios es la alternativa que podría aumentar su impacto considerablemente por las dimensiones del relleno sanitario. Por otro lado, la incineración puede que sea la que disminuya menos su impacto ya que su postratamiento es únicamente una línea gaseosa.

Los resultados obtenidos son un reflejo de la construcción del inventario, compuesto por el inventario de flujos y por el inventario de los factores de emisión. Sin embargo, el puntaje obtenido por cada alternativa en las diferentes categorías de impacto son resultado de la construcción de cada proceso a través de factores de emisión. Es decir, el estudio consideró en su mayoría factores de emisión que representen actividades en su totalidad y no factores de emisión asociados a los flujos elementales. Por ejemplo, para la alternativa de recuperación de gases desde rellenos sanitarios se utilizó el factor de emisión de Ecoinvent para las tres categorías endpoint (factor de emisión asociado a la actividad a través del flujo de residuos que entra a la etapa), mientras que para la categoría de potencial de calentamiento global se calculó un factor de emisión asociado a las emisiones del balance de masa.

Los resultados tienen como propósito ayudar a grupos de interés en la toma de decisiones sobre el impacto ambiental de procesos de valorización de ROD. Debido a esto el estudio veló por representar el impacto promedio de cada alternativa. Para representar las etapas de manera general se decidió no utilizar factores de emisión asociados a flujos elementales y recoger la generalidad de los procesos contenidas dentro de los factores de emisión ofrecidos por Ecoinvent.

Además, fue necesario utilizar factores de emisión que representen la actividad en general para las categorías endpoint por la complejidad que implica el calcular las 18 categorías midpoint por las que están compuestas. La categoría de potencial de calentamiento global se podría haber calculado a través de factores de emisión asociado a los flujos elementales, particularmente a los GEI emitidos en cada etapa, pero, como se mencionó, se utilizaron factores de emisión que representen actividades ya que podrían haber variables que no necesariamente estén representadas en el balance de masa.

Utilizar las categorías de impacto endpoint implica asignarle una importancia predeterminada a las categorías midpoint, Ahora, la toma de decisiones frente al posible impacto de una actividad debe ser en base al contexto particular de cada situación. Por ejemplo, la categoría de impacto endpoint calidad del ecosistema contempla la categoría de impacto midpoint uso de agua para su calculo; sin embargo, el uso de agua en una región seca no tiene el mismo impacto que el uso de agua en una zona lluviosa. Por lo tanto, vale cuestionar si la utilización de factores de emisión endpoint son suficientes para la generación de políticas públicas.

Para asegurar la generalidad de las etapas o representar el promedio del impacto de las etapas se seleccionaron los factores de emisión de localidad global (GLO) o evaluadas en el resto del mundo (RdM) (ver sección 5.2.2). Sin embargo, los factores de emisión de Ecoinvent

ofrecen únicamente información sobre el proceso de la actividad que representa, y no específica sobre las características de las entradas y salidas de las "actividades representativas". Esto genera incertidumbre en procesos que se pueden llevar a cabo de diferentes maneras y no se especifica de qué manera se hace o qué variables considera en el factor de emisión. La subestimación o sobrestimación de los factores de emisión se discute en la sección 5.2.2.1.

Así, los resultados son una buena herramienta para comparar las diferentes tecnologías de valorización de ROD, sin embargo, muestran su desempeño ambiental de forma general.

# Capítulo 7

## Conclusiones

Debido a la actividad humana el planeta entró en una nueva era hace algunas décadas, que la comunidad científica ha llamado Antropoceno. La definición de esta nueva era se basa en el inequívoco impacto que los sistemas productivos han causado en el medio ambiente. La crisis climática, causada por la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera significan un riesgo para la estabilidad de la vida. Se han propuesto nuevos modelos que se hagan cargo de la problemática como el de economía circular, donde se propone, entre otras cosas, disminuir los flujos que entran y salen del sistema productivo. Hasta hoy, los residuos orgánicos domiciliarios han sido culturalmente vistos como un desecho sin potencial alguno, pero nuevos lineamientos estatales proponen generar un nuevo mercado que valore los residuos orgánicos.

En este contexto, se realiza el presente trabajo que tiene por objetivo evaluar ambientalmente, a través de la metodología Análisis de Ciclo de Vida, cuatro alternativas de valorización de residuos orgánicos domiciliarios: digestión aeróbica, digestión anaeróbica, incineración, y recuperación de gases desde rellenos sanitarios. El propósito del trabajo es generar información sobre el desempeño ambiental de las alternativas para fomentar el desarrollo de la industria de valorización de orgánicos desde una perspectiva responsable ambientalmente.

La comparación se realizó bajo cuatro categorías de impacto: potencial de calentamiento global, calidad del ecosistema, salud humana y agotamiento de recursos. La primera, una categoría midpoint, bajo el método IPCC 2013 y las demás, categorías endpoint, bajo el método ReCiPe 2016. La unidad funcional definida en el análisis es "la degradación total, según la capacidad técnica de cada alternativa, de 1 tonelada de residuos orgánicos domiciliarios generados en el Gran Santiago". El estudio consideró un marco de referencia atribucional, por lo que no se incluyeron los impactos que genera el reemplazo de procesos fuera del límite del sistema. El límite del sistema se estableció desde la recolección de los residuos en los domicilios generados hasta la valorización de los productos o subproductos de la degradación de la materia orgánica. No se incluyó dentro del límite la energía de transporte utilizada para trasladar los flujos máscicos de una operación unitaria a otra. El inventario de flujos se realizó a través de balances de masa y los factores de emisión se extrajeron de la base de datos de Ecoinvent.

Los resultados muestran que la digestión anaeróbica es la alternativa con menor impacto en

las categorías de potencial de calentamiento global, calidad del ecosistema y salud humana. La recuperación de gases obtiene el mínimo impacto en la categoría de agotamiento de recursos, sin embargo, es la alternativa con mayor impacto en el resto de las categorías (ver tabla 7.1). Así, se recomienda potenciar la digestión anaeróbica como tecnología para reciclar y valorizar residuos orgánicos en el Gran Santiago.

Tabla 7.1: Resultados por alternativa para las categorías PCG (potencial de calentamiento global), CE (calidad del ecosistema), SH (salud humana) y AR (agotamiento de recursos). Elaboración propia.

	PCG [kgCO <sub>2</sub> eq]	CE [puntos]	SH [puntos]	AR [puntos]
Digestión aeróbica	4100	93,5	192	192,3
Digestión anaeróbica	870	21	32,7	17,7
Incineración	5300	97,6	178,5	86
Recuperación de gases	13400	91,4	208,9	12,4

En la digestión aeróbica la mayor contribución al impacto es de la macroetapa de procesamiento, principalmente debido a la energía utilizada en la operación unitaria y los GEI emitidos como  $CH_4$  y COVs. La contribución al impacto de la incineración proviene de el postprocesamiento, esto por el volumen de gas que debe tratar. La recuperación de gases tiene su mayor aporte al impacto en la etapa de estabilización, principalmente por las emisiones directas que tiene el relleno. El aporte al impacto de la digestión anaeróbica varía según la categoría de impacto, pero en general la magnitud del impacto entre el procesamiento y postprocesamiento es similar. Para hacer competitivas a la digestión aeróbica, incineración y recuperación de gases se propone respectivamente, buscar tecnologías con menor demanda energética y realizar la operación en un reactor para poder tratar los gases emitidos, cambiar el lavado de gases por otras tecnologías para depurar el gas de combustión, y aumentar la eficiencia de recuperación de gases en los rellenos sanitarios.

El estudio no consideró dentro del límite del sistema la utilización energética para trasladar los flujos másicos de una etapa a otra debido a que es un valor que varía dependiendo de la disposición física de las operaciones unitarias en la planta. Sin embargo, es un factor que puede generar variaciones significantes en los resultados por la diferencia en el tamaño de las plantas, por ejemplo, los flujos en un relleno sanitario deben recorrer una distancia mayor a la incineración, y por el estado de agregación de los flujos másicos que deben transportar, por ejemplo, las digestiones biológicas deben trasladar productos sólidos y líquidos al postprocesamiento, y la incineración flujos gaseosos en su mayoría.

Se considera que los resultados son un indicador general del comportamiento de las alternativa en las cuatro categorías de impacto analizadas. Sin embargo, es necesario generara información más precisa para construir una política pública que incentive la valorización de menor impacto ambiental. Para ello se propone comparar diferentes tecnologías de procesamiento y postprocesamiento para cada alternativa. Así, la respuesta a la mejor alternativa de recuperación no necesariamente tiene que ser una forma de valorizar orgánicos, sino un conjunto de parámetros ideales que debe cumplir cada alternativa para disminuir el impacto en el medio ambiente. Además, se propone estudiar las categorías de impacto midpoint por separado para asignarle importancias de acuerdo al contexto ambiental y social.

# Bibliografía

- [1] ROCKSTRÖM, J. (2010). PLANETARY BOUNDARIES. SMIL, HARVESTING THE BIOSPHERE.
- [2] J.R. PETIT, J. JOUZEL. ET. AL. CLIMATE AND ATMOSPHERIC HISTORY OF THE PAST 420 000 YEARS FROM THE VOSTOK ICE CORE IN ANTARCTICA, NATURE 399 (3JUNE), PP 429-436, 1999.
- [3] ROCKSTRÖM, J., STEFFEN, W., NOONE, K., PERSSON, Å., CHAPIN III, F. S., LAMBIN, E., ... FOLEY, J. (2009). PLANETARY BOUNDARIES: EXPLORING THE SAFE OPERATING SPACE FOR HUMANITY. ECOLOGY AND SOCIETY, 14(2).
- [4] ALLAN, R. P., HAWKINS, E., BELLOUIN, N., COLLINS, B. (2021). IPCC, 2021: SUMMARY FOR POLICYMAKERS.
- [5] BASSO, L., CROTWELL, A., DOLMAN, H., GATTI, L. (2021). OMM, 2021: BOLETÍN DE LA OMM SOBRE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO.
- [6] MACARTHUR, E. (2013). TOWARDS THE CIRCULAR ECONOMY, ECONOMIC AND BUSINESS RATIONALE FOR AN ACCELERATED TRANSITION. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: COWES, UK, 21-34.
- [7] FUNDACIÓN ELLEN MACARTHUR. (2022). THE BIOLOGICAL CYCLE OF THE BUTTERFLY DIAGRAM. [EN LINEA] <[HTTPS://ELLENMACARTHURFOUNDATION.ORG/ARTICLES/THE-BIOLOGICAL-CYCLE-OF-THE-BUTTERFLY-DIAGRAM](https://ellenmacarthurfoundation.org/articles/the-biological-cycle-of-the-butterfly-diagram)> [CONSLUTA: 23 DE MAYO DEL 2022]
- [8] ZHONGMING, Z., WEI, L. (2021). UNEP FOOD WASTE INDEX REPORT 2021.
- [9] TROPEA, A. (2022). FOOD WASTE VALORIZATION. FERMENTATION, 8(4), 168.
- [10] TEIGISEROVA, D. A., HAMELIN, L., THOMSEN, M. (2020). TOWARDS TRANSPARENT VALORIZATION OF FOOD SURPLUS, WASTE AND LOSS: CLARIFYING DEFINITIONS, FOOD WASTE HIERARCHY, AND ROLE IN THE CIRCULAR ECONOMY. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, 706, 136033.
- [11] GUSTAFSSON, J., CEDERBERG, C., SONESSON, U., EMANUELSSON, A. (2013). THE METHODOLOGY OF THE FAO STUDY: GLOBAL FOOD LOSSES AND FOOD WASTE-EXTENT, CAUSES AND PREVENTION"-FAO, 2011.
- [12] CHILE. MINISTERIO DEL INTERIOR. 1988. LEY N°18.695: LEY ORGÁNICA CONSTITUCIONAL DE MUNICIPALIDADES, MARZO 1988.
- [13] CHILE. MINISTERIO DE SALUD, SUBSECRETARÍA DE SALUD PÚBLICA. 2005. DE-

CRETO N°189: APRUEBA REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES SANITARIAS Y DE SEGURIDAD BÁSICAS EN LOS RELLENOS SANITARIOS, AGOSTO 2005.

- [14] CHILE. MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA, SUBSECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA. 2009. DECRETO N°4: REGLAMENTO PARA EL MANEJO DE LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDASS, ENERO 2009.
- [15] SUBSECRETARÍA DE DESARROLLO REGIONAL Y ADMINISTRATIVO. 2018. MARCO NORMATIVO E INSTITUCIONAL APLICADO AL SECTOR DE RESIDUOS SÓLIDOS EN CHILE, INFORME 1, DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN POR COMUNA Y POR REGIÓN EN MATERIA DE RSD Y ASIMILABLES.
- [16] CHILE. MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2016. LEY N°20.920: ESTABLECE MARCO PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS, LA RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR Y FOMENTO AL RECICLAJE, JUNIO 2016.
- [17] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2020. ESTRATEGIA NACIONAL DE RESIDUOS ORGÁNICOS CHILE 2040.
- [18] ADMINISTRATIVO, S. D. D. R. Y. (2018). DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN POR COMUNA Y POR REGIÓN EN MATERIA DE RSD Y ASIMILABLES.
- [19] SEREMI DEL MEDIO AMBIENTE DE LA REGIÓN METROPOLITANA. 2018. INFORME RELLENOS SANITARIOS - RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA RM - 2017. 21.
- [20] GONZÁLEZ, P., RIVEROS, S., CONCHA, S., CASAS, Y. (2018). WASTE-TO-ENERGY OPTIONS WITHIN A CIRCULAR ECONOMY STRATEGY IN A DEVELOPING COUNTRY: THE CASE OF THE BIO BIO REGION IN CHILE. INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY PRODUCTION AND MANAGEMENT. 2018. VOL. 3. ISS. 2, 3(2), 144-156.
- [21] FISGATIVA, H., TREMIER, A., DABERT, P. (2016). CHARACTERIZING THE VARIABILITY OF FOOD WASTE QUALITY: A NEED FOR EFFICIENT VALORISATION THROUGH ANAEROBIC DIGESTION. WASTE MANAGEMENT, 50, 264-274.
- [22] HAUSCHILD, M. Z., ROSENBAUM, R. K., OLSEN, S. I. (2018). LIFE CYCLE ASSESSMENT (VOL. 2018). SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING, CHAM. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/978-3-319-56475-3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3).
- [23] KLÖPFFER, W. (1997). LIFE CYCLE ASSESSMENT. ENVIRONMENTAL SCIENCE AND POLLUTION RESEARCH, 4(4), 223-228.
- [24] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (2006). GESTIÓN AMBIENTAL – ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA – PRINCIPIOS Y MARCO DE REFERENCIA (ISO 14040:2006). <[HTTPS://WWW.ISO.ORG/OBP/UI#ISO:STD:ISO:14040:ED-2:V1:ES](https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es)>
- [25] ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN. (2006). GESTIÓN AMBIENTAL – ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA – REQUISITOS Y DIRECTRICES (ISO 14044:2006). <[HTTPS://WWW.ISO.ORG/OBP/UI#ISO:STD:ISO:14044:ED-1:V1:ES](https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es)>
- [26] MINISTERIO DEL MEDIOAMBIENTE DE CHILE. (2011). MANUAL DEL BIOGÁS

<[HTTPS://WWW.ENERGIA.GOB.CL/SITES/DEFAULT/FILES/DOCUMENTOS/MANUAL\\_DE\\_BIOGAS.PDF](https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/manual_de_biogas.pdf)>

- [27] CHENG, J. (ED.2). (2017). BIOMASS TO RENEWABLE ENERGY PROCESSES. CRC PRESS.
- [28] VENKITESHWARAN, K., BOCHER, B., MAKI, J., ZITOMER, D. (2015). RELATING ANAEROBIC DIGESTION MICROBIAL COMMUNITY AND PROCESS FUNCTION: SUPPLEMENTARY ISSUE: WATER MICROBIOLOGY. MICROBIOLOGY INSIGHTS, 8, MBI-S33593.
- [29] CORRALES, L. C., ANTOLINEZ ROMERO, D. M., BOHÓRQUEZ MACÍAS, J. A., CORRADOR VARGAS, A. M. (2015). BACTERIAS ANAEROBIAS: PROCESOS QUE REALIZAN Y CONTRIBUYEN A LA SOSTENIBILIDAD DE LA VIDA EN EL PLANETA. NOVA, 13(24), 55-81.
- [30] MANDUJANO, P. (2001) DIGESTIÓN ANERÓBIA DE SÓLIDOS EN ALTA CONCENTRACIÓN. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID.
- [31] JAIN, S., JAIN, S., WOLF, I. T., LEE, J., TONG, Y. W. (2015). A COMPREHENSIVE REVIEW ON OPERATING PARAMETERS AND DIFFERENT PRETREATMENT METHODOLOGIES FOR ANAEROBIC DIGESTION OF MUNICIPAL SOLID WASTE. RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS, 52, 142-154.
- [32] ANGELONIDI, E. A.(2015). A COMPARISON OF WET AND DRY ANAEROBIC DIGESTION PROCESSES FOR THE TREATMENT OF MUNICIPAL SOLID WASTE AND FOOD WASTE. WATER AND ENVIRONMENT JOURNAL, 549-557.
- [33] KRATKY, L., JIROUT, T. (2011). BIOMASS SIZE REDUCTION MACHINES FOR ENHANCING BIOGAS PRODUCTION. CHEMICAL ENGINEERING TECHNOLOGY, 34(3), 391-399.
- [34] WELLINGER, A., MURPHY, J. P., BAXTER, D. (EDS.). (2013). THE BIOGAS HANDBOOK: SCIENCE, PRODUCTION AND APPLICATIONS. ELSEVIER.
- [35] RATHNASIRI, P. G. (2016). DYNAMIC MODELLING AND SIMULATION OF PILOT SCALE ANAEROBIC DIGESTION PLANT TREATING SOURCE SEPARATED FOOD WASTE AND EFFECT OF RECYCLING SLUDGE. PROCEA ENVIRONMENTAL SCIENCES, 35, 740-748.
- [36] CHENG, J. (ED.2). (2017). BIOMASS TO RENEWABLE ENERGY PROCESSES. CRC PRESS.
- [37] CHANDLER, A. J., EIGHMY, T. T., HJELMAR, O., KOSSON, D. S., SAWELL, S. E., VEHLow, J., ... HARTLÉN, J. (1997). MUNICIPAL SOLID WASTE INCINERATOR RESIDUES. ELSEVIER.
- [38] WILLIAMS, A., JONES, J. M., MA, L., POURKASHANIAN, M. (2012). POLLUTANTS FROM THE COMBUSTION OF SOLID BIOMASS FUELS. PROGRESS IN ENERGY AND COMBUSTION SCIENCE, 38(2), 113-137.
- [39] ELKHALIFA, S., AL-ANSARI, T., MACKAY, H. R., MCKAY, G. (2019). FOOD WASTE TO BIOCHARS THROUGH PYROLYSIS: A REVIEW. RESOURCES, CONSERVATION AND RECYCLING, 144, 310-320.
- [40] SARC, R., LORBER, K. E. (2013). PRODUCTION, QUALITY AND QUALITY ASSURAN-

- CE OF REFUSE DERIVED FUELS (RDFs). WASTE MANAGEMENT, 33(9), 1825-1834.
- [41] ZAMLI, A. F., MAHMOOD, W. W., GHOPA, W. A. W., LIM, M. T. (2021). THE RESEARCH ON FOOD WASTE PRE-TREATMENT TECHNOLOGY FOR INCINERATION IN MALAYSIA. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL TREATMENT TECHNIQUES, 9(1), 139-147.
- [42] KHALLAF, M. (ED.). (2011). THE IMPACT OF AIR POLLUTION ON HEALTH, ECONOMY, ENVIRONMENT AND AGRICULTURAL SOURCES. BoD—BOOKS ON DEMAND.
- [43] CHENG, J. (ED.2). (2017). BIOMASS TO RENEWABLE ENERGY PROCESSES. CRC PRESS.
- [44] HAUG, R. T. (2018). THE PRACTICAL HANDBOOK OF COMPOST ENGINEERING. ROUTLEDGE.
- [45] FRIMMEL, F. H., ABBT-BRAUN, G., HEUMANN, K. G., HOCK, B., LÜDEMANN, H. D., SPITELLER, M. (EDS.). (2008). REFRACTORY ORGANIC SUBSTANCES IN THE ENVIRONMENT. JOHN WILEY SONS.
- [46] COOPERBAND, L. (2002). THE ART AND SCIENCE OF COMPOSTING. CENTER FOR INTEGRATED AGRICULTURAL SYSTEMS.
- [47] CHEN, L., DE HARO MARTI, M., MOORE, A., FALEN, C. (2011). THE COMPOSTING PROCESS. DAIRY MANURE COMPOST PRODUCTION AND USE IN IDAHO, 2, 513-532.
- [48] TOWNSEND, T. G., POWELL, J., JAIN, P., XU, Q., TOLAYMAT, T., REINHART, D. (2015). SUSTAINABLE PRACTICES FOR LANDFILL DESIGN AND OPERATION. SPRINGER.
- [49] LÓPEZ ARRIAZA, D. (2016). MODELO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS PRODUCIDO EN RELLENOS SANITARIOS.
- [50] RAJARAM, V., SIDDIQUI, F. Z., KHAN, M. E. (2011). FROM LANDFILL GAS TO ENERGY: TECHNOLOGIES AND CHALLENGES. CRC PRESS.
- [51] RENOU, S., GIVAUDAN, J. G., POULAIN, S., DIRASSOUYAN, F., MOULIN, P. (2008). LANDFILL LEACHATE TREATMENT: REVIEW AND OPPORTUNITY. JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS, 150(3), 468-493.
- [52] IPCC, (2013): CLIMATE CHANGE 2013: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS. CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE FIFTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [STOCKER, T. F., D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S. K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX AND P. M. MIDGLEY (EDS.)]. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, CAMBRIDGE, UNITED KINGDOM AND NEW YORK, NY, USA, 1535 PP.
- [53] HUIJBREGTS, M. A., STEINMANN, Z. J., ELSHOUT, P. M., STAM, G., VERONES, F., VIEIRA, M. D. M., ... VAN ZELM, R. (2016). ReCiPe 2016: A HARMONIZED LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT METHOD AT MIDPOINT AND ENDPOINT LEVEL REPORT I: CHARACTERIZATION.
- [54] FEIZ, R., AMMENBERG, J., BJÖRN, A., GUO, Y., KARLSSON, M., LIU, Y., ... ZHANG, F. (2019). BIOGAS POTENTIAL FOR IMPROVED SUSTAINABILITY IN GUANGZHOU, CHINA—A STUDY FOCUSING ON FOOD WASTE ON XIAOGUWEI ISLAND.

- SUSTAINABILITY, 11(6), 1556.
- [55] NAVEA OPAZO, S. (2019).EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COINCINERACIÓN DE LODOS DE PTAS Y OTROS RESIDUOS PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA. DISPONIBLE EN [HTTPS://REPOSITORIO.UCHILE.CL/HANDLE/2250/170224](https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170224)
- [56] CHILE. MINISTERIO DE TRANSPORTE Y TELECOMUNICACIONES. 2012. DECRETO N°55: ESTABLECE NORMAS DE EMISION APLICABLES A VEHICULOS MOTORIZADOS PESADOS, MAYO 2012.
- [57] REHL, T., MÜLLER, J. (2011). LIFE CYCLE ASSESSMENT OF BIOGAS DIGESTATE PROCESSING TECHNOLOGIES. RESOURCES, CONSERVATION AND RECYCLING, 56(1), 92-104.
- [58] SAER, A., LANSING, S., DAVITT, N. H., GRAVES, R. E. (2013). LIFE CYCLE ASSESSMENT OF A FOOD WASTE COMPOSTING SYSTEM: ENVIRONMENTAL IMPACT HOTSPOTS. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 52, 234-244.
- [59] NAVEA OPAZO, S. (2019).EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COINCINERACIÓN DE LODOS DE PTAS Y OTROS RESIDUOS PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA. DISPONIBLE EN [HTTPS://REPOSITORIO.UCHILE.CL/HANDLE/2250/170224](https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170224)
- [60] BRODRICK, C. J., DWYER, H. A., FARSHCHI, M., HARRIS, D. B., KING JR, F. G. (2002). EFFECTS OF ENGINE SPEED AND ACCESSORY LOAD ON IDLING EMISSIONS FROM HEAVY-DUTY DIESEL TRUCK ENGINES. JOURNAL OF THE AIR WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, 52(9), 1026-1031.
- [61] MIRANDA PÉREZ, J. (2018).DISEÑO A ESCALA LOCAL: EQUIPO DOMICILIARIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS. DISPONIBLE EN [HTTPS://REPOSITORIO.UCHILE.CL/HANDLE/2250/159533](https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/159533)
- [62] BRIŠKI, F., VUKOVIĆ, M., PAPA, K., GOMZI, Z., DOMANOVAC, T. (2007). MODELLING OF COMPOSTING OF FOOD WASTE IN A COLUMN REACTOR. CHEMICAL PAPERS, 61(1), 24-29.
- [63] FATTA, D., PAPADOPOULOS, A., LOIZIDOU, M. (1999). A STUDY ON THE LANDFILL LEACHATE AND ITS IMPACT ON THE GROUNDWATER QUALITY OF THE GREATER AREA. ENVIRONMENTAL GEOCHEMISTRY AND HEALTH, 21(2), 175-190.
- [64] FRASCARI, D., BRONZINI, F., GIORDANO, G., TEDIOLI, G., NOCENTINI, M. (2004). LONG-TERM CHARACTERIZATION, LAGOON TREATMENT AND MIGRATION POTENTIAL OF LANDFILL LEACHATE: A CASE STUDY IN AN ACTIVE ITALIAN LANDFILL. CHEMOSPHERE, 54(3), 335-343.
- [65] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2006) IPCC GUIDELINES FOR NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES, IGES JAPAN.
- [66] GARCÉS CANCINO, C. (2016).EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD DEL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DE UN RELLENO SANITARIO UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR TÉRMICA. DISPONIBLE EN [HTTPS://REPOSITORIO.UCHILE.CL/HANDLE/2250/144105](https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144105)
- [67] RENOU, S., GIVAUDAN, J. G., POULAIN, S., DIRASSOUYAN, F., MOULIN, P. (2008). LANDFILL LEACHATE TREATMENT: REVIEW AND OPPORTUNITY. JOURNAL OF HAZAR-

DOUS MATERIALS, 150(3), 468-493.

- [68] PALANIVEL, T. M., SULAIMAN, H. (2014). GENERATION AND COMPOSITION OF MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW) IN MUSCAT, SULTANATE OF OMAN. APCBEE PROCEEDIA, 10, 96-102.
- [69] DREPAUL, R. K., ELAHEE, K. (2018, SEPTEMBER). BARRIERS TO THE USE OF LOW GWP REFRIGERANTS IN THE REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING SECTOR IN MAURITIUS. IN 2018 5TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENT FRIENDLY ENERGIES AND APPLICATIONS (EFEA) (PP. 1-6). IEEE.
- [70] JO, G., KALANTARIFARD, A., JANG, J., BYEON, E., YANG, G. (2015). THE EFFECTS OF MALODOROUS SUBSTANCES FROM MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW) TO CLIMATE-CHANGE AS GREENHOUSE-GAS: CALCULATING GWP OF HYDROGEN SULFIDE. IN PROCEEDINGS OF THE ANNUAL CONFERENCE OF JAPAN SOCIETY OF MATERIAL CYCLES AND WASTE MANAGEMENT THE 26TH ANNUAL CONFERENCE OF JAPAN SOCIETY OF MATERIAL CYCLES AND WASTE MANAGEMENT (P. 547). JAPAN SOCIETY OF MATERIAL CYCLES AND WASTE MANAGEMENT.
- [71] GACÍA, N, (2021). CARBONO NEUTRALIDAD EN EL SECTOR ENERGÉTICO DE CHILE. BIBLIOTECA DEL CONGRESO NACIONAL DE CHILE.

# Anexos

## Anexo A. Abreviaturas

En el siguiente anexo se muestra el significado de las abreviaturas utilizadas en el estudio.

- ACV: Análisis de ciclo de vida.
- AR: Agotamiento de recursos.
- CE: Calidad del ecosistema.
- COV: Compuesto orgánico volátil.
- DA: Digestión aeróbica.
- DAn: Digestión anaeróbica.
- E°A: Estado de agregación.
- EE: Energía eléctrica.
- ET: Energía térmica.
- FR: Flujo de referencia.
- GLO: Global.
- I: Inertes.
- In: Incineración.
- IPCC: Panel Intergubernamental del Cambio Climático (por sus siglas en inglés).
- PCG: Potencial de calentamiento global.
- PSA: Adsorción por oscilación de presión (pressure swing adsorption, por sus siglas en inglés).
- RdM: Resto del mundo.
- RG: Recuperación de gases desde rellenos sanitarios.

- ROD: Residuo orgánico domiciliario.
- RSM: Residuo orgánico municipal, equivalente al residuo sólido domiciliario.
- SH: Salud humana.
- SNV Sólidos no volátiles.
- SV: Sólidos volátiles.
- W: Agua.

## Anexo B. Glosario

El siguiente anexo muestra las definiciones de los principales términos utilizados en el texto.

- Proceso foreground: Etapas del ciclo de vida que están involucradas exclusivamente en el proceso en el que está involucrado el flujo de referencia. Por ejemplo, en la alternativa de recuperación de gases desde rellenos sanitarios el flujo de lixiviado es tratado en una PTAS, donde además se tratan efluentes de otras fuentes.
- Proceso background: Etapas del ciclo de vida que no conforman parte exclusiva del proceso en el que está involucrado el flujo de referencia. Por ejemplo, la etapa de molienda en la alternativa de digestión anaeróbica está dedicada exclusivamente a acondicionar el flujo que entra al digestor donde se lleva a cabo la degradación de orgánicos.
- Categoría de impacto midpoint: Clasificación de los flujos elementales del inventario según un efecto ambiental común. La clasificación apunta al efecto primero del impacto ambiental. Por ejemplo, cambio climático, formación de material particulado, uso de agua, etc.
- Categoría de impacto endpoint: Clasificación de categoría de impacto midpoint según una misma "Área de protección". La clasificación apunta al efecto último del impacto ambiental. Por ejemplo, salud humana o agotamiento de recursos.
- Factor de emisión: indicador que muestra la carga de una actividad para una cierta categoría de impacto. El factor de emisión es un indicador construido en base a factores de caracterización.
- Factor de caracterización: indicador que muestra la carga de un flujo elemental para cierta categoría de impacto.
- Mantenición: La acción de solucionar el problema de un bien o servicio con el fin de alargar su vida útil.
- Reutilización: La acción de utilizar un bien con el mismo propósito para el que fue creado.

- Remanufacturación: La acción de desensamblar un bien con el fin de utilizar las partes que lo componen nuevamente.
- Reciclaje: La acción de recuperar las materias que conforman un bien para ser reutilizadas en la producción del mismo bien o uno diferente, excluyendo la recuperación energética.

## Anexo C. Caracterización del flujo de ROD de acuerdo a otras clasificaciones

La siguiente caracterización del flujo de ROD fue extraído del estudio realizado por FISGATIVA ET AL. (2016). Entre la tabla 7.1 y la tabla 7.3 se observan los diferentes parámetros analizados, el valor promedio del parámetro, y su respectiva desviación estándar.

Tabla 7.1: Características fisicoquímicas de los ROD's

<i>Parámetro</i>	<i>Valor Promedio</i>	<i>Desviación estandar</i>
<i>pH</i>	<i>5,1</i>	<i>0,7</i>
<i>MS [%mm]</i>	<i>22,8</i>	<i>10</i>
<i>SV [%MS]</i>	<i>88</i>	<i>8</i>
<i>DQO [g/kg]</i>	<i>189</i>	<i>89</i>
<i>DQOs [g/kg]</i>	<i>99</i>	<i>157</i>
<i>PBM [mLCH<sub>4</sub>/g SV]</i>	<i>460</i>	<i>88</i>

Tabla 7.2: Elementos nutricionales presente en los ROD's

<i>Parámetro</i>	<i>Valor Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>
<i>NTK [g/kg MS]</i>	<i>16</i>	<i>12</i>
<i>NAT [mg/L]</i>	<i>731</i>	<i>958</i>
<i>Ca [%MS]</i>	<i>1,6</i>	<i>8</i>
<i>K [%MS]</i>	<i>1,2</i>	<i>89</i>
<i>Mg [%MS]</i>	<i>0,2</i>	<i>157</i>
<i>Na [%MS]</i>	<i>2,2</i>	<i>88</i>
<i>P [%MS]</i>	<i>0,5</i>	<i>0,3</i>
<i>Fe [ppm MS]</i>	<i>482</i>	<i>815</i>
<i>Mn [ppm MS]</i>	<i>62</i>	<i>48</i>
<i>Mo [ppm MS]</i>	<i>1,2</i>	<i>1,1</i>
<i>Zn [ppm MS]</i>	<i>87</i>	<i>110</i>

Tabla 7.3: Metales pesados presentes en los ROD's

<i>Parámetro</i>	<i>Valor Promedio</i>	<i>Desviación estándar</i>
<i>Cd [ppm MS]</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>
<i>Cr [ppm MS]</i>	<i>28</i>	<i>71</i>
<i>Cu [ppm MS]</i>	<i>23</i>	<i>37</i>
<i>Hg [ppm MS]</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>
<i>Ni [ppm MS]</i>	<i>10</i>	<i>25</i>
<i>Pb [ppm MS]</i>	<i>18</i>	<i>46</i>

## Anexo D. Límite del sistema

A continuación se detalla el límite del sistema para cada alternativa por separado. En cada diagrama se explicita las operaciones unitarias involucradas en cada proceso y su relación con el límite del sistema, la tecnosfera y la biosfera. Además, se muestran los flujos elementales de cada proceso. Al final de esta sección se muestra la leyenda de los diagramas.

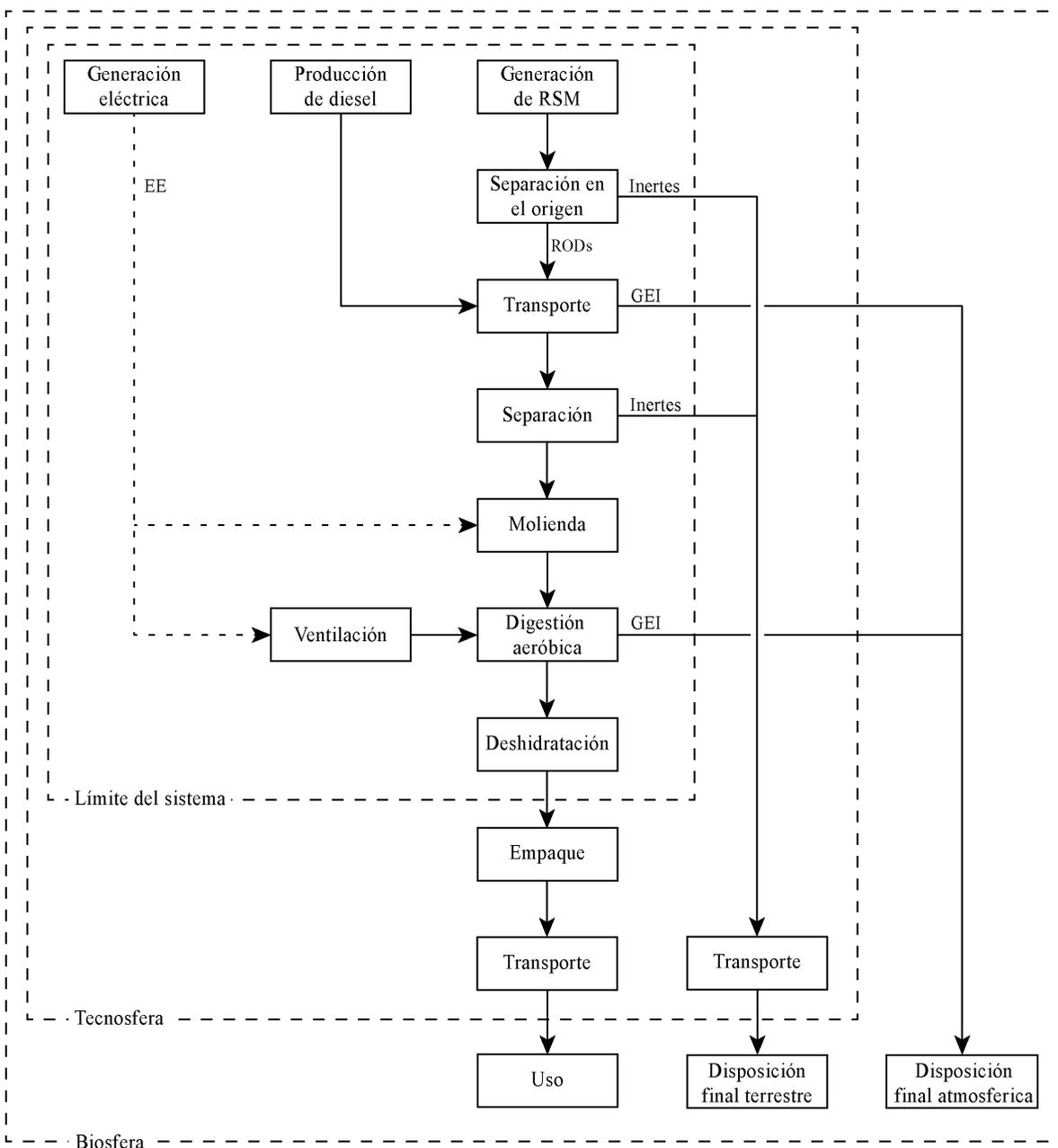


Figura 7.1: Límite del sistema del proceso de digestión aeróbica (EE: Energía eléctrica, GEI: Gases de efecto invernadero)

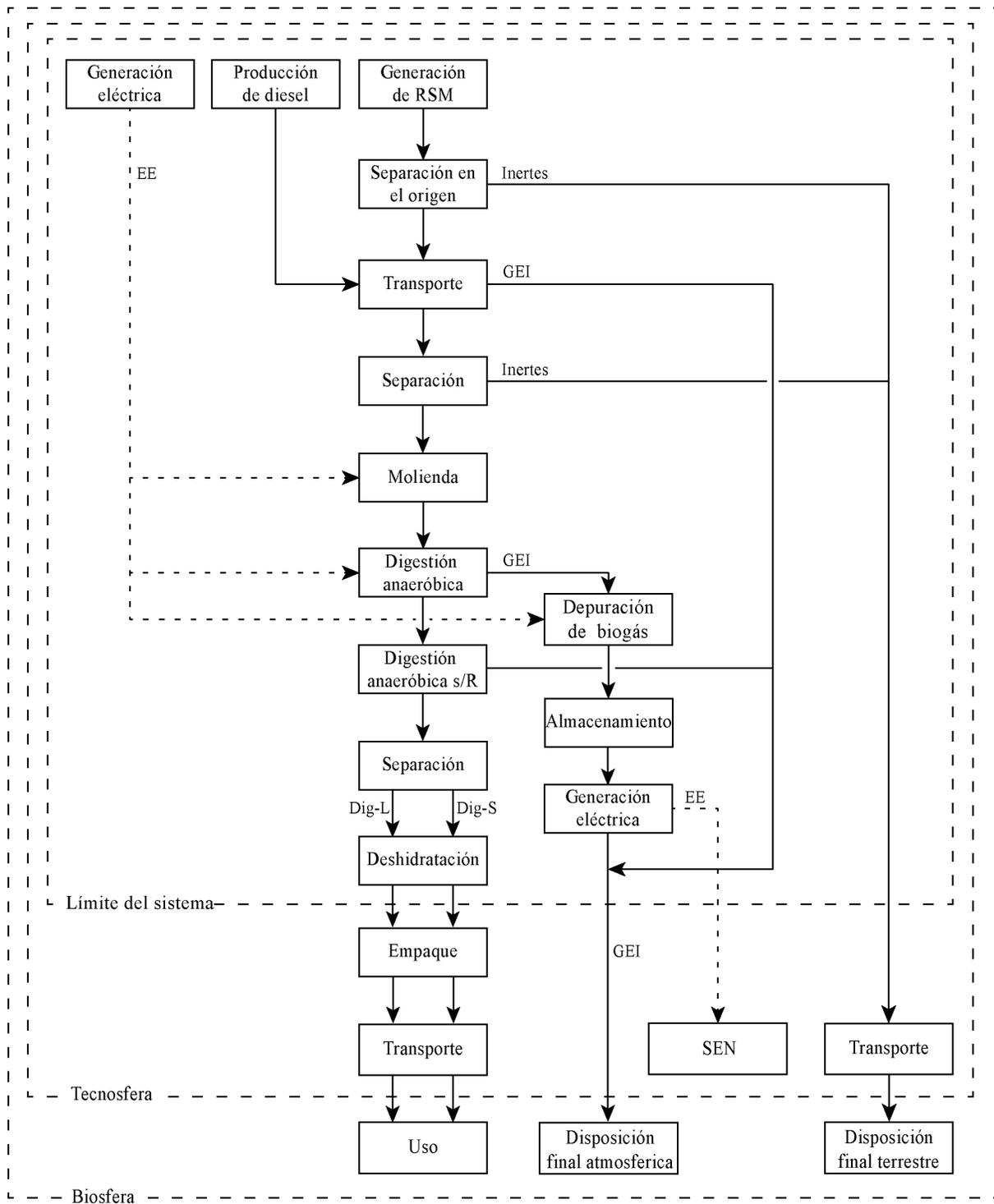


Figura 7.2: Límite del sistema del proceso de digestión anaeróbica (EE: Energía eléctrica, GEI: Gases de efecto invernadero, Dig-L: Digestato líquido, Dig-S: Digestato sólido, SEN: Sistema Eléctrico Nacional)

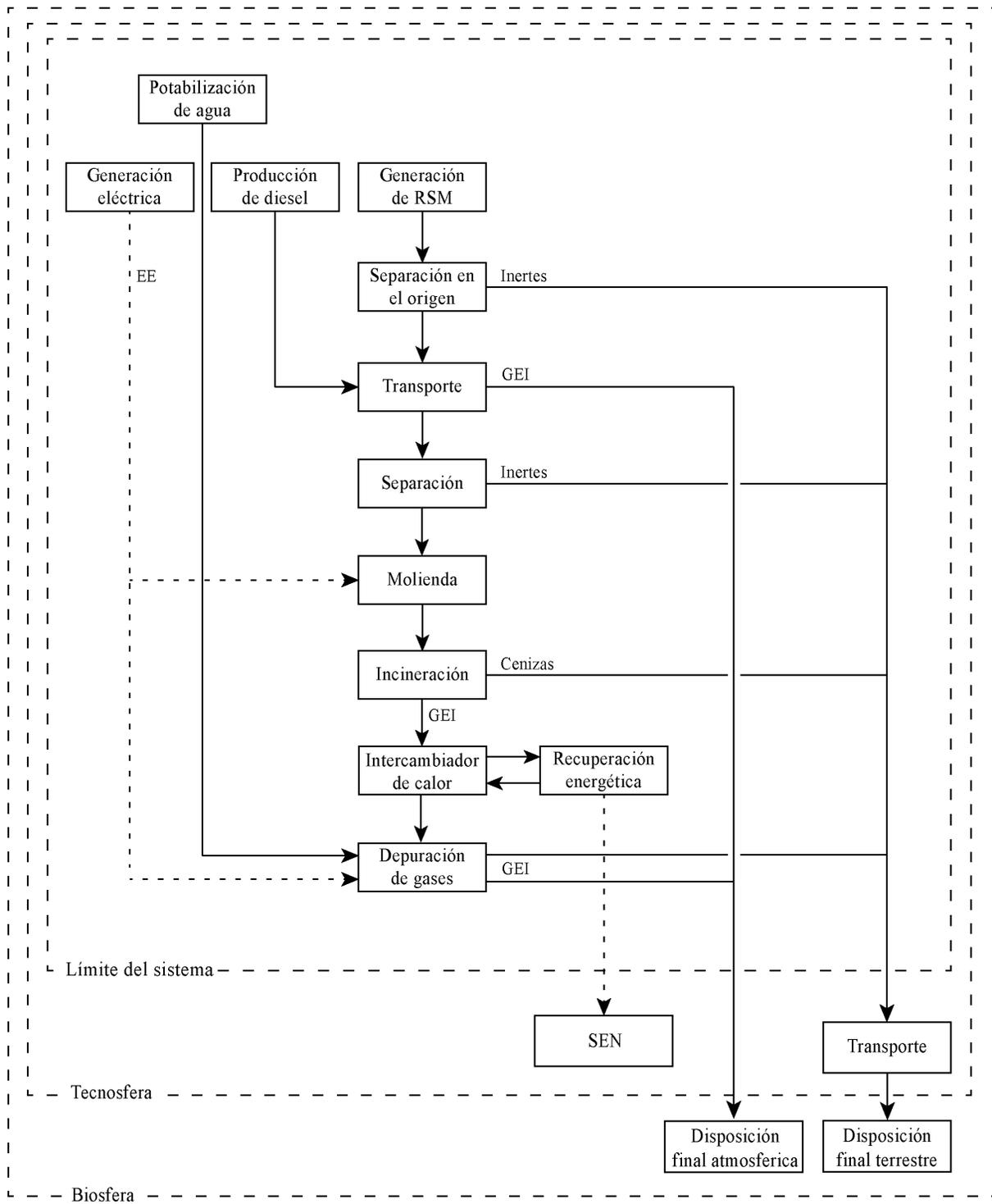


Figura 7.3: Límite del sistema del proceso de digestión anaeróbica (EE: Energía eléctrica, GEI: Gases de efecto invernadero, SEN: Sistema Eléctrico Nacional)

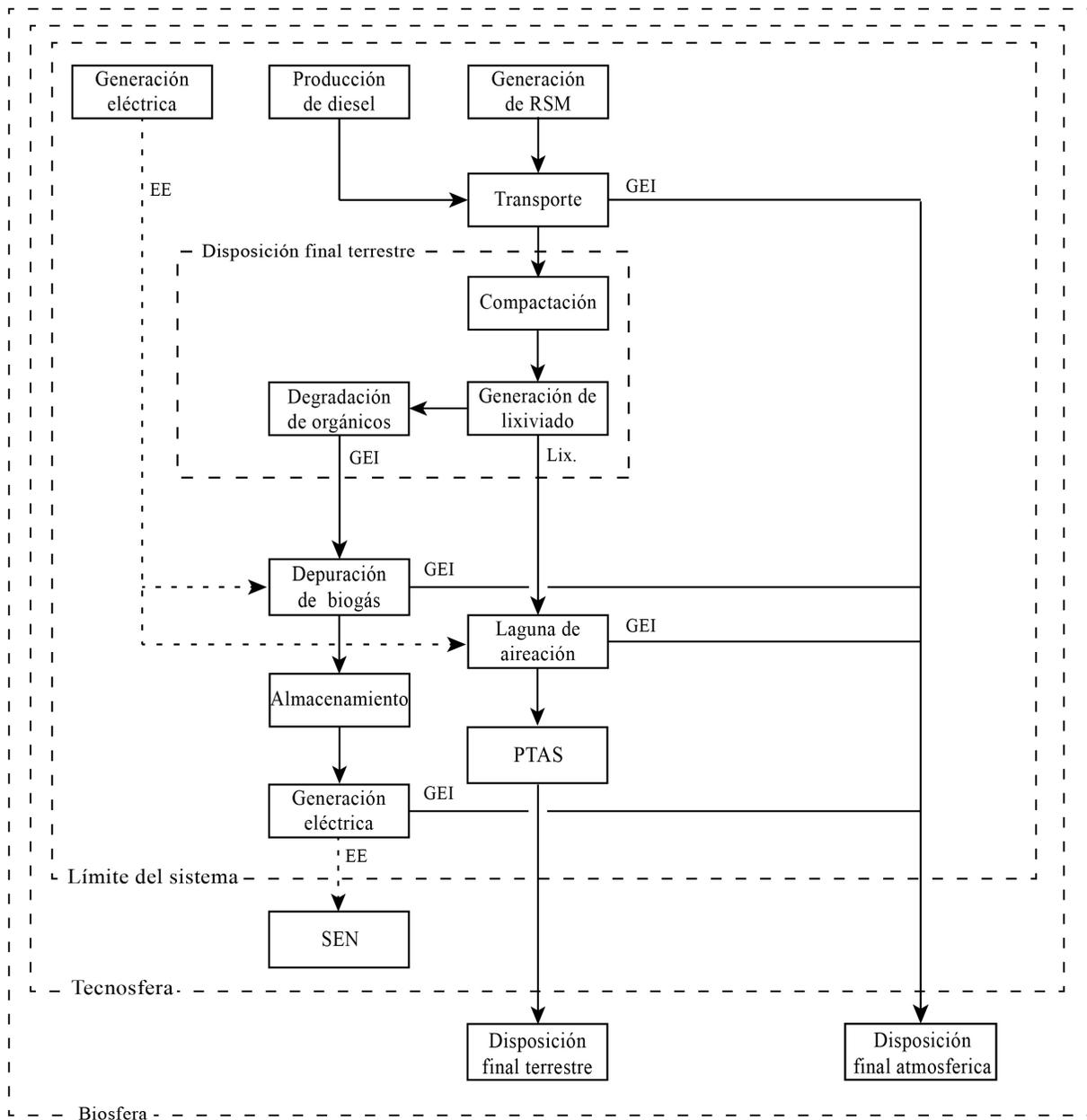


Figura 7.4: Límite del sistema del proceso de digestión anaeróbica (EE: Energía eléctrica, GEI: Gases de efecto invernadero, SEN: Sistema Eléctrico Nacional, PTAS: Plantas de tratamiento de aguas servidas)

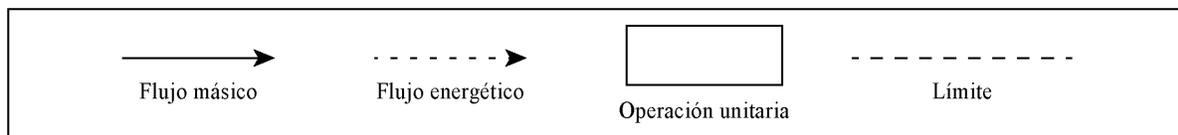


Figura 7.5: Leyenda de diagramas sobre el límite del sistema de las alternativas.

## Anexo E. Sustancias relevantes en categorías de impacto midpoint

A continuación se muestran las categorías midpoint asociadas a cada categoría endpoint y las sustancias que las afectan.

Tabla 7.4: Indicadores midpoint y sus sustancias relevantes.

Categoría endpoint	Categoría midpoint	Especie relevante
Calidad del ecosistema	Calentamiento global	GEI
	Uso de agua	Agua
	Ecotoxicidad de agua fresca	Especies tóxicas
	Eutofización de agua fresca	Especies con P y N (gas también)
	Formación de ozono troposférico	NOx, COV
	Ecotoxicidad terrestre	Especies tóxicas
	Acidificación terrestre	NOx, NH3, SO2 (principales)
	Uso de tierra	Superficie utilizada/transformada
Salud humana	Ecotoxicidad marina	Especies tóxicas
	Material particulado	1°)PM10um; 2°)SO2,NH3,NOx
	Formación de ozono troposférico	NOx, COV
	Radiación ionizante	Emisiones radiactivas
	Agotamiento de ozono estratosférico	Especies gaseosas con Cl y Br
	Toxicidad humana (cancerígeno)	Especies tóxicas
	Toxicidad humana (no cancerígeno)	Especies tóxicas
	Calentamiento global	GEI
Agotamiento de recursos	Uso de agua	Agua
	Agotamiento de recursos minerales	Miércoles
	Agotamiento de recursos fósiles	Combustibles fósiles

## Anexo F. Parámetros principales utilizados en la construcción del inventario

A continuación se muestran los principales parámetros utilizados en la construcción del inventario para las alternativas de digestión aeróbica (ver tabla 7.5), digestión anaeróbica (ver tabla 7.6), incineración (ver tabla 7.7) y recuperación de gases desde rellenos sanitarios (ver tabla 7.8).

Tabla 7.5: Principales parámetros utilizados en la construcción del inventario de digestión aeróbica. Elaboración propia.

Etapa	Definición de parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Generación de ROD's	Fracción de orgánicos en los RSM	0,55	-	[21]
	Distancia recorrida	15,7	km	Supuesto
Transporte	Rendimiento del camión recolector	6,5	km/l	[59]
	Emisión de CO2 por diesel consumido	40515	g/l	[60]
	Emisión de NO2 por diesel consumido	861	g/l	[60]
	Emisión de CO2 por diesel consumido	462	g/l	[60]
	Separación	Eficiencia de separación de inertes	0,98	-
Molienda	Indice de trabajo de bond para ROD	0,01	kWh/ton	[61]
	Degradabilidad (conversión)	0,82	-	[44]
	Humedad relativa en la entrada	0,64	-	<sup>a</sup>
	Humedad relativa en la salida	1	-	Supuesto
Degradación aeróbica	Formula molecular ROD	$C_{24}H_{44}O_{13}N$	-	Calculo
	Coefficiente estequiométrico O2	27,5	-	Calculo
	Coefficiente estequiométrico CO2	23,8	-	Calculo
	Coefficiente estequiométrico H2O	20,4	-	Calculo
	Coefficiente estequiométrico NH3	1	-	Calculo
Deshidratación	Humedad resultante	0,4	-	Supuesto

<sup>a</sup> Dato extraído de la página web de la Dirección Meteorológica de Chile [climatologia.meteochile.gob.cl](http://climatologia.meteochile.gob.cl)

Tabla 7.6: Principales parámetros utilizados en la construcción del inventario de digestión anaeróbica. Elaboración propia.

Etapa	Definición de parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Generación de ROD's	Fracción de orgánicos en los RSM	0,55	-	[21]
	Distancia recorrida	15,7	km	Supuesto
Transporte	Rendimiento del camión recolector	6,5	km/l	[59]
	Emisión de CO2 por diesel consumido	40515	g/l	[60]
	Emisión de NO2 por diesel consumido	861	g/l	[60]
	Emisión de CO2 por diesel consumido	462	g/l	[60]
Separación	Eficiencia de separación de inertes	0,98	-	Supuesto
Molienda	Indice de trabajo de bond para ROD	0,01	kWh/ton	[61]
	Degradabilidad (conversión)	0,82	-	[44]
Degradación anaeróbica	Humedad relativa en la salida	1	-	Supuesto
	Formula molecular ROD	$C_{272}H_{502}O_{150}N_{13}S$	-	Calculo
	Coefficiente estequiométrico CO2	116	-	Calculo
	Coefficiente estequiométrico CH4	157	-	Calculo
	Coefficiente estequiométrico H2O	83	-	Calculo
	Coefficiente estequiométrico NH3	13	-	Calculo
	Coefficiente estequiométrico H2S	1	-	Calculo
	Demanda energética promedio	87	kWh/ton	[62]
Separación sólido-líquido	Fracción másica de la fase líquida c/r a la entrada	0,9	-	[34]
	Fracción másica de la fase sólida c/r a la entrada	0,1	-	[34]
	Fracción másica de sólidos en la fase líquida	0,51	-	[34]
	Fracción másica de sólidos en la fase sólida	0,49	-	[34]
	Deshidratación digestato-sólido	Humedad resultante	0,4	-
Concentración digestato-líquido	Fracción de sólidos totales en la fase concentrada	0,1	-	[34]

Tabla 7.7: Principales parámetros utilizados en la construcción del inventario de incineración. Elaboración propia.

Etapa	Definición de parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Generación de ROD's	Fracción de orgánicos en los RSM	0,55	-	[21]
	Distancia recorrida	15,7	km	Supuesto
Transporte	Rendimiento del camión recolector	6,5	km/l	[59]
	Emisión de CO2 por diesel consumido	40515	g/l	[60]
	Emisión de NO2 por diesel consumido	861	g/l	[60]
	Emisión de CO2 por diesel consumido	462	g/l	[60]
Separación	Eficiencia de separación de inertes	0,98	-	Supuesto
Molienda	Indice de trabajo de bond para ROD	0,01	kWh/ton	[59]
Incineración	Fracción de cenizas pesadas	0,8	-	[55]
	Alimentación en exceso de O2	3,03	kgO2/kgO2	[55]
	Consumo de O2	0,85	kgO2/kgSV	[55]
	Fracción másica de W en los reactantes	0,13	-	[55]
	Fracción másica de CO2 en los reactantes	0,55	-	[55]
	Fracción másica de C2H4 en los reactantes	0,12	-	[55]
	Fracción másica de SO2 en los reactantes	0,02	-	[55]
	Fracción másica de N2O en los reactantes	0,17	-	[55]
Precaentador	-	-	-	-
Recuperación energética	Alimentación de agua por alimentación de gases	0,16	kgW/kg	[55]
	Tasa de generación eléctrica por RODs alimentados	0,1	kWh/kg	[34]
Recalentador	-	-	-	-
Depuración de gases de combustión	Fracción másica de SO2 removida	0,95	-	[55]
	Fracción másica de N2O removida	0,99	-	[55]
	Fracción másica de Ceniza removida	0,99	-	[55]
	Alimentación de agua	3,3	l/m3	[55]
	Demanda energética	0,22	kWh/Nm3	[34]

Tabla 7.8: Principales parámetros utilizados en la construcción del inventario de recuperación de gases desde rellenos sanitarios. Elaboración propia.

Etapa	Definición de parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Generación de ROD's	Fracción de orgánicos en los RSM	0,55	-	[?]
	Distancia recorrida	15,7	km	Supuesto
Transporte	Rendimiento del camión recolector	6,5	km/l	c[59]
	Emisión de CO2 por diesel consumido	40515	g/l	[60]
	Emisión de NO2 por diesel consumido	861	g/l	[60]
	Emisión de CO2 por diesel consumido	462	g/l	[60]
Compactación	-	-	-	-
Estabilización (Lixiviación/Degradación)	Flujo másico de precipitaciones permeadas en el relleno	0,144	kgW/kgRSM	Calculo
	Flujo másico de agua evaporada	0,08	kgW/kgRSM	[63]
	Flujo másico de agua por humedad de ROD	0,017	kgW/kgRSM	[64]
	Recuperación de biogás	0,2	-	[65]
	Fracción volumétrica de metano en biogás	0,4	-	[50]
Aireación de lixiviados	Concentración de SV en lixiviado	0,004	kgSV/kglix	[67]
	Conversión de sólidos orgánicos	0,88	-	[66]
Depuración de biogás	Fracción removida de CH4	0,94	-	[30]
	Fracción removida de NH3	0,5	-	[34]
	Fracción removida de H2S	0,001	-	[34]
	Fracción removida de H2O	0,99	-	[34]
	Fracción de metano en el biometano	0,97	-	[34]
	Demanda energética	0,19	kWh/Nm3	Calculo
Almacenamiento	-	-	-	-
Recuperación energética	Valor calorífico bajo del biometano a 97 %	10,14	kWh/nNm3	[34]
	Eficiencia eléctrica dela unidad recuperadora	0,35	-	[34]
	Eficiencia térmica dela unidad recuperadora	0,45	-	[34]

## Anexo G. Estimación de factores de emisión que dependen de la capacidad del proceso

EL siguiente anexo muestra el procedimiento que se realizó para estimar los factores de emisión para procesos que varían según su capacidad.

## G.1. Plantas de co-generación energética, alternativa de digestión anaeróbica

La actividad representativa seleccionada para utilizar sus factores de emisión en las etapas de co-generación energética para el proceso de digestión anaeróbica fue "Co-generación de energía eléctrica y térmica, gas natural, 1MW energía eléctrica, mezcla pobre", extraída de la base de datos de Ecoinvent; sin embargo, de acuerdo con el balance de masa y energía el flujo energético eléctrico generado por la etapa de recuperación energética corresponde a 3,6 [MW]. Ecoinvent ofrece los factores de emisión para plantas de co-generación con con cuatro capacidades diferentes: 1[MW], 0,5[MW], 0,2[MW] y 0,05[MW]. Por lo tanto, para obtener los factores de emisión se realizó una regresión potencial para determinar una función que relacione la capacidad de la planta con los factores de emisión para las diferentes categorías de impacto. Vale destacar que la función obtenida es una aproximación al comportamiento real del factor de emisión en función de la capacidad de la planta.

### G.1.1. Recuperación térmica

Los factores de emisión para las cuatro categorías de impacto analizadas según las capacidades propuestas por la base de datos se muestran en la tabla 7.9.

Tabla 7.9: Factores de emisión de PCG, CE, SH y AR para recuperación térmica en plantas de co-generación energética

Capacidad eléctrica de la planta [MW]	1	0,5	0,2	0,05
Potencial de calentamiento global [kgCO <sub>2</sub> eq]	0,02800	0,02919	0,03061	0,03194
Calidad del ecosistema [puntos]	0,00051	0,00053	0,00056	0,00058
Salud humana [puntos]	0,00088	0,00092	0,00097	0,00101
Agotamiento de recursos [puntos]	0,00128	0,00133	0,00140	0,00146

A continuación se muestran los gráficos con los datos presentados en la tabla 7.9 y la función que representa la aproximación del comportamiento de los datos calculada a través de la regresión potencial.

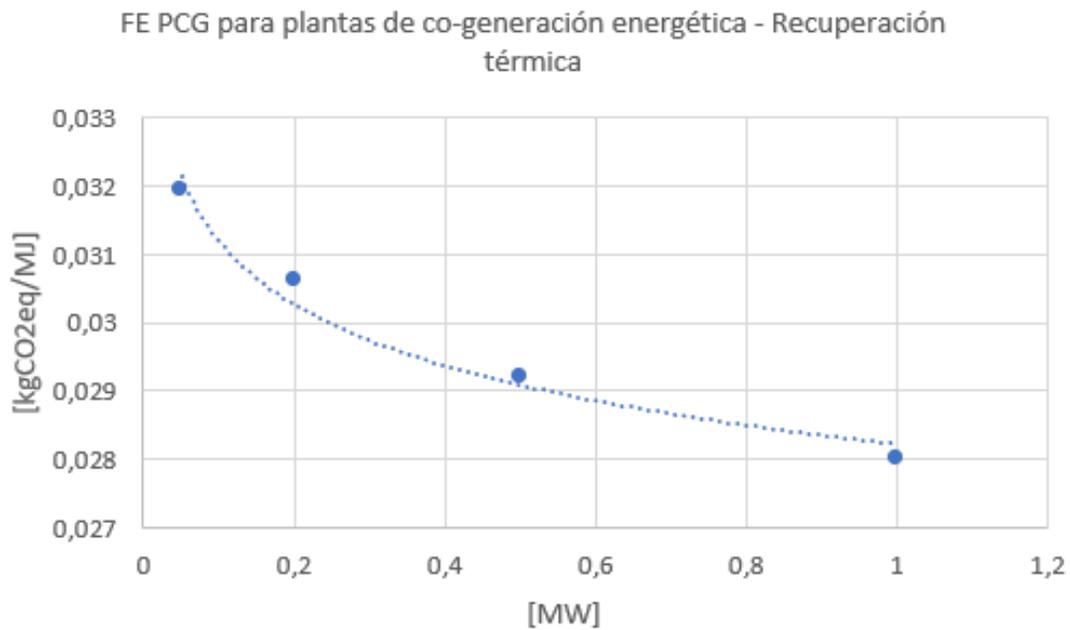


Figura 7.6: Regresión potencial del factor de emisión de PCG en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación.

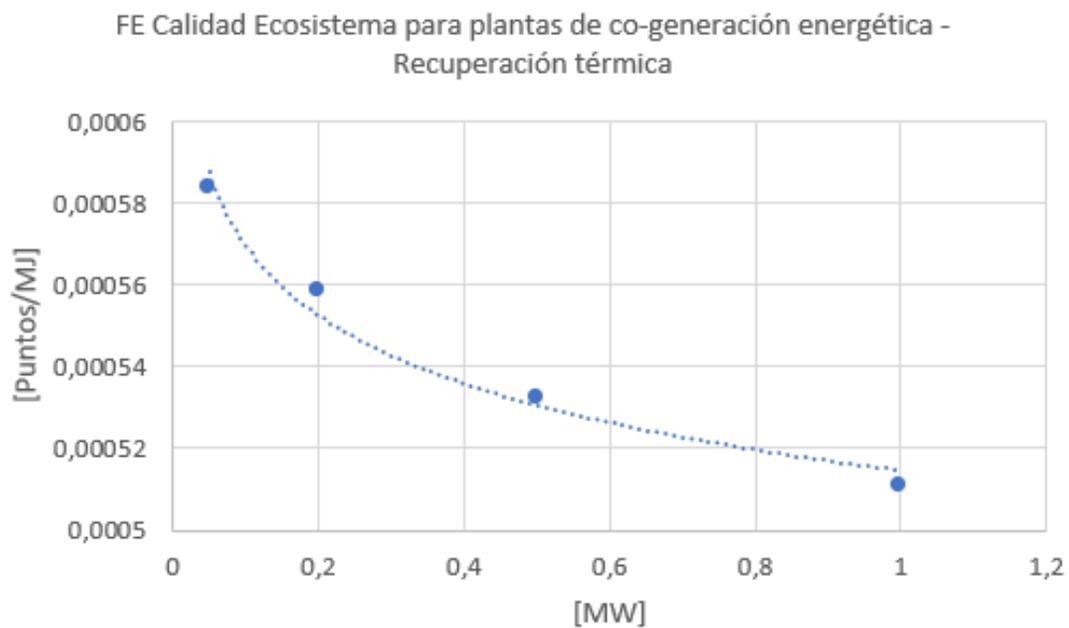


Figura 7.7: Regresión potencial del factor de emisión de CE en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación.

FE Salud Humana para plantas de co-generación energética - Recuperación térmica

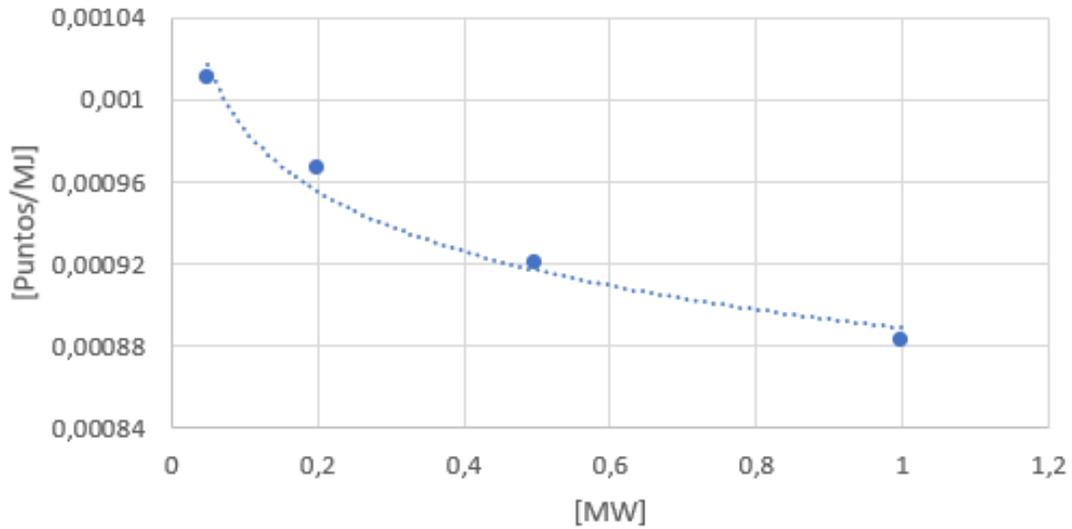


Figura 7.8: Regresión potencial del factor de emisión de SH en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación.

FE Recursos para plantas de co-generación energética - Recuperación térmica

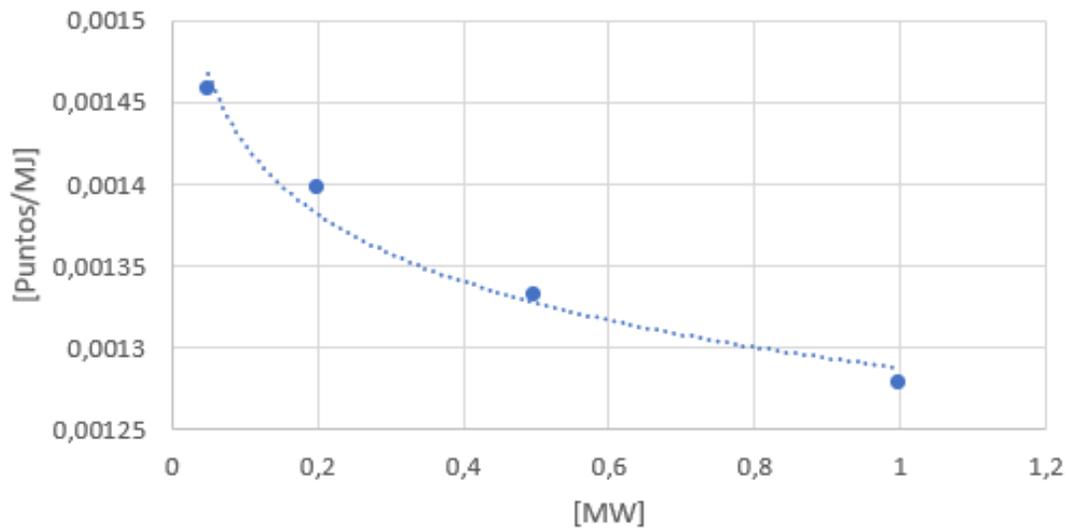


Figura 7.9: Regresión potencial del factor de emisión de R en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación.

A continuación se muestran las ecuaciones de cada aproximación y sus respectivos coeficientes de determinación se muestra en la tabla 7.10, donde  $FE_i$  es el factor de emisión para

cada categoría de impacto y  $C$  es la capacidad de la planta. Se observa que para todas las regresiones se obtiene un coeficiente de determinación mayor a 0,97.

Tabla 7.10: Funciones resultantes de la regresión potencial para los factores de emisión de las plantas de co-generación energética.

Categoría de impacto	Ecuación	R <sup>2</sup>
Potencial de calentamiento global [kgCO <sub>2</sub> eq]	$FE = 0,0282 \cdot C^{-0,044}$	0,97
Calidad del ecosistema [puntos]	$FE = 0,0005 \cdot C^{-0,044}$	0,98
Salud humana [puntos]	$FE = 0,0009 \cdot C^{-0,045}$	0,98
Agotamiento de recursos [puntos]	$FE = 0,0013 \cdot C^{-0,044}$	0,97

### G.1.2. Recuperación eléctrica

Los factores de emisión para las cuatro categorías de impacto analizadas según las capacidades propuestas por la base de datos se muestran en la tabla 7.11.

Tabla 7.11: Factores de emisión de PCG, CE, SH y AR para recuperación eléctrica en plantas de co-generación energética

Capacidad eléctrica de la planta [MW]	1	0,5	0,2	0,05
Potencial de calentamiento global [kgCO <sub>2</sub> eq/ $kWh_{recuperado}$ ]	0,59414	0,61935	0,64950	0,70168
Calidad del ecosistema [puntos/ $kWh_{recuperado}$ ]	0,01083	0,01130	0,01185	0,01282
Salud humana [puntos/ $kWh_{recuperado}$ ]	0,01871	0,01952	0,02049	0,02219
Agotamiento de Recursos [puntos/ $kWh_{recuperado}$ ]	0,02711	0,02826	0,02964	0,03203

A continuación se muestran los gráficos con los datos presentados en la tabla 7.11 y la función que representa la aproximación del comportamiento de los datos calculada a través de la regresión potencial.

FE PCG para plantas de co-generación energética - Recuperación eléctrica

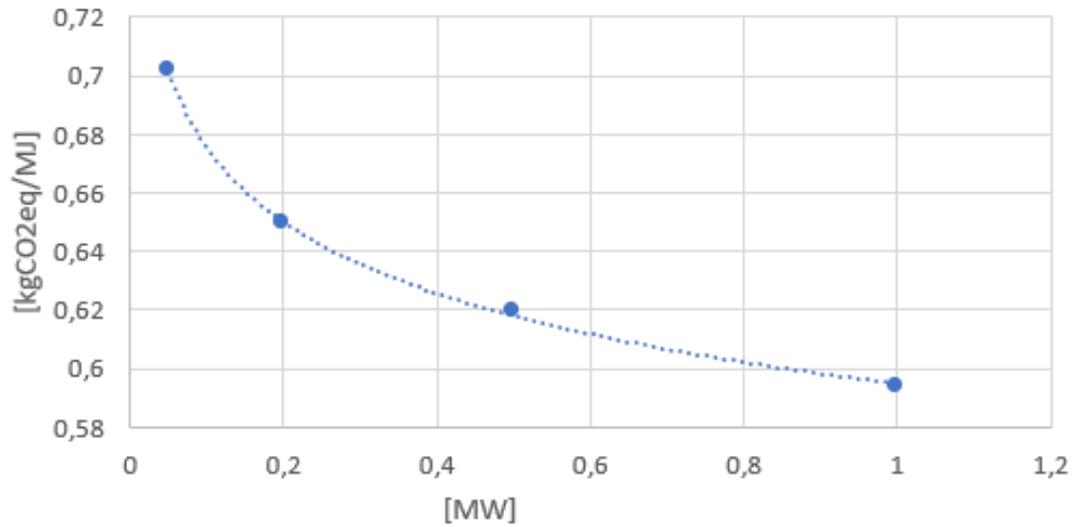


Figura 7.10: Regresión potencial del factor de emisión de PCG en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación.

FE Calidad Ecosistema para plantas de co-generación energética - Recuperación eléctrica

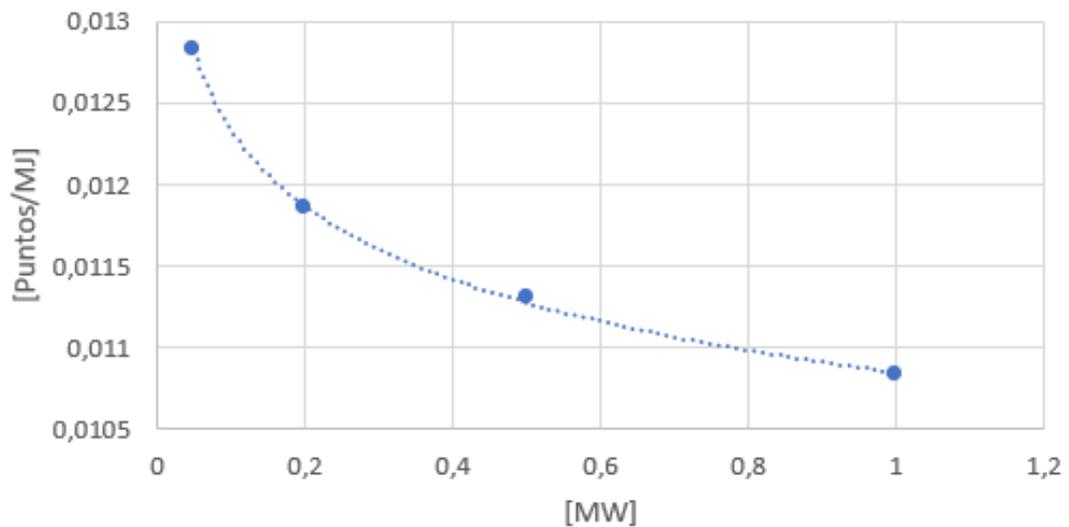


Figura 7.11: Regresión potencial del factor de emisión de CE en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación.

FE Salud Humana para plantas de co-generación energética -  
Recuperación eléctrica

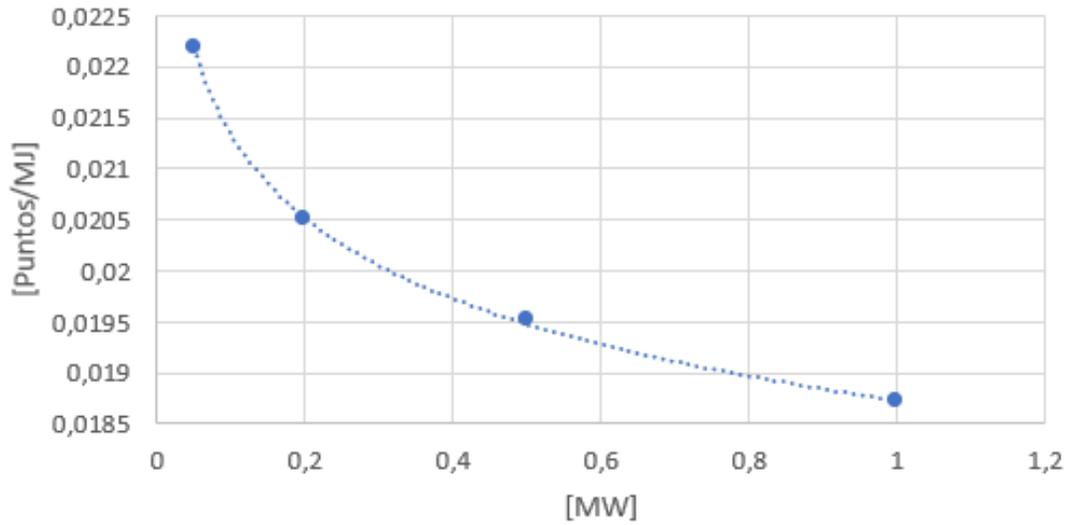


Figura 7.12: Regresión potencial del factor de emisión de SH en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación.

FE Recursos para plantas de co-generación energética - Recuperación eléctrica

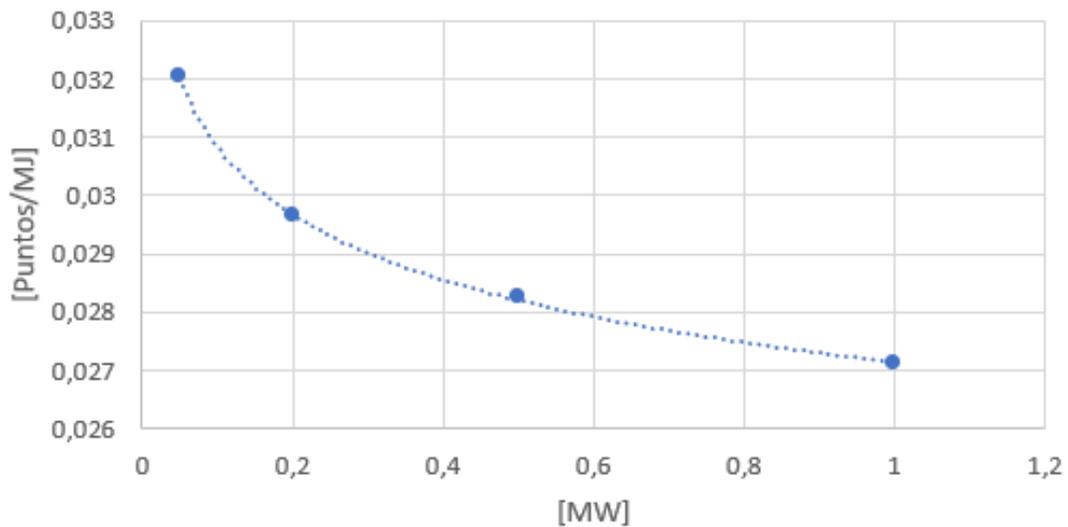


Figura 7.13: Regresión potencial del factor de emisión de R en función de la capacidad de generación eléctrica de la planta de co-generación.

A continuación se muestran las ecuaciones de cada aproximación y sus respectivos coeficientes de determinación se muestra en la tabla 7.12, donde  $FE_i$  es el factor de emisión para

cada categoría de impacto y  $C$  es la capacidad de la planta. Se observa que para todas las regresiones se obtiene un coeficiente de determinación mayor a 0,99.

Tabla 7.12: Funciones resultantes de la regresión potencial para los factores de emisión de las plantas de co-generación energética.

Categoría de impacto	Ecuación	R <sup>2</sup>
Potencial de calentamiento global [kgCO <sub>2</sub> eq]	$FE = 0,5949 \cdot C^{-0,055}$	0,99
Calidad del ecosistema [puntos]	$FE = 0,0108 \cdot C^{-0,056}$	0,99
Salud humana [puntos]	$FE = 0,0187 \cdot C^{-0,056}$	0,99
Agotamiento de recursos [puntos]	$FE = 0,0271 \cdot C^{-0,055}$	0,99

## G.2. PTAS, alternativa recuperación de gases desde rellenos sanitarios e incineración

La actividad representativa seleccionada para utilizar sus factores de emisión en las etapas de Plantas de tratamiento de aguas servidas para el proceso de recuperación de gases desde rellenos sanitarios e incineración fue "Tratamiento de aguas residuales, promedio". Sin embargo, se asume que los RILes son tratados hasta cumplir con la norma de descarga de efluentes en alcantarillados establecida en el DS N°609 del Ministerio de Obras Públicas. Por lo tanto, se asume que el factor de emisión debe representar el impacto de una planta con una capacidad similar a las que reciben los efluente de la red de alcantarillados. Para el caso en cuestión se toma como referencia la capacidad de la planta de tratamiento de aguas servidas de La Farfana de Aguas Andinas, con una capacidad de tratamiento de 9,5E10[l/año].

La base de datos de Ecoinvent ofrece los factores de emisión para plantas de tratamiento de aguas servidas con cinco capacidades diferentes: 1,6E8[l/año], 1E9[l/año], 5E9[l/año], 1,1E10[l/año] y 4,7E10[l/año]. Por lo tanto, para obtener los factores de emisión se realizó una regresión potencial para determinar una función que relacione la capacidad de la planta con los factores de emisión para las diferentes categorías de impacto. Vale destacar que la función obtenida es una aproximación al comportamiento real del factor de emisión en función de la capacidad de la planta.

Los factores de emisión para las cuatro categorías de impacto analizadas según las capacidades propuestas por la base de datos se muestran en la tabla 7.13.

Tabla 7.13: Factores de emisión de PCG, CE, SH y AR para PTAS con diferentes capacidades.

Capacidad de la planta [l/año]	1,60E+08	1,00E+09	5,00E+09	1,10E+10	4,70E+10
Potencial de calentamiento global [kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> <sub>agua</sub> ]	0,45955	0,37898	0,34351	0,31281	0,25481
Calidad del ecosistema [puntos/m <sup>3</sup> <sub>agua</sub> ]	0,01406	0,01101	0,00903	0,00822	0,00692
Salud humana [puntos/m <sup>3</sup> <sub>agua</sub> ]	0,02955	0,02541	0,02354	0,02190	0,01881
Agotamiento de Recursos [puntos/m <sup>3</sup> <sub>agua</sub> ]	0,02520	0,02030	0,01782	0,01592	0,01290

A continuación se muestran los gráficos con los datos presentados en la tabla 7.13 y la función que representa la aproximación del comportamiento de los datos calculada a través de la regresión potencial.

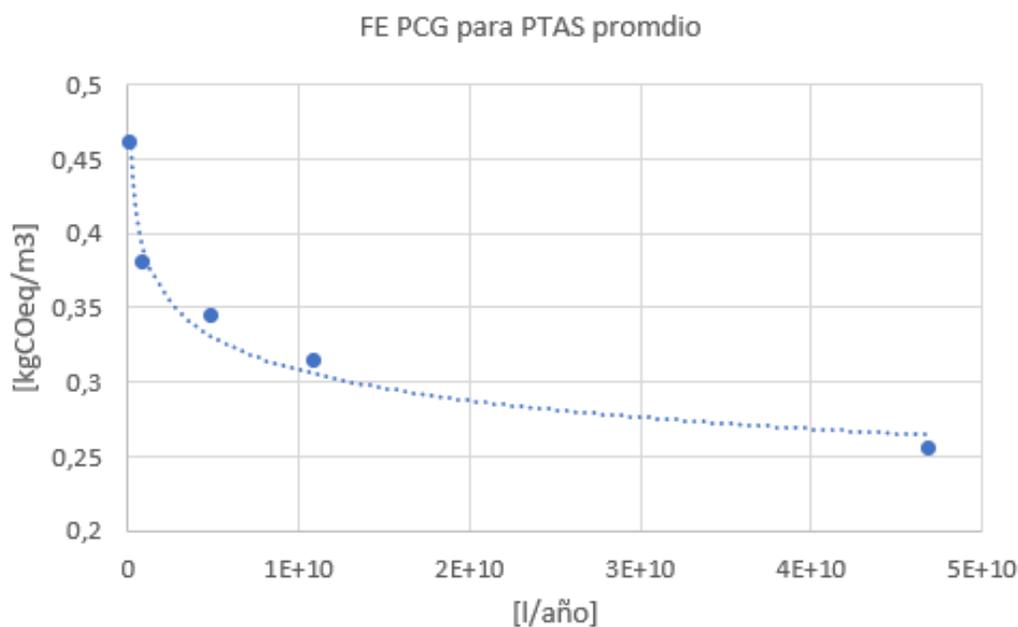


Figura 7.14: Regresión potencial del factor de emisión de PCG en función de la capacidad de tratamiento de la PTAS.

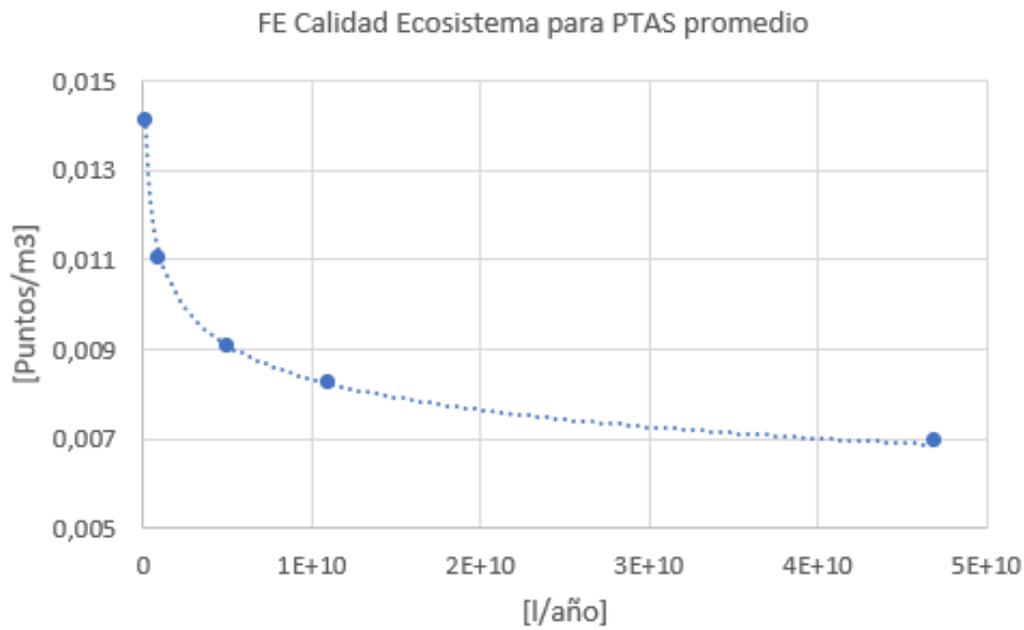


Figura 7.15: Regresión potencial del factor de emisión de CE en función de la capacidad de tratamiento de la PTAS.

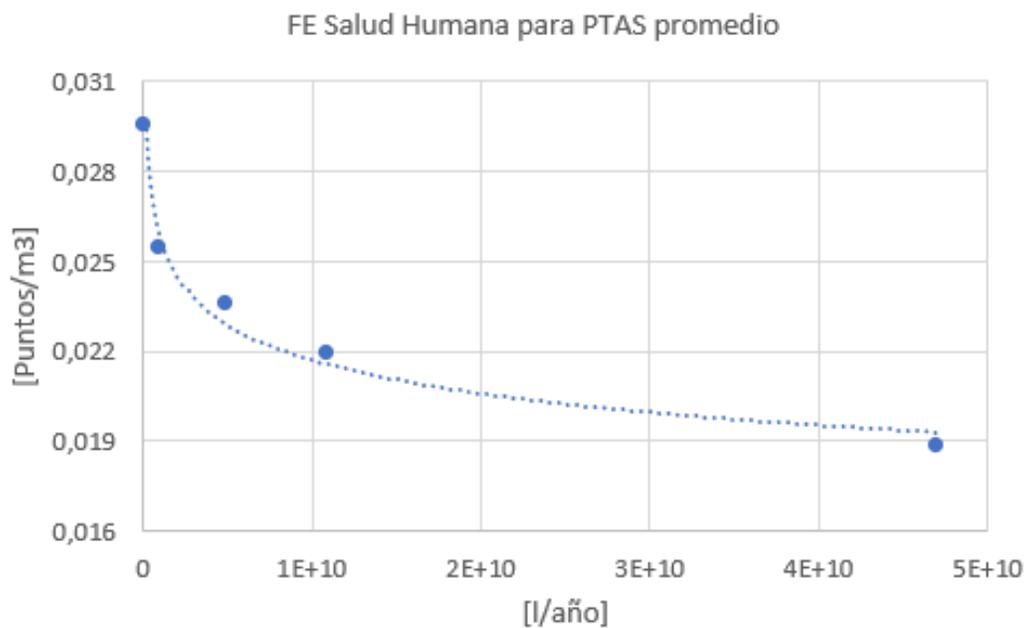


Figura 7.16: Regresión potencial del factor de emisión de SH en función de la capacidad de tratamiento de la PTAS.

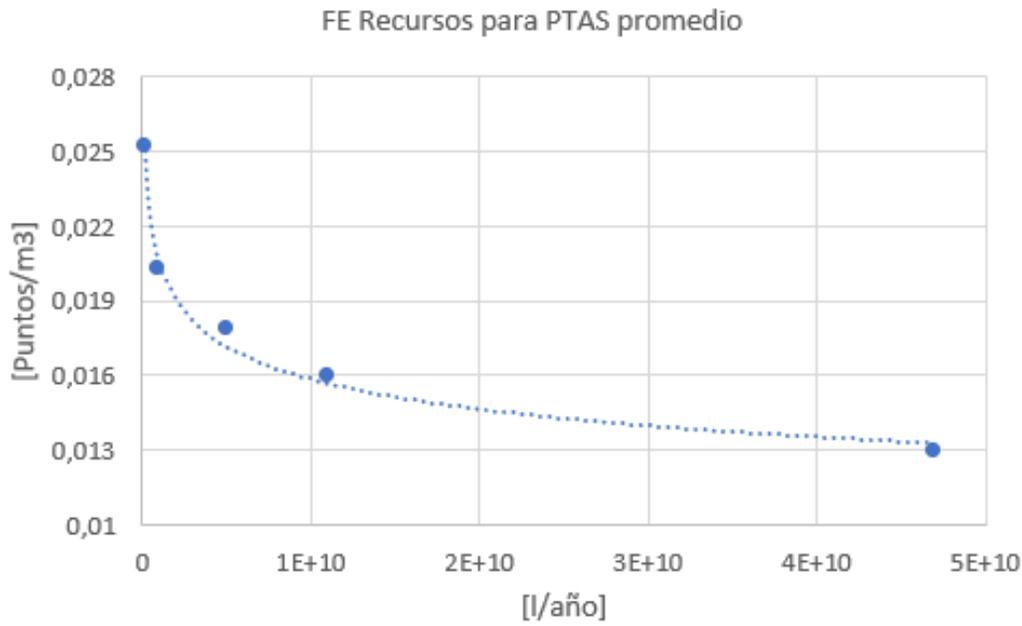


Figura 7.17: Regresión potencial del factor de emisión de R en función de la capacidad de tratamiento de la PTAS.

A continuación se muestran las ecuaciones de cada regresión y sus respectivos coeficientes de determinación se muestra en la tabla 7.14, donde  $FE_i$  ([puntos]) es el factor de emisión para cada categoría de impacto y  $C$  es la capacidad de la planta ([l/año]). Se observa que para todas las regresiones se obtiene un coeficiente de determinación mayor a 0,98.

Tabla 7.14: Funciones resultantes de la regresión potencial para los factores de emisión de las PTAS.

Categoría de impacto	Ecuación	$R^2$
Potencial de calentamiento global [kgCO2eq]	$FE = 3,0001 \cdot C^{-0,099}$	0,98
Calidad del ecosistema [puntos]	$FE = 0,1468 \cdot C^{-0,125}$	0,99
Salud humana [puntos]	$FE = 0,1246 \cdot C^{-0,076}$	0,98
Agotamiento de recursos [puntos]	$FE = 0,2196 \cdot C^{-0,114}$	0,99

## Anexo H. Calculo de factores de emisión para procesos con incertidumbre o inexistencia en Ecoinvent

## H.1. Tratamiento de RSM, alternativa recuperación de gases desde rellenos sanitarios

El tratamiento de RSM en la recuperación de gases de rellenos sanitarios fue caracterizada a través de la actividad "Tratamiento de residuos sólidos municipales, relleno sanitario" disponible en la base de datos de Ecoinvent para las categorías de impacto CE, SH y AR. La actividad seleccionada genera una alta incertidumbre en los resultados debido a que no se especifica las características del proceso, por ejemplo, no se menciona si existe recuperación de gases o qué fracción es recuperada. Por lo tanto, se opta por disminuir la incertidumbre del factor de emisión de la categoría de impacto PCG y se calcula el factor de emisión de la etapa, asociado a la masa de RSM alimentada, en base al balance de masa y de energía de la etapa.

Los principales flujos considerados en el cálculo del factor de emisión fueron las emisiones gaseosas resultantes de la degradación aeróbica y anaeróbica de los compuestos orgánicos (ver tabla 7.15). El factor de emisión se calcula como la masa de  $CO_{2eq}$  asociada a los flujos de entrada y salida del proceso. Como los flujos másicos de gases son elementales (se disponen directamente en la atmósfera) se ponderan por sus respectivos potenciales de calentamiento global (se considera un horizonte de 100 años) factor directamente relacionado con el forzamiento radiativo de cada gas relativo al forzamiento radiativo del dióxido de carbono.

Tabla 7.15: Flujos considerados en la estimación de PCG de la etapa de estabilización y sus respectivos PCG

Sentido	Especie	Flujo normalizado		Potencial de calentamiento global		
		Unidad	Valor	Unidad	Valor	Fuente
Entrada	RSM	kg	1	N/A	N/A	-
Salidas	CO <sub>2</sub> <sup>a</sup>	kg	0,19519	$[\frac{kgCO_{2eq}}{kgCO_2}]$	0	[52]
	CH <sub>4</sub>	kg	0,04743	$[\frac{kgCO_{2eq}}{kgCH_4}]$	28	[52]
	NH <sub>3</sub>	kg	0,00157	$[\frac{kgCO_{2eq}}{kgNH_3}]$	0	[69]
	H <sub>2</sub> S	kg	0,00064	$[\frac{kgCO_{2eq}}{kgH_2S}]$	5,8	[70]

<sup>a</sup> El  $CO_2$  biogénico no se cuenta en el potencial de calentamiento global según la metodología del IPCC.

Al ponderar los PCG con sus respectivos flujos se obtiene el PCG asociado a la etapa de estabilización de residuos en rellenos sanitarios (ver tabla 7.16).

Tabla 7.16: PCG tratamiento de RSM, relleno sanitario con recuperación de biogás del 20 %

Actividad	Unidad	PCG a 100 años [kgCO <sub>2</sub> eq]
Tratamiento de RSM, relleno sanitario con recuperación de biogás del 20 %	kg	1,33193

## H.2. Aireación de lixiviados, alternativa recuperación de gases desde rellenos sanitarios

La aireación de lixiviados en la recuperación de gases desde rellenos sanitarios es una de las etapas que no se pudo representar a través de las actividades disponibles en la base de datos de Ecoinvent. Debido a la complejidad de estimar los factores de emisión CE, SH y R, no se consideraron en el estudio. Sin embargo, para la categoría de impacto PCG se optó por estimar un factor de emisión para el flujo másico de lixiviado tratado en base al balance de masa y de energía de la etapa.

Los principales flujos considerados en el cálculo del factor de emisión fueron la energía eléctrica alimentada en el proceso y las emisiones gaseosas resultantes de la degradación aeróbica de los compuestos orgánicos (ver tabla 7.17). El factor de emisión se calcula como la masa de CO<sub>2</sub>eq asociada a los flujos de entrada y salida del proceso. Como los flujos másicos de gases son elementales (se disponen directamente en la atmósfera) se ponderan por sus respectivos PCG (se considera un horizonte de 100 años), factor directamente relacionado con el forzamiento radiativo de cada gas relativo al forzamiento radiativo del dióxido de carbono. Para el flujo de energía alimentada, al no ser un flujo elemental (proviene de procesos anteriores situados en la tecnosfera), se pondera por su huella de carbono.

Tabla 7.17: Flujos considerados en la estimación de PCG de la etapa de lixiviación y sus respectivos PCG

Sentido	Especie	Flujo normalizado		Potencial de calentamiento global		
		Unidad	Valor	Unidad	Valor	Fuente
Entradas	Lixiviado	kg	1	N/A	N/A	-
	EE	kWh	0,70211	$[\frac{kgCO_2eq}{kWh}]$	0,4056	[71]
Salidas	CO <sub>2</sub> <sup>a</sup>	kg	0,00736	$[\frac{kgCO_2eq}{kgCO_2}]$	0	[52]
	NH <sub>3</sub>	kg	2,6E-5	$[\frac{kgCO_2eq}{kgCO_2}]$	0	[69]

<sup>a</sup> El CO<sub>2</sub> biogénico no se cuenta en el potencial de calentamiento global según la metodología del IPCC.

Al ponderar los PCG con sus respectivos flujos se obtiene el PCG asociado a la etapa de aireación de lixiviados (ver tabla 7.18).

Tabla 7.18: PCG tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, aireación

Actividad	Unidad	PCG a 100 años [kgCO <sub>2</sub> eq]
Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios, aireación	kg	0,28477