



**ANTECEDENTES PARA LA ELABORACIÓN DE ANÁLISIS
ECONÓMICO DE METAS DE RECOLECCIÓN Y VALORIZACIÓN
PARA EL PRODUCTO PRIORITARIO “PILAS” CONTENIDO EN LA
LEY 20.920
ID Licitación: 608897-18-LE20**

Estudio solicitado por la Subsecretaría del Medio Ambiente

INFORME FINAL

Santiago, 11 de marzo de 2021

Título del Proyecto

Antecedentes para la Elaboración de Análisis Económico de Metas de Recolección y Valorización para el Producto Prioritario “Pilas” Contenido en la Ley 20.920

Autores:

Jefe de proyecto: José Miguel Valdés

Expertos: Oscar Melo, Luis Cifuentes

Ingenieros de proyecto: Viviana Cerda Gho, Camila Cabrera, Esteban Cathalifaud

Dictuc S.A.

Vicuña Mackenna N° 4860, Macul – Santiago

Datos Mandante

Razón Social: Subsecretaría del Medio Ambiente

RUT: 61.979.930-5

Dirección: San Martín 73, Santiago

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo caracterizar el proceso de manejo de los residuos del producto prioritario pilas, identificando y estimando los costos y beneficios (impactos) económicos, ambientales y/o sociales asociados al establecimiento de metas de recolección y valorización, en el marco de los contenidos en la Ley 20.920.

Cuerpo del informe

133 hojas (incluye portada)

Fecha del informe

11/marzo/2021

Información Contractual

Correlativo Contrato: 2842

OC N°: 608897-117-SE20

Contraparte técnica

Nombre: Nicolás Trivelli

Cargo: Profesional del Departamento de Economía Ambiental

E-mail: ntrivelli@mma.gob.cl

Sr. Luis Cifuentes

Director GreenLab

Dictuc S.A.

Sr. Felipe Bahamondes

Gerente General

Dictuc S.A.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	I
Lista de Tablas.....	III
Lista de Figuras.....	V
Acrónimos y Abreviaturas.....	VII
Resumen Ejecutivo	IX
1. Antecedentes y justificación del Estudio.....	1
2. Objetivos del estudio	2
2.1 Objetivo general.....	2
2.2 Objetivos específicos.....	2
2.3 Alcances del estudio.....	2
3. Disposición de pilas con destino final desconocido	3
3.1 Destinos finales	3
3.1.1 <i>Destinos finales con trazabilidad</i>	<i>3</i>
3.1.2 <i>Destinos desconocidos</i>	<i>8</i>
3.2 Categorías de pilas	9
3.2.1 <i>Nivel de detalle de información base disponible</i>	<i>9</i>
3.2.2 <i>Diferenciación de impactos (costos y beneficios)</i>	<i>12</i>
3.2.3 <i>Tendencias observadas</i>	<i>13</i>
3.2.4 <i>Propuesta de categorización de pilas</i>	<i>15</i>
3.3 Estimación de PFU con “destino final desconocido”	17
3.3.1 <i>Estimación consumo de pilas</i>	<i>18</i>
3.3.2 <i>Estimación generación de PFU.....</i>	<i>23</i>
3.3.3 <i>PFU con destino conocido</i>	<i>30</i>
3.3.4 <i>Estimación de PFU según destino final desconocido</i>	<i>47</i>
4. Identificación de impactos (beneficios y costos) económicos, sociales y ambientales asociados al manejo del producto prioritario pilas	49
4.1 Identificación de costos/beneficios e impactos.....	53
4.1.1 <i>Recolección.....</i>	<i>54</i>
4.1.2 <i>Transporte.....</i>	<i>55</i>

4.1.3	<i>Selección</i>	55
4.1.4	<i>Reciclaje</i>	56
4.1.5	<i>Disposición adecuada</i>	57
4.1.6	<i>Disposición inadecuada</i>	57
4.1.7	<i>Comparación de impactos de pilas y acumuladores</i>	61
4.1.8	<i>Resumen de los costos/beneficios identificados por etapa</i>	62
4.2	Estimación de costos y beneficios unitarios	63
4.2.1	<i>Recolección</i>	64
4.2.2	<i>Transporte</i>	65
4.2.3	<i>Selección</i>	67
4.2.4	<i>Reciclaje</i>	67
4.2.5	<i>Disposición adecuada</i>	73
4.2.6	<i>Disposición inadecuada</i>	73
4.2.7	<i>Metodología alternativa para incorporar costos/beneficios no cuantificables ni valorizables</i>	75
4.2.8	<i>Resumen de los costos unitarios propuestos por etapa</i>	91
4.3	Método para estimación de costos y beneficios asociados a la gestión adecuada de PFU 91	
5.	Conclusiones	99
6.	Bibliografía	103
7.	Anexos	108
7.1	Pilas según componentes.....	108
7.2	Etapas involucradas en la gestión adecuada de PFU	109
7.3	Costos totales de reciclaje.....	111
7.4	Encuesta municipios sobre recolección y gestión de PFU	114

Lista de Tablas

Tabla 0-1 PFU [kg] con destino desconocido según combinación de escenarios, 2019	XI
Tabla 0-2 Estimación de PFU [kg] con destino desconocido según tipo de SDF, año 2019	XI
Tabla 0-3 Identificación de costos/beneficios económicos y financieros e impactos socioambientales para cada etapa del proceso de gestión adecuada de PFU por tipo de pila ...	XII
Tabla 0-4 Costos unitarios, económico y financieros y ambientales, que se propone utilizar, según etapa	XIII
Tabla 0-5 Costos socioambientales unitarios promedios [UF/ton] por disposición evitada en destino desconocido	XIV
Tabla 3-1 Distribución de los RSDyA según SDF por región en el año 2018.....	8
Tabla 3-2 Detalle de la información disponible en estudio base.....	10
Tabla 3-3 Composición química de los principales tipos de pila	11
Tabla 3-4 Descripción comercial para diferentes pilas clasificadas según tamaño.....	12
Tabla 3-5 Código arancelarios contabilizados en estudio base y agrupación en categorías propuestas de pilas	16
Tabla 3-6 Resumen de escenarios modelados	18
Tabla 3-7 Limitaciones comparativas de supuesto subyacente de los enfoques.....	25
Tabla 3-8 Tiempo de residencia [año] considerado	26
Tabla 3-9 Peso medio por pila considerado [gr/unidad]	29
Tabla 3-10 Peso promedio de PFU [gr/unidad]	30
Tabla 3-11 Clasificación de residuos de interés de SIDREP	31
Tabla 3-12 Empresas clasificadas como intermediarios y cantidad de residuos recepcionados [kg de PFU].....	32
Tabla 3-13 Resumen del procesamiento de la disposición de PFU con destino conocido según SIDREP [kg], periodo 2017 a 2019	33
Tabla 3-14 PFU con destino conocido [kg] según datos de SIDREP.....	33
Tabla 3-15 Tasa de disposición correcta de pilas según escenario de agrupación residuos SIDREP y enfoque de estimación de generación PFU	33
Tabla 3-16 Número de comunas y población según punto de recolección permanentes de PFU	43
Tabla 3-17 Número de comunas y población según puntos de recolección de PFU en campañas puntuales	43
Tabla 3-18 Recolección per cápita promedio [g/hab-año] según modo de recolección y tamaño poblacional.....	46
Tabla 3-19 PFU [kg] con destino desconocido según combinación de escenarios	47
Tabla 3-20 Estimación de PFU [kg] con destino desconocido según tipo de SDF, año 2019	48
Tabla 4-1 Resumen de la revisión de antecedentes nacionales e internacionales	50
Tabla 4-2 Etapas de la gestión de PFU a ser consideradas en el presente estudio.....	54
Tabla 4-3 Metales recuperados a través del reciclaje de distintos tipos de pilas	56
Tabla 4-4 Resumen de los impactos negativos sobre el ambiente y la salud humana de distintos metales presentes en pilas y acumuladores.....	60

Tabla 4-5 Identificación de costos/beneficios económicos y financieros e impactos socioambientales para cada etapa del proceso de gestión adecuada de PFU por tipo de pila ...	63
Tabla 4-6 Costos económicos y financieros [UF] involucrados en el equipamiento necesario para la recolección de PFU.....	64
Tabla 4-7 Costos económicos y financieros variables [UF/ton] asociados a la logística y ejecución de esquemas de recolección.....	65
Tabla 4-8 Factores de emisión para transporte.....	66
Tabla 4-9 Costos económicos y financieros variables [UF/ton] asociados a la selección y segregación de PFU.....	67
Tabla 4-10 Costos económicos y financieros variables [UF/ton] asociados al tratamiento por reciclaje de los residuos de PFU.....	69
Tabla 4-11 Costos económicos y financieros variables [UF/ton] asociados al tratamiento por reciclaje de los residuos de PFU.....	70
Tabla 4-12 Costos económicos y financieros variables [UF/ton] propuestos para ser considerados en el reciclaje de las PFU.....	70
Tabla 4-13 Precio de distintos metales recuperados en el reciclaje de pilas	71
Tabla 4-14 Costos económicos y financieros variables [UF/ton] asociados a la disposición adecuada de PFU	73
Tabla 4-15 Costo unitario de disposición inadecuada de residuos [UF/ton]	74
Tabla 4-16 Contenido total de metales por tipo de pila [kg metal/ton pila].....	76
Tabla 4-17 Valores observados en estudios de laboratorio y su comparación con los límites de emisión de contaminantes líquidos a aguas subterráneas según el Decreto Supremo N°46.....	77
Tabla 4-18 Estimación de aporte unitario de contaminantes a lixiviados [g contaminante/ton PFU]	78
Tabla 4-19 Revisión bibliográfica de estudios para la valoración de la DAP por la gestión adecuada de RAEE	80
Tabla 4-20 DAP por categoría por aumento de un punto porcentual en el reciclaje y en tratamiento en relleno de seguridad.....	84
Tabla 4-21 Valor propuesto de DAP por el aumento en un punto porcentual (1%) del tratamiento adecuado de PFU, por reciclaje y tratamiento en relleno de seguridad	85
Tabla 4-22 Valores observados en estudios de laboratorio y su comparación con los límites de emisión de contaminantes líquidos a aguas subterráneas según el Decreto Supremo N°46.....	86
Tabla 4-23 Costos identificados para el tratamiento de aguas contaminadas con componentes inorgánicos.....	88
Tabla 4-24 Costos unitarios, económico y financieros y ambientales, que se propone utilizar, según etapa.....	91
Tabla 4-25 Relación entre cadenas de gestión de PFU y etapas	92
Tabla 4-26 Supuesto de destino PFU según cadena de gestión adecuada	94
Tabla 4-27 Costos socioambientales unitarios promedios [UF/ton] por disposición evitada en destino desconocido	96
Tabla 5-1 Estimación de PFU [kg] con destino desconocido según tipo de SDF, año 2019	99
Tabla 7-1 Ejemplo de pilas según forma física y subcategoría	108

Tabla 7-2 Frecuencia de mención y costeo de diferentes etapas de gestión de las PFU 111
 Tabla 7-3 Costos [UF/ton] totales por reciclaje para distintos tipos de pilas, países y años 113
 Tabla 7-4 Preguntas contenidas en la encuesta enviada a los municipios..... 114

Lista de Figuras

Figura 0-1 Generación de PFU [miles de toneladas] según enfoques a nivel nacional X
 Figura 0-2 Ejemplo de costos netos [UF/año] para comuna Villarrica, gestión mediante reciclaje según etapa de gestión comparada con costos de gestión mediante relleno de seguridad XV
 Figura 3-1 Disposición en rellenos de seguridad según región [en base a toneladas dispuestas]. 4
 Figura 3-2 Tendencia de pilas primarias y proyección [unidades importadas/año] 14
 Figura 3-3 Tendencia de pilas secundarias y proyección [unidades importadas/año] 14
 Figura 3-4 Etapas de metodología general 17
 Figura 3-5 Serie de tiempo importaciones de pilas [unidades] 2002-2019..... 19
 Figura 3-6 Distribución de consumo de pilas primarias periodo 2010-2019 y 2017-2019 20
 Figura 3-7 Distribución del consumo de acumuladores en el periodo 2010-2019 y 2017-2019 20
 Figura 3-8 Proyección consumo de pilas 2010-2030 21
 Figura 3-9 Proyección consumo regional de pilas 22
 Figura 3-10 Diagrama esquemático de enfoque por pila 24
 Figura 3-11 Diagrama esquemático de enfoque de reemplazo 25
 Figura 3-12 Distribución de años de residencia para acumuladores de litio 26
 Figura 3-13 Generación de PFU [unidades] según enfoques a nivel nacional 28
 Figura 3-14 Generación de PFU [miles de toneladas] a nivel nacional según enfoque 29
 Figura 3-15 Comunas respondientes 36
 Figura 3-16 Tasa de respuesta según Macrozona 37
 Figura 3-17 Distribución de respuesta según rango de tamaño de población y urbanismo..... 38
 Figura 3-18 Distribución de respuestas según población 39
 Figura 3-19 Existencia de iniciativa municipal de recolección de PFU 40
 Figura 3-20 Existencia de iniciativa municipal de recolección PFU según nivel de urbanismo.... 41
 Figura 3-21 Existencia de iniciativa municipal de recolección PFU según tamaño de población 41
 Figura 3-22 Respuesta de modo de recolección..... 42
 Figura 3-23 Modo de recolección según nivel de urbanismo y tamaño de población..... 42
 Figura 3-24 Responsable de la gestión de los contenedores de las PFU..... 44
 Figura 3-25 Destino de las PFU 45
 Figura 4-1 Vista del modelo general para estimación de beneficios y costos..... 93
 Figura 4-2 Ejemplo de consolidado de costos netos [UF/año] 96
 Figura 4-3 Ejemplo de costos netos [UF/año] para comuna Villarrica, gestión mediante reciclaje según etapa de gestión comparada con costos de gestión mediante relleno de seguridad 97
 Figura 4-4 Ejemplo de costos netos [UF/año] para comuna Villarrica, por etapa, según cadena de gestión adecuada, para pilas de dióxido de manganeso 98

Figura 4-5 Ejemplo de costos netos [UF/año] para comuna Villarrica, por etapa, según tipo de costo, para pilas de dióxido de manganeso y cadena de reciclaje 98

Acrónimos y Abreviaturas

Países

EEUU:	Estados Unidos de América
UE:	Unión Europea

Monedas

AUD:	Dólares de Australia
CLP:	Pesos de Chile
EUR:	Euros
GBP:	Libra esterlina
UF:	Unidad de Fomento
USD:	Dólares de Estados Unidos

Abreviaturas

ACB:	Análisis Costo Beneficio
ACV:	Análisis de ciclo de Vida
AEE:	Aparatos Eléctricos y Electrónicos
AGIES:	Análisis General del Impacto Económico y Social
DAP:	Disposición a Pagar
DEA:	Departamento de Economía Ambiental
GEI:	Gases de Efecto Invernadero
INGEI:	Inventario Nacional de GEI
MMA:	Ministerio del Medio Ambiente
PFU:	Pilas Fuera de Uso
RE:	Resolución Exenta
SDDR:	Sistema de Depósito y Reembolso
SDF:	Sitio de Disposición Final
SIDREP:	Sistema de Declaración y Seguimiento de Residuos Peligrosos
SUBDERE:	Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo
VAN:	Valor Actual Neto

Prefijos

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

μ: Micro (10^{-6})

n: Nano (10^{-9})

Unidades Básicas

A: Ampere (Corriente eléctrica)

m: Metro (Longitud)

Kg: Kilogramo (Masa)

S: Segundo (Tiempo)

°C: Celsius (Temperatura)

Unidades Derivadas

m²: Metro cuadrado m² (Superficie o área)

m³: Metro cúbico (Volumen)

m/s: Metro por segundo (Velocidad)

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

J: Joule (Energía, Trabajo)

W: Watt (Potencia)

Formato

"." separador decimal

"," separador de miles

Resumen Ejecutivo

Con la promulgación el año 2016 de la Ley 20.920 se inició en el país el proceso para establecer las metas de recolección y valorización de los diferentes productos prioritarios en el país. En este marco, el presente estudio tiene como objetivo general caracterizar el proceso de manejo del residuo prioritario pilas, identificando y estimando los costos y beneficios (impactos) económicos, ambientales y/o sociales asociados al establecimiento de metas de recolección y valorización, en el marco de los contenidos en la Ley 20.920.

El estudio se divide en dos capítulos, la estimación de la disposición de pilas fuera de uso (PFU) con destino final desconocido y la estimación de impactos económicos y socioambientales producto de la gestión de las PFU. A la fecha del presente informe aún no se definen escenarios normativos o estimaciones de la variación en la gestión proyectada de las PFU, de forma que ambos capítulos, si bien son coherentes en el lenguaje y dimensionalidad, resultan en insumos para la futura evaluación de escenarios normativos, sin resultar en una evaluación dentro de los alcances del presente estudio.

En cuanto a la disposición de pilas con destino final desconocido, se diseñó e implementó una metodología para la estimación de la disposición de PFU en sitios de destino desconocido para cada categoría de pila y sitio de disposición final (SDF) categorizado. De forma general, la metodología sigue cuatro etapas consecutivas que permiten alcanzar la estimación objetivo. En primer lugar, se determina el consumo de pilas, a partir del cual se realiza una estimación de la generación de PFU. Posteriormente se estima la cantidad de PFU con destino conocido, para obtener la diferencia que corresponde a la estimación total de PFU con destino desconocido. Por último, estas PFU con destino desconocido son distribuidas entre los diferentes SDF.

La estimación del consumo de pilas se basa en la información consolidada por el estudio base de WSP (2020), en el cual se cuenta con una serie de tiempo de las importaciones para el periodo 2002-2019. El análisis del consumo estimado permite observar ciertas tendencias relevantes: por un lado, las pilas primarias tienen una suave tendencia a disminuir su volumen, mientras que las pilas secundarias (acumuladores) están aumentando de forma relevante. Aun así, las pilas primarias representan, en término de unidades, la mayor parte el consumo (94% para el año 2019). Respecto a las categorías de pilas, la principal categoría de forma constante en la serie corresponde a las pilas de dióxido de manganeso, y en segundo lugar (con una tendencia a la baja) las pilas de Zinc. En los acumuladores se observa que los de ion litio están aumentando de forma relevante su participación, en desmedro de las importaciones de las pilas de Níquel-Cadmio.

Para la estimación de la generación de PFU se distinguen dos enfoques metodológicos alternativos. Un enfoque por pila, el cual hace el seguimiento a cada pila y cuya estimación supone que las PFU son iguales al consumo de pilas en “n” años antes, siendo “n” el tiempo de residencia medio, o un enfoque de pila de reemplazo, que considera que el consumo de toda pila

está asociado al reemplazo de una pila que pasa a ser una PFU. Los resultados señalan que si bien el número de PFU generadas tiende a una disminución, en términos de masa se observa un aumento (ver Figura 0-1). Lo anterior se relaciona con un aumento en el consumo, y disposición de pilas secundarias las cuales tienen un peso significativamente mayor a las pilas primarias.

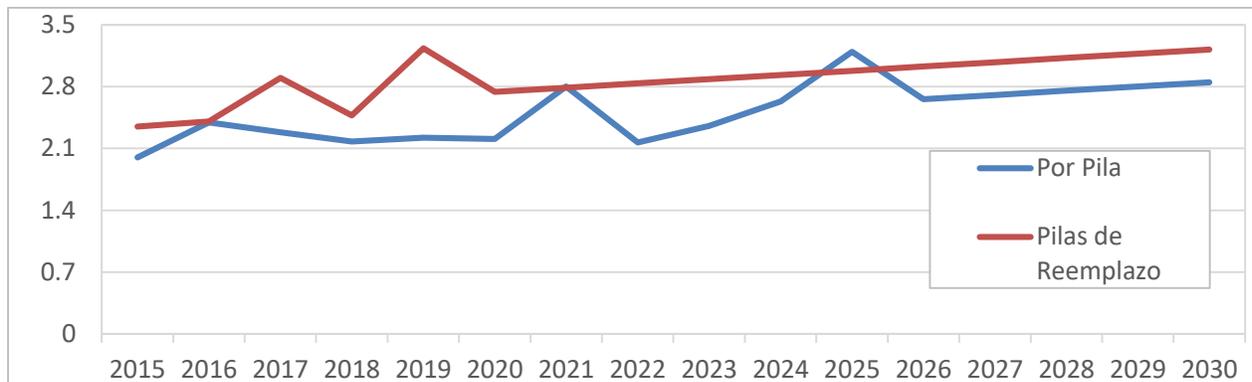


Figura 0-1 Generación de PFU [miles de toneladas] según enfoques a nivel nacional

Fuente: Elaboración propia

Para la estimación de las PFU con destino conocido, se utiliza la información de SIDREP, la cual se complementa con una encuesta enviada a actores de los municipios del país. Dicha encuesta tiene una tasa de respuesta de 46%, y los municipios que han contestado representan el 53% de la población nacional.

Dentro de los hallazgos más relevantes de la encuesta se destaca que 54% de las comunas que contestaron la encuesta tiene alguna iniciativa municipal de recolección de PFU, siendo la opción más utilizada la instalación de lugar permanente de recolección (68%) mientras que otras comunas optan por campañas puntuales de recolección. Al realizar un análisis por la clasificación de las comunas se observa que la tasa de urbanidad (porcentaje de la población que vive en zona urbana) no tiene impacto en que una comuna tenga una iniciativa municipal de recolección ni en el modo de recolección, sin embargo, el tamaño de la población (número de habitantes) sí es un factor relevante, observándose que las comunas con mayor población son más propensas a contar con un sistema de recolección de PFU, y también a preferir un sistema de recolección permanente por sobre campañas puntuales. En cuanto a la diferencia entre los modos de recolección, se observa que una recolección permanente permite obtener una recolección per cápita entre 4 y 5 veces mayor que las campañas puntuales (sin considerar Vitacura que tiene una recolección que se escapa del orden del resto de los Municipios). Lo anterior se podría explicar por la existencia de transferencia de PFU desde comunas sin sistemas de recolección permanente a comunas que sí tienen, lo cual sería la explicación para que la recolección per cápita de Vitacura se escapa del resto de las comunas.

La información comunal fue utilizada como una restricción en la cuantificación de la disposición con destino conocido por comuna, distribuyendo el resto de la recolección de PFU según SIDREP entre las comunas según la distribución de su consumo. Al analizar los datos de SIDREP se

distinguieron tres clasificaciones de residuos: Residuos clasificados como “pilas”; Residuos clasificados como “pilas y otros”; y Residuos con clasificaciones “diferentes a pilas”. En vista de esto se consideran dos escenarios que dan cuenta del rango de pilas recolectadas, un primer escenario conservador que sólo considera como PFU los residuos clasificados como “pilas”, y un escenario optimista, que considera como PFU también los residuos clasificados como “pilas y otros”. Asimismo, se identificaron establecimientos que operan como intermediarios, es decir, que reciben PFU las almacenan y posteriormente realizan la disposición de las PFU en otros establecimientos. La identificación de dichos intermediarios permite evitar el doble conteo de las PFU con destino conocido.

Considerando lo anterior se obtiene una estimación de los residuos con destino desconocido para cuatro escenarios según el enfoque metodológico para la determinación de las PFU y según cuáles residuos de SIDREP son considerados como PFU. Los resultados acumulados para el periodo 2017 a 2019, se presentan en la Tabla 0-1.

Tabla 0-1 PFU [kg] con destino desconocido según combinación de escenarios, 2019

	Conservador: Sólo Pilas	Optimista: Pilas y otros
Por Pila	1,765,992	1,456,145
Pilas de Reemplazo	2,776,445	2,466,598

Fuente: Elaboración propia

La estimación anterior es posteriormente distribuida por tipo de SDF de acuerdo con la información de la SUBDERE, el cual es sensibilizado con la distribución considerada en la construcción del INGEI para los residuos sólidos domiciliarios. Dado lo anterior, los resultados se presentan con un detalle de 4 dimensiones: tipo de pila, comuna, tipo de SDF y año, para una combinación de 8 escenarios diferentes dada por la combinación de las 2 dimensiones de escenarios: enfoque generación PFU y escenarios de residuos SIDREP considerado. En la Tabla 0-2 se presentan los resultados nacionales para el año 2019.

Tabla 0-2 Estimación de PFU [kg] con destino desconocido según tipo de SDF, año 2019

Residuos SIDREP considerados	Enfoque de generación PFU	Basural	Vertedero	Relleno Manual	Relleno Sanitario	Total PFU destino desconocido
Conservador Sólo Pilas	Por Pila	44,382 (2.5%)	333,108 (18.9%)	18,637 (1.1%)	1,369,865 (77.6%)	1,765,992
	Pilas de Reemplazo	67,848 (2.4%)	520,779 (18.8%)	28,329 (1.0%)	2,159,489 (77.8%)	2,776,445
Optimista Pilas y Otros	Por Pila	36,583 (2.5%)	274,930 (18.9%)	15,368 (1.1%)	1,129,264 (77.6%)	1,456,145
	Pilas de Reemplazo	60,267 (2.4%)	462,829 (18.8%)	25,167 (1.0%)	1,918,335 (77.8%)	2,466,598

Fuente: Elaboración propia

Se realizó una identificación de los costos y beneficios económicos y socioambientales de las diferentes etapas de la gestión de las PFU, los cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 0-3 Identificación de costos/beneficios económicos y financieros e impactos socioambientales para cada etapa del proceso de gestión adecuada de PFU por tipo de pila

Etapa	Tipo de pilas	Costos/beneficios económicos y financieros	Impactos socioambientales
Recolección	Todos	Costos de inversión en contenedores para recolección	Impactos asociados al ciclo de vida de contenedores
Transporte	Todos	Consumo de combustible Sueldos de personal Costo de arriendo o inversión en vehículos	Emisiones GEI y MP por transporte en ruta
Selección	Todos	Sueldos de personal	No se reconocen impactos
Reciclaje	Todos	Costos de inversión, operación y mantenimiento de una planta de reciclaje	Mayor consumo de energía en comparación a su disposición directa (sea adecuada o inadecuada) Emisión de GEI, MP y otros contaminantes al aire Al recuperar los metales, se evitan los impactos asociados a su producción a partir de materia prima virgen.
	MnO2 Zn-C	Se recupera zinc	-
	Óxido de mercurio	Se recupera mercurio	
	Óxido de plata	Se recupera plata y zinc	
	Litio	Se recuperan pequeñas cantidades de zinc	
	Ni-Cd	Se recupera cadmio y Fe-Ni	
	Ni-MH Li-ion	Se recuperan metales preciosos Se recupera cobalto	
Disposición adecuada	Todos	Mayor costo por tonelada dispuesta en relleno de seguridad, en comparación a su disposición inadecuada junto a residuos domiciliarios	Se requiere de espacio para contener el volumen de residuos
Disposición inadecuada	Todos	Costo que varía según el SDF	Se requiere de espacio para contener el volumen de residuos
	MnO2 Zn-C		Zinc puede acumularse en suelos Zinc puede contaminar napas subterráneas Zinc extremadamente tóxico para organismos acuáticos
	Óxido de mercurio		Mercurio extremadamente tóxico para humanos
	Óxido de plata		Plata tiene baja movilidad y acumulación en suelos y organismos vivos
	Litio		Contiene compuestos inflamables Puede prenderse en llamas en contacto con agua
	Ni-Cd		Cadmio muy tóxico para humanos
	Ni-MH		No se reconocen impactos

Etapa	Tipo de pilas	Costos/beneficios económicos y financieros	Impactos socioambientales
	Li-ion		Sufre rápido aumento de temperatura ante un corte circuito producto de cortes o torsiones Contiene compuestos tóxicos y también riesgo de incendios y explosión.

Fuente: Elaboración propia

En base a una revisión de los antecedentes disponibles se pudo valorizar los costos e impactos resumidos en la siguiente tabla. A partir de los costos y beneficios unitarios estimados, se desarrolló un método para la estimación de los costos y beneficios asociados a la gestión adecuada de las PFU. Dicho método es diseñado para estimar los costos netos adicionales asociados a la gestión correcta en oposición a una gestión incorrecta, donde la PFU termina en un relleno sanitario, relleno manual, vertedero o basural. La estimación se basa en que existen dos cadenas de gestión adecuadas, las PFU terminan en un relleno sanitario o son recicladas.

Tabla 0-4 Costos unitarios, económico y financieros y ambientales, que se propone utilizar, según etapa

Etapa	Costos económicos y financieros		Impactos socioambientales
Recolección (UF/ton)		23.19	-
Transporte (UF/km-ton)		0.002	0.000228e-4
Selección (UF/ton)		5.2	-
Reciclaje (UF/ton)	MnO ₂	36.5	- 0.4
	HgO		
	Ag ₂ O	0	
	Zn-C	36.7	
	Litio	101.4	
	Ni-Cd	18.8	
	Ni-MH	6.7	
	Li-ion	23.2	
Disposición adecuada (UF/ton)		7.00	-
Disposición inadecuada (UF/ton)		Ver Tabla 4-15	Ver Tabla 0-5

Fuente: Elaboración propia

En el caso particular de la **Disposición Inadecuada** se incluye una estimación del rango de los costos evitados, esto puesto que no se cuentan con antecedentes o metodologías suficientemente robustas como para lograr una estimación más específica. Se obtienen resultados según dos “aproximaciones” por costo de reparación y por disposición a pago. Ambos resultados presentan consideraciones particulares; la aproximación por costo de reparación varía según los sitios de disposición final considerados en cada comuna, dado que se considera que los lixiviados generados en rellenos sanitarios son gestionados y luego no sería necesario su tratamiento, y presentan un rango de costo inferior y superior según la tecnología de reparación considerada. Por su parte, los costos de estimación por DAP diferencia entre la cadena de gestión, observándose que la DAP de rellenos de seguridad es mayor que reciclaje.

Tabla 0-5 Costos socioambientales unitarios promedios [UF/ton] por disposición evitada en destino desconocido

Aproximación	Detalle Aproximación	Costo promedio [UF/ton]
Costo Reparación	Rango Inferior	-5.15
	Rango Superior	-27.67
DAP	Reciclaje	-80.70
	Relleno Seguridad	-106.42

Nota: los valores presentados son negativos, puesto que evitar la disposición en destino desconocido significan un ahorro (costos de reparación) o un beneficio (DAP)

Fuente: Elaboración propia

El método desarrollado, e implementado en el software de modelación *Analytica*, considera como insumo principal la variación de PFU que son destinadas a las diferentes cadenas de gestión adecuada, respecto de una situación base. Este insumo debe ser ingresado con el mismo detalle en que se esperan los resultados, esto es la cantidad de PFU (en toneladas por año) según tipo de pilas y acumulador, comuna, año y cadena de gestión. A partir, de dicho insumo se estiman los costos y beneficios para cada una de las etapas de la gestión de pilas identificadas, incluyendo los ahorros por evitar la gestión inadecuada de las PFU. Los resultados de cada una de las etapas son consolidados en un resultado final que, para cada combinación de tipo de pila y acumulador, y comuna, permite observar los resultados para cada cadena de gestión adecuada clasificados según etapa y tipo de impacto.

Para probar el funcionamiento del método propuesto, se simula un enfoque unitario, donde se estiman los costos unitarios de gestionar en cada comuna y para cada tipo de pila y acumulador, 2 toneladas de PFU, una mediante una cadena de reciclaje y otra con una disposición en relleno de seguridad. De esta forma dichos resultados pueden entenderse como los resultados unitarios para cada combinación de cadena de gestión adecuada, comuna y tipo de pilas y acumuladores. Un ejemplo de los resultados obtenidos se presenta en la Figura 0-2, donde se observan los costos netos de reciclaje según etapa para una comuna del país según tipo de pila, y se comparan con los costos netos del relleno de seguridad. Si bien los resultados corresponden a un escenario ficticio, se observan algunas conclusiones interesantes:

- (1) Los costos netos son positivos, en ambas cadenas de gestión y para todas las categorías de pilas. Esto significa que los costos valorizados son mayores a los beneficios valorizados. Sin embargo, estos resultados están limitados por los costos y beneficios que efectivamente pudieron ser valorizados.
- (2) La disposición en relleno de seguridad no presenta diferencias entre las diferentes categorías de pilas (sí lo hace según comuna por concepto de transporte). Esta situación es muy diferente en el caso del reciclaje, donde se observa que la etapa de reciclaje puede variar significativamente entre las diferentes categorías de pilas y acumuladores. Lo anterior responde a los diferentes procesos necesario para el reciclaje, así como el valor de los metales recuperados.
- (3) Las etapas de recolección y reciclaje marcan más del 90% de los costos de la gestión mediante reciclaje de las PFU. En el caso de gestión mediante relleno de seguridad, la recolección representa más del 70% de los costos netos.

(4) El rango de beneficios por disposición en rellenos de seguridad y/o reciclaje en lugar de en destino desconocidos es amplio y está en el mismo orden de los demás costos estimados, aun así, es posible que variables como la alta concentración de metales con impactos comprobados en la PFU o su menor vida corta en comparación con los AEE pudiera resultar en beneficios mayores. Se recomienda un estudio más particular como la estimación de la disposición a pago por la disposición en rellenos de seguridad o reciclaje de las PFU, que permita reducir la incertidumbre respecto de este valor.

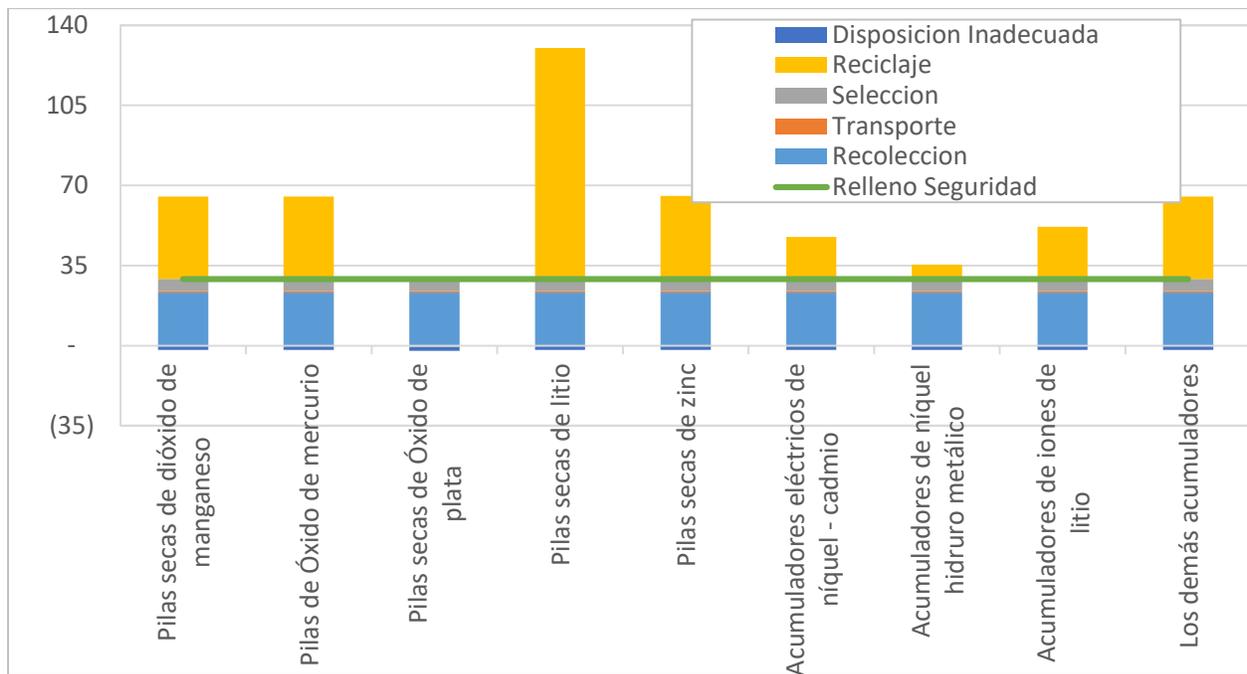


Figura 0-2 Ejemplo de costos netos [UF/año] para comuna Villarrica, gestión mediante reciclaje según etapa de gestión comparada con costos de gestión mediante relleno de seguridad

Fuente: Elaboración propia

Los resultados respecto al costo por tonelada por la gestión de las PFU por medio del reciclaje se encuentran dentro del rango reportado por la literatura revisada. Existe un amplio rango de valores reportados por la literatura, explicados por los diferentes alcances que presenta cada estudio, como también la consideración de las diferentes tipologías de pilas recicladas. Estos valores se sitúan entre las 6.34 y 279.4 [UF/ton], en donde en particular DEFRA (2008) reporta un costo de 54 [UF/ton], valor que se encuentra alineado con los resultados unitarios obtenidos en el presente estudio.

Desde el presente análisis se desprende que una gestión adecuada de las pilas fuera de uso presenta costos cuantificables y monetizables considerablemente altos en comparación a los beneficios cuantificables y monetizables que fueron posibles de incorporar, sin embargo, se debe tener en consideración que estos beneficios representan solo una aproximación base, al solo

incorporar una ganancia ambiental asociada a la reducción de emisiones GEI producto de la no extracción de materia prima virgen en el caso de que la PFU sean recicladas recuperando los metales que las componen. Es importante mencionar que se reconocen los beneficios asociados a la reducción del impacto que tiene la disposición de pilas en rellenos sanitarios y/o disposición desconocida respecto a la salud de los ecosistemas y la salud de la población producto del riesgo de lixiviación y emisión de metales pesados, pero no existe suficiente información para medir y monetizar este impacto (DEFRA, 2008, 2015) como tampoco evidencia que permita incorporar aquellos beneficios no transables en el mercado por medio de estudios de disposición a pago, en particular aquellos asociados a reducir el riesgo hacia el ecosistema y salud de la población de una disposición inadecuada de este tipo de residuos. En este sentido, los resultados del presente análisis son coincidentes con las evaluaciones del tipo costo beneficio encontradas en la experiencia internacional. En las evaluaciones realizadas por DEFRA asociada a la Ley REP de este tipo de residuos para el Reino Unido se concluye una razón costo:beneficio entre 7.6:1 y 11.6:1 respecto a distintos escenarios evaluados (DEFRA, 2008).

1. Antecedentes y justificación del Estudio

El 17 de mayo de 2016 fue promulgada la Ley N° 20.920¹, que establece el marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje (en adelante Ley 20.920). Esta Ley tiene como objetivo "disminuir la generación de residuos y fomentar su reutilización, reciclaje y otro tipo de valorización, a través de la instauración de la responsabilidad extendida del productor y otros instrumentos de gestión de residuos, con el fin de proteger la salud de las personas y el medio ambiente".

La Ley N°20.920 identifica una serie de productos prioritarios, cuyos productores/importadores estarían sujetos a metas de recolección y valorización de sus residuos. Desde la promulgación de la Ley se ha realizado un amplio trabajo liderado por el MMA, en preparación de los diferentes actores (privados, recolectores, valorizadores, y la sociedad en su conjunto), mientras de forma progresiva han ido desarrollando las metas y esquemas REP específicos para cada producto prioritario. Estas metas han sido desarrolladas considerando las particularidades de cada producto prioritario en el contexto chileno, encontrándose en distintas etapas, desde aún en levantamiento de antecedentes base a ya promulgadas.

Corresponde además al MMA, a través del Departamento de Economía Ambiental (en adelante DEA), elaborar un Análisis General de Impacto Económico y Social (AGIES) que determine los costos que implique el cumplimiento del anteproyecto de metas, así como sus principales beneficios. Los AGIES buscan dar una mirada holística de la regulación ambiental a partir de sus impactos socioambientales, en donde se realizan la identificación de los impactos, y en la medida que se pueda, la cuantificación y valorización de estos.

Con el objetivo de dar cumplimiento a este mandato en el marco de las metas para el producto prioritario pilas, el DEA requiere generar información respecto de los costos y beneficios en los que se incurre durante el proceso de manejo de los residuos del producto prioritario en cuestión, así como de los potenciales impactos sociales y/o ambientales que se generan en cada una de las etapas de este proceso. Específicamente, se considera necesario identificar, cuantificar y valorizar (cuando sea posible) los impactos positivos y negativos tanto económicos como sociales y ambientales generados por el establecimiento de metas de recolección y valorización para los residuos de pilas.

¹ Ley Marco Para La Gestión De Residuos, La Responsabilidad Extendida Del Productor Y Fomento Al Reciclaje, <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1090894>

2. Objetivos del estudio

De acuerdo con las bases técnicas, los objetivos de la presente consultoría son los siguientes.

2.1 Objetivo general

Caracterizar el proceso de manejo del residuo prioritario pilas, identificando y estimando los costos y beneficios (impactos) económicos, ambientales y/o sociales asociados al establecimiento de metas de recolección y valorización, en el marco de los contenidos en la Ley 20.920.

2.2 Objetivos específicos

- a) Identificar, describir y estimar en detalle las cantidades de residuos del producto prioritario pilas que han sido catalogadas como “con destino final desconocido”.
- b) Establecer y cuantificar los potenciales costos (impactos negativos) económicos, sociales y ambientales asociados al proceso de manejo del residuo del producto prioritario pilas.
- c) Determinar, cuantificar y valorizar los beneficios económicos y no económicos asociados al proceso de manejo del producto prioritario pilas.

2.3 Alcances del estudio

El presente informe presenta las metodologías y resultados asociados a todas las actividades desarrolladas para dar cumplimiento a los objetivos mencionados. Además del presente informe, los productos del estudio incluyen anexos digitales que incluyen la implementación del método para la estimación de PFU con destino desconocido, así como un modelo para la estimación de los impactos y costos de la correcta gestión de PFU en Analytica, los datos bases de dichos modelos, así como también bases de datos con los resultados sistematizados.

3. Disposición de pilas con destino final desconocido

En este capítulo se presenta una breve descripción y caracterización de los posibles destinos finales de las pilas, las principales categorías de pilas y una estimación de las pilas con destino final desconocido, desagregada a nivel comunal.

3.1 Destinos finales

La presente sección realiza una descripción de los destinos finales posibles. Al respecto cabe destacar que sólo se consideran los destinos finales, sin describir otros posibles destinos intermedios tales como el almacenamiento o la acumulación de pilas en los hogares. Se distinguen dos tipos de destinos finales para las pilas fuera de uso (PFU): los destinos finales con trazabilidad, y aquellos con destinos desconocidos.

3.1.1 Destinos finales con trazabilidad

A continuación, se describen brevemente los posibles destinos finales conocidos identificados para el producto prioritario pilas.

3.1.1.1 Rellenos de seguridad

Un relleno de seguridad es una planta o estructura destinada a la disposición final de residuos peligrosos en el suelo, diseñada, construida y operada cumpliendo los requerimientos específicos señalados en el Reglamento de Sanitario sobre el Manejo de Residuos Peligrosos (MINSAL, 2004).

El proceso de disposición final en un relleno de seguridad ocurre según las siguientes etapas:

- 1) Separación diferenciada de las pilas, aparte de otros residuos.
- 2) Trituración de las pilas.
- 3) Almacenaje de pilas y acumuladores triturados (o en forma completa) en tambores o contenedores especiales, hasta completar su capacidad.
- 4) Inertización mediante el uso de aditivos como cal y/o cemento.
- 5) Disposición de las cápsulas o contenedores en los rellenos de seguridad.

En términos de toneladas dispuestas² los principales gestores autorizados con disposición final en rellenos de seguridad son: Ecobio (59%), Hidronor (33%) y Soluciones Ambientales del Norte (4%)³. La distribución de la disposición de estos residuos en rellenos de seguridad se concentra en dos regiones que cubren el 78% del total dispuesto tal como se presenta en la Figura 3-1.

² Datos de SIDREP 2017 a 2019, levantados por WSP (2020). Considera residuos categorizados como "Pilas" o como "Pilas y otros residuos" sin considerar disposición de intermediarios para evitar doble conteo (ver Sección 3.3.3.1).

³ La fracción restante se divide entre 12 otros gestores de residuos peligrosos, ninguno representa más de un 1% de los residuos de "Pilas" o "Pilas y otros residuos" para el periodo 2017 a 2019.

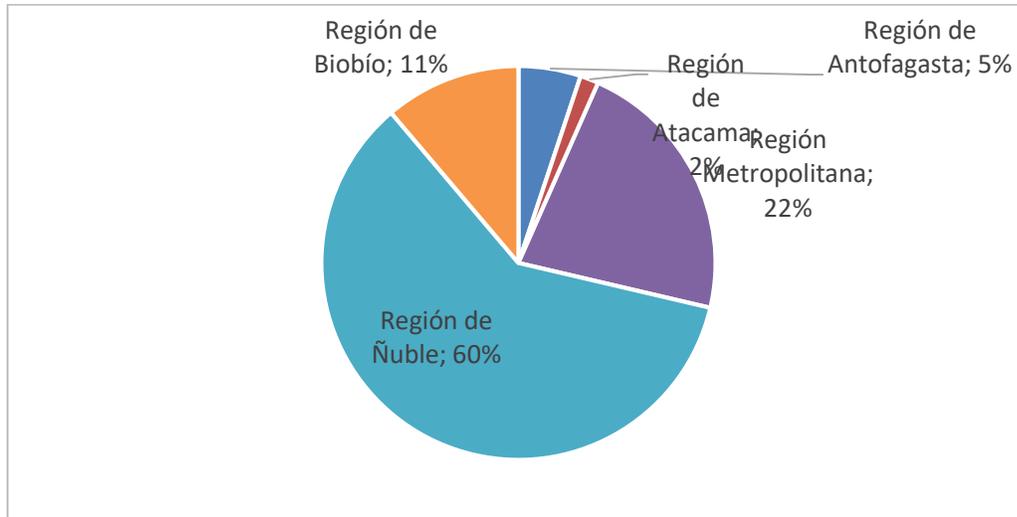


Figura 3-1 Disposición en rellenos de seguridad según región [en base a toneladas dispuestas]

Fuente: Elaboración en base a datos SIDREP 2019 (ver nota al pie 2)

3.1.1.2 Incineración

La incineración es un proceso de destrucción mediante combustión o quema técnicamente controlada de las sustancias orgánicas contenidas en un residuo (MINSAL, 2004). En este tratamiento, la pila llega mezclada con otros residuos, por mala separación de parte de los consumidores o por falta de otras vías de tratamiento.

La incineración para valorización energética es un tipo de tratamiento que destruye gran parte de los materiales en el proceso. Sin embargo, parte de los materiales pueden ser recuperados mediante filtración de emisiones y procesos metalúrgicos de la escoria o ceniza. Así, las etapas de este proceso son las siguientes:

- 1) Pretratamiento, que implica la trituración y ajuste de mezcla de residuos para asegurar poder calorífico
- 2) Incineración, con aprovechamiento energético.
- 3) Tratamiento de las emisiones para recuperar componentes gasificados y controlar las emisiones de escape
- 4) Tratamiento de cenizas para recuperar componentes
- 5) Disposición final de componentes no valorizables

De esta forma, como productos de la incineración se obtiene:

- Energía en forma de calor
- Metales
- Material alternativo para construcción
- Material no valorizable con volumen reducido (en comparación a su estado inicial)

De acuerdo a lo levantado por WSP (2020), la empresa Recycling tiene planes para incluir las pilas en procesos de co-incineración cementera, lo anterior se basa en que “si bien las pilas no tienen mayor valor energético, su volumen marginal dentro de la mezcla hace que no afecte los estándares energéticos requeridos” (WSP, 2020). Al respecto, se observa que, de acuerdo a lo expresado por Cementos Polpaico (Coactiva), las pilas fuera de uso no pueden ser utilizadas en los procesos de co-incineración por limitaciones técnicas donde los metales de las pilas afectarían la calidad y estabilidad del cemento (ver minutas de entrevistas en los anexos digitales). En este sentido, la incorporación de una fracción relevante de pilas fuera de uso en el combustible de los hornos cementeros, no sólo disminuye el poder calorífico del combustible, sino que afecta la calidad y estabilidad del cemento, razón por la que no se considera esta opción como una alternativa de disposición para grandes volúmenes de residuos de pilas.

3.1.1.3 Reciclaje

El reciclaje, según lo estipulado en la Ley 20.920, es el “empleo de un residuo como insumo o materia prima en un proceso productivo, incluyendo el coprocesamiento y compostaje, pero excluyendo la valorización energética”. Estos residuos pueden ser empleados por medio de las operaciones señaladas en el artículo 86 letra B del Decreto Supremo N° 148 de 2004 del MINSAL, para ser utilizados en su forma original o previa transformación, en la fabricación de otros productos en procesos productivos distintos al que los generó. Si bien en este artículo⁴ se mencionan múltiples operaciones relacionadas al reciclaje, a continuación se presentan aquellas que guardan mayor relación con la recuperación del producto prioritario pilas:

1. Recuperación o regeneración de metales y compuestos metálicos.
2. Reciclaje o recuperación de otras materias inorgánicas.
3. Regeneración de ácidos o bases.

El reciclaje es una opción deseable desde el punto de vista del aprovechamiento de recursos naturales, cuya viabilidad depende de diversos factores, incluidos criterios de factibilidad tecnológica y económica, entre otros.

Si bien la literatura en general utiliza distintas etapas, en el presente informe se usarán las siguientes, cuya descripción se detalla en el Anexo 7.2

- 1) Recolección
- 2) Transporte
- 3) Almacenamiento
- 4) Selección y clasificación de las pilas.
- 5) Pretratamiento.
- 6) Reciclaje, con distintos métodos (ej. lixiviación, hidrometalurgia, pirometalurgia, electrometalurgia).
- 7) Disposición

⁴ El artículo completo puede consultarse en: <http://bcn.cl/2f93u> (consultado en noviembre 2020)

En general, para llevar a cabo un proceso de reciclaje pirometalúrgico es necesario primeramente fundir las pilas utilizando un incinerador, para luego separar compuestos metálicos. Por ejemplo, en el caso de las pilas de Li-ion se funden y separan el hierro y cobre mediante un proceso de lixiviación con solventes y posterior precipitado, para finalmente separar el solvente de la mezcla, obteniendo así cobalto y níquel (Dai et al., 2019). Por otro lado, el proceso hidrometalúrgico requiere de una previa trituración y calcinación de las pilas desechadas para una posterior separación física de los productos útiles y la escoria usando filtros y ciclones; luego es posible obtener otros compuestos metálicos aplicando un proceso de lixiviación con solvente, separación y precipitación a la escoria (Dai et al., 2019).

Los gestores que actualmente en Chile podrían realizar valorización de pilas mediante reciclaje son Ecominería, Recybatt y Recopilas. A continuación, se describe el proceso de reciclaje de pilas por parte de cada empresa gestora.

Ecominería

Ecominería SpA⁵ comenzó sus operaciones durante el año 2020 (junio) en la comuna de Lampa, en la región Metropolitana, con el foco en la recuperación de cobalto de acumuladores de ion-litio. Una vez recibidos y pesados los residuos en su planta, estos son pre-procesados para la aplicación de un proceso hidrometalúrgico. Cuenta con una capacidad para el procesamiento de 10 toneladas de acumuladores por mes, pero se plantea que puede ser escalable de forma relativamente sencilla. Actualmente están con un nivel de procesamiento promedio cercano a 1 t/mes, el cual está limitado por la disponibilidad de acumuladores. Los acumuladores que procesan provienen de gestores intermediarios de estos productos, principalmente de la Fundación Chilenter y Degraf, pero se están buscando nuevas oportunidades para aumentar el volumen de acumuladores recibidos. En la actualidad, el precio que se paga por los residuos recepcionados en la planta está en torno a 1000 CLP/kg por acumuladores de celulares y *tablets*, y 750 CLP/kg por acumuladores de computadores portátiles, siendo la diferencia explicada por la proporción de metales en los acumuladores.

En su proceso recuperan cobalto con trazas de cobre, que es comercializado dentro del país. En particular el cobalto recuperado tiene un alto valor y es comprado por las mineras para su uso, mientras que otros residuos de plásticos mezclados con metales como cobre y hierro son vendidos a empresas que se dedican a su posterior exportación.

Como se indicó, su procesamiento está limitado por la disponibilidad de acumuladores, y su capacidad sería fácilmente escalable de existir una mayor oferta de los residuos que tratan. Los bajos volúmenes de producción actual son una barrera, dado que las mineras requieren un

⁵ Lo descrito se basa en la información descrita en WSP (2020) y complementada con la entrevista realizada el 23 de noviembre de 2020. La minuta de esta última entrevista puedes ser consultada en los anexos digitales del presente informe.

suministro significativamente mayor, sin embargo, actualmente existe un acuerdo para venta con la Minera Centinela (Antofagasta Minerals), sujeto a la aprobación de pruebas de calidad.

Recybatt

Recybatt⁶, empresa ubicada en la región de Atacama, que cuenta con el apoyo de la Universidad de Atacama, se enfoca en el reciclaje de pilas alcalinas y la comercialización de la materia prima resultante. Una vez en la planta, las pilas se segregan por composición y por tamaño. Tras esto se procede al desarme, y al lavado de impurezas. Finalmente, mediante lixiviación, se recupera dióxido de zinc, manganeso y chatarra ferrosa, los cuales son vendidos a empresas relacionadas con la minería. Recybatt cuenta con una planta piloto funcional, donde procesan actualmente 300-600 kg/mes de residuos y con una capacidad esperada de 1 t/mes. A diferencia de Ecominería, la gestión de la recolección de pilas es realizada directamente por Recybatt, la cual se realiza mediante contenedores enviados por sus clientes o con recolección de los contenedores dispuestos en puntos verdes. El precio de recepción y tratamiento es de 10 UF/ton.

Se recuperan tanto Zn como Mn, además de chatarra, y aún se encuentra a nivel de investigación la posibilidad de recuperar Li. Sin perjuicio de esto se espera ampliar la oferta de procesamiento para incluir otras pilas, como pilas botón, o acumuladores. Los productos de la valorización son potencialmente utilizados por la minería, así como por la industria farmacéutica y pinturas.

Recopilas

Recopilas⁷ operó entre el año 2003 y 2007, en la región Metropolitana, desarrollando una planta piloto con una tecnología para recuperar metales a partir de residuos peligrosos, mediante el cual recuperaron zinc a partir de pilas de zinc-carbón, y también de otros residuos. La tecnología desarrollada corresponde a un proceso electrometalúrgico en base alcalina para la obtención de metales de alta pureza (zinc a 95%). En el caso de las pilas, una vez recibidos los residuos, realizan un pretratamiento que incluye la separación de las pilas según su composición química (contenido de metales), luego realizan un chancado y proceden al proceso hidrometalúrgico en sí. La lixiviación en base alcalina tiene la ventaja de generar menores RILes (menos del 1%), ya que se recupera la soda cáustica utilizada, mientras que entre sus desventajas, se destaca que esta técnica tiene una menor tasa de recuperación y requiere mayor temperatura, mayor presión y más tiempo de agitación que la lixiviación en base ácida y, por lo anterior, mayores medidas de seguridad. De existir una oferta mucho mayor de los tipos de PFU que pueden procesar, podrían implementar la planta nuevamente, con un precio por tratamiento de alrededor de 6 USD/kg de pilas.

⁶ Lo descrito se basa en la información descrita en WSP (2020), dado que no fue posible gestionar una entrevista con Recybatt en el contexto de este estudio.

⁷ Lo descrito se basa en la información descrita en WSP (2020) y complementada con la entrevista realizada el 20 de noviembre de 2020. La minuta de esta última entrevista puedes ser consultada en los anexos digitales del presente informe.

3.1.2 Destinos desconocidos

A continuación, se describen brevemente los posibles destinos finales identificados como desconocidos, es decir, posibles sitios de disposición final de los residuos del producto prioritario pilas, cuya trazabilidad no ha podido ser identificada, los cuales incluyen rellenos sanitarios, rellenos manuales, vertederos y basurales. En la siguiente tabla se presenta la estimación del destino de los residuos sólidos domiciliarios y asimilables (RSDyA) según sitio de disposición final (SDF) para cada región.

Tabla 3-1 Distribución de los RSDyA según SDF por región en el año 2018

Región	Basural	Vertedero	Relleno Manual	Relleno Sanitario	Total
(XV) Arica y Parinacota	0%	100%	0%	0%	100%
(I) Tarapacá	1%	98%	2%	0%	100%
(II) Antofagasta	0%	76%	0%	24%	100%
(III) Atacama	10%	0%	0%	90%	100%
(IV) Coquimbo	0%	44%	0%	56%	100%
(V) Valparaíso	0%	9%	0%	91%	100%
(XIII) Metropolitana de Santiago	0%	2%	0%	98%	100%
(VI) Libertador General Bernardo O'Higgins	0%	0%	0%	100%	100%
(VII) Maule	0%	5%	0%	95%	100%
(XVI) Nuble	0%	0%	0%	100%	100%
(VIII) Biobío	1%	13%	0%	86%	100%
(IX) La Araucanía	10%	58%	19%	13%	100%
(XIV) Los Ríos	5%	95%	0%	0%	100%
(X) Los Lagos	21%	45%	0%	34%	100%
(XI) Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo	15%	31%	0%	54%	100%
(XII) Magallanes y de la Antártica Chilena	54%	46%	0%	0%	100%
Promedio Nacional	2%	19%	0%	78%	100%

Fuente: (SUBDERE, SGS, & SIGA, 2018)

3.1.2.1 Relleno sanitario

Un relleno sanitario es una instalación de eliminación de residuos sólidos en la cual se disponen residuos sólidos domiciliarios y asimilables, diseñada, construida y operada para minimizar molestias y riesgos para la salud y la seguridad de la población y daños para el medioambiente. En ellos las basuras son compactadas en capas al mínimo volumen practicable y son cubiertas diariamente, cumpliendo con las disposiciones del Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios del Ministerio de Salud (MINSAL, 2008).

3.1.2.2 Relleno manual

Un relleno manual o relleno sanitario manual es un relleno sanitario donde la construcción de celdas se realiza manualmente, cumpliendo con los requisitos establecidos por Decreto Supremo

N° 189 de 2008 del MINSAL (MINSAL, 2008). La construcción de este tipo de sitio de disposición final está autorizada solamente en territorios insulares o localidades aisladas con poblaciones inferiores a 20.000 habitantes, distantes en un radio de más de 50 kilómetros de cualquier otra localidad que cuente con relleno sanitario, y siempre que para la zona en que se encuentre ubicada la localidad no se haya formulado un plan regional y/o provincial para el manejo de los residuos sólidos urbanos que la incorpore.

3.1.2.3 Vertedero

Un vertedero es un lugar de disposición final de residuos que fue planificado para ese uso, pero que no cuenta con las medidas sanitarias mínimas establecidas en el Decreto Supremo N° 189 de 2008 del MINSAL (MINSAL, 2008), por esta razón, en general, es foco de problemas ambientales (SUBDERE et al., 2018).

3.1.2.4 Basural

El Basural es un lugar en el que se disponen residuos, ya sea en forma espontánea o programada, sin ningún tipo de control sanitario ni protección ambiental (SUBDERE et al., 2018).

3.2 Categorías de pilas

La categorización de pilas a utilizar en el presente estudio considera tres aspectos relevantes:

- El nivel de detalle de la información base disponible. Con el fin de que el estudio cumpla con los objetivos planteados en la Sección 2, el nivel de resolución máximo del estudio estará limitado por el máximo detalle disponible en el estudio base para la presente consultoría: “Asesoría para la implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor en Chile - Producto Prioritario Pilas” (WSP, 2020).
- La posible diferenciación de los impactos (positivos y negativos) sociales, ambientales y económicos. La categorización de pilas utilizada debe ser capaz de diferenciar las pilas, en un nivel razonable, si es que cuentan con impactos diferentes. Por impactos, se refieren a los impactos en al menos toda la cadena de gestión de los residuos incluyendo tanto los impactos de disposición inadecuada, como los impactos de correcta disposición.
- Las posibles diferencias en las tendencias observadas. En un ejercicio de modelación de las consecuencias del impacto de un sistema REP, es relevante reconocer las diferentes tendencias, las cuales podrían tener impacto sobre los beneficios y costos estimados.

A continuación, se describen los aspectos relevantes que terminan en la propuesta de categorización de pilas presentada en la Sección 3.2.4.

3.2.1 Nivel de detalle de información base disponible

El estudio de WSP (2020) realiza una estimación del consumo de pilas con la cual desarrolla una serie de otros productos a partir de la información disponible en los registros de importaciones registradas por el Servicio de Aduanas, bajo la partida arancelaria 85.06 “Pilas y Baterías de pilas,

Eléctricas” y 85.07 “Acumuladores eléctricos, incluidos sus separadores aunque sean cuadrados o rectangulares”. Dichas partidas arancelarias se desagregan a continuación en 15 códigos arancelarios de interés, bajo los que son importadas las diferentes pilas consideradas en la línea base.

Tabla 3-2 Detalle de la información disponible en estudio base

Cód. Arancelario	Nombre Cód. Arancelario
8506.1010	Pilas secas de dióxido de manganeso, de tensión nominal de 1.5 volt (alcalinas)
8506.1090	Las demás pilas secas de dióxido de manganeso (alcalinas)
8506.3000	Pilas de óxido de mercurio
8506.4010	Pilas secas de óxido de plata, de tensión nominal de 1.5 volts
8506.4090	Las demás pilas secas de óxido de plata
8506.5010	Pilas secas de litio, de tensión nominal de 1.5 volts
8506.5090	Las demás pilas secas de litio
8506.6010	Pilas secas de aire-zinc, de tensión nominal de 1.5 volts
8506.6090	Las demás pilas secas de aire zinc
8506.8010	Las demás pilas secas y baterías de pilas de tensión nominal de 1.5 volts (Zn carbón u otras)
8506.8090	Las demás pilas (Zn carbón u otras)
8507.3000	Acumuladores eléctricos de níquel - cadmio
8507.5000	Acumuladores de níquel hidruro metálico
8507.6000	Acumuladores de iones de litio
8507.8000	Los demás acumuladores

Fuente: (WSP, 2020) a partir de Servicio Nacional de Aduanas

Un análisis de los códigos arancelarios presentados en la Tabla 3-2 permite observar que las partidas importadas se diferencian según tres características:

- Tipo de pila: se distinguen las pilas primarias (clasificadas como pilas secas o pilas) e importadas por la partida arancelaria 85.06, de las pilas secundarias (clasificadas como acumuladores) e importada por la partida arancelaria 85.07.
 - Pilas primarias: Son aquellas que se agotan, por el tipo de reacción electroquímica que utilizan, y no son recargables. Algunos ejemplos de este tipo de pilas son:
 - Pilas secas de dióxido de manganeso (alcalinas)
 - Pilas secas de óxido de mercurio
 - Pilas secas de óxido de plata
 - Pilas secas de zinc o zinc-carbono
 - Pilas secas de litio
 - Pilas secundarias: Son aquellas que son recargables, dado que su composición permite una reacción química reversible. Para comenzar a funcionar requieren una carga de energía eléctrica inicial, la cual puede haberse realizado antes de su venta, o no. Algunos ejemplos de este tipo de pilas son:
 - Acumuladores de níquel - cadmio
 - Acumuladores de níquel-hidruro metálico
 - Acumuladores de iones de litio

- Los demás
 - Principal componente: las pilas se distinguen principalmente por el principal metal contenido y que describe la química de su operación. En particular se observan: dióxido de manganeso, óxido de mercurio, óxido de plata, litio, zinc, níquel-cadmio, níquel-hidruro metálico y otros. En la Tabla 3-3 se presenta una descripción de las composiciones químicas más comunes para cada tipo de pila, tanto primarias como secundarias.

Tabla 3-3 Composición química de los principales tipos de pila

Tipo de pila	Cátodo	Ánodo	Electrolito
Pilas primarias			
Pila de dióxido de manganeso (alcalina) – MnO₂	Dióxido de manganeso (MnO ₂)	Zinc (polvo)	Electrolito alcalino de hidróxido de potasio (KOH)
Pila de óxido de mercurio – HgO	Óxido de mercurio (HgO), mezclado con grafito o con dióxido de manganeso (MnO ₂)	Zinc	Electrolito alcalino de hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH)
Pila de óxido de plata – Ag₂O	Óxido de plata (Ag ₂ O)	Zinc	Electrolito alcalino de hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH)
Pila de zinc-carbono – Zn-C	Mezcla de MnO ₂ y polvo de carbón	Zinc (cápsula)	Solución de cloruro de zinc (ZnCl ₂) y cloruro de amonio (NH ₄ Cl)
Pila de litio – Litio	Dióxido de manganeso (MnO ₂)	Litio metálico	Sal de litio, generalmente en solvente orgánico.
Pilas secundarias			
Acumulador de níquel - cadmio – Ni-Cd	Cadmio (Cd) metálico	Oxihidróxido de níquel (NiOOH)	Electrolito alcalino, generalmente hidróxido de potasio (KOH)
Acumulador de níquel-hidruro metálico – NiMH	Aleación de hidruro metálico (Ni-MH)	Oxihidróxido de níquel (NiOOH)	Electrolito alcalino, generalmente hidróxido de potasio (KOH)
Acumulador de iones de litio – Li-ión	Varias opciones: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Óxido de litio-cobalto (LiCoO₂) ▪ Litio-ferrofosfato (LiFePO₄) ▪ Óxido de litio y manganeso (LiMn₂O₄) ▪ Óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (LiNiMnCoO₂) 	Grafito de litio (LiC ₆), generalmente.	Sal de litio, generalmente en solvente orgánico.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Karnchanawong & Limpitprakan, 2009)

- Tensión eléctrica nominal: las pilas primarias en particular se pueden distinguir según el voltaje (tensión eléctrica) que entregan. Así, estas se dividen entre aquellas con tensión eléctrica nominal de 1.5 V y el resto de las pilas. Al respecto, típicamente corresponden a pilas con una tensión eléctrica mayor, pero dada la definición del código arancelario, eventualmente podían ser pilas con menor voltaje.

Dado lo anterior, es importante destacar que no se podría realizar una clasificación más detallada que la disponible en los tres criterios de clasificación en que viene la información base del Servicio Nacional de Aduanas. Lo anterior descarta la opción de otras clasificaciones posibles tal como tamaño, peso o forma volumétrica. Una descripción de los diferentes campos de información de las pilas se presenta en la Tabla 3-4. Esta tabla da cuenta de la variedad de características bajo las cuales podrían clasificarse las pilas de contarse con información más detallada que la provista por el Servicio Nacional de Aduanas.

Tabla 3-4 Descripción comercial para diferentes pilas clasificadas según tamaño

Clasificación comercial	Masa unitaria promedio (g)	Voltaje (V)	Composición	Forma volumétrica
76A	-	1.5 V	Pila seca de MnO ₂ , alcalina	Botón
9V	45	1.5 V	Pila seca de MnO ₂ , alcalina	Rectangular
	45	1.5 V	Pila seca de Zn-aire	Rectangular
	45	1.5 V	Pila seca de zinc-carbón u otras	Rectangular
A23	40	12.0 V	Pila seca de MnO ₂ , alcalina	Cilíndrica
A27	50	12.0 V	Pila seca de MnO ₂ , alcalina	Cilíndrica
AA	24	1.5 V	Pila seca de MnO ₂ , alcalina	Cilíndrica
	24	1.2 V	Acumulador de Ni-Cd	Acumulador
	24	1.2 V	Acumulador de Ni-MH (*)	Acumulador
	24	3.6 V	Acumulador de Li-ion	Acumulador
AAA	13	1.5 V	Pila seca de MnO ₂ , alcalina	Cilíndrica
	14	1.5 V	Pila seca de zinc-carbón u otras	Cilíndrica
	13	1.5 V	Otras pilas secas de Litio	Cilíndrica
	13	1.2 V	Acumulador de Ni-Cd	Acumulador
	13	1.2 V	Acumulador de Ni-MH (*)	Acumulador
	15	3.6 V	Acumulador de Li-ion	Acumulador
BOTON	3	1.5 V	Pila seca de MnO ₂ , alcalina	Botón
	3	3.0 V	Otras pilas secas de Litio	Botón
	3	1.5 V	Pila seca de Ag ₂ O	Botón
	4	1.5 V	Pila seca de Zn-aire	Botón
C	60	1.5 V	Pila seca de MnO ₂ , alcalina	Cilíndrica
D	116	1.5 V	Pila seca de MnO ₂ , alcalina	Acumulador
N	10	1.5 V	Pila seca de MnO ₂ , alcalina	Cilíndrica
ND	89	1.5 V	Pila seca de MnO ₂ , alcalina	Cilíndrica

(*) Níquel-hidruro metálico

Los valores presentados pueden variar de pila en pila, la información presentada muestra una descripción genérica para los diferentes tamaños de pilas.

Fuente: Elaboración propia en base a (WSP, 2020)

3.2.2 Diferenciación de impactos (costos y beneficios)

Respecto a los impactos sociales, ambientales y económicos, se ha realizado una revisión de múltiples estudios e investigaciones internacionales que puedan dar cuenta de las diferencias en los costos según categorías de pilas. En este respecto se seleccionaron 12 estudios que, si bien ninguno incluye una revisión exhaustiva de todos los impactos sociales, ambientales y

económicos para todos los tipos de pilas, sí entregan información alineada con los objetivos del presente estudio (ver introducción a la Sección 4 para un barrido preliminar de los estudios disponibles, en particular la Tabla 4-1).

Se observa que los estudios son disimiles respecto a las pilas incluidas y los impactos considerados, sin embargo, que los costos de tratamiento y los principales impactos sociales y ambientales identificados están asociados a la composición química o al tipo de pilas (ejemplo botón, alcalina), el cual también se relaciona con el tipo de metal que se puede recuperar. Lo anterior es consistente con la información de los gestores que realizan el reciclaje de las PFU, quienes también han focalizado sus procesos en el tratamiento de determinados tipos de pilas (ver Sección 3.1.1.3), según los materiales que pueden rescatar del procesamiento.

En vista de lo anterior, se considera relevante mantener el detalle del principal componente como un criterio de clasificación, puesto que es esperable que los costos (y beneficios) de tratamiento dependan de los metales que se puedan recuperar.

3.2.3 Tendencias observadas

Respecto a las tendencias observadas, WSP (2020) realiza un análisis de las tendencias con el objetivo de obtener insumos para proponer una proyección de las importaciones de pilas. Al respecto, si bien las pilas de diferentes componentes tienen tendencias individuales, se observa que existe una tendencia más clara al observar los datos diferenciando entre pilas primarias, observable en la Figura 3-2, y secundarias (acumuladores), observables en la Figura 3-3. Se observa que ambos tipos de pilas tienen tendencias diferentes, donde mientras las pilas primarias tienden a reducir su participación, los acumuladores tendrían una tendencia al crecimiento.

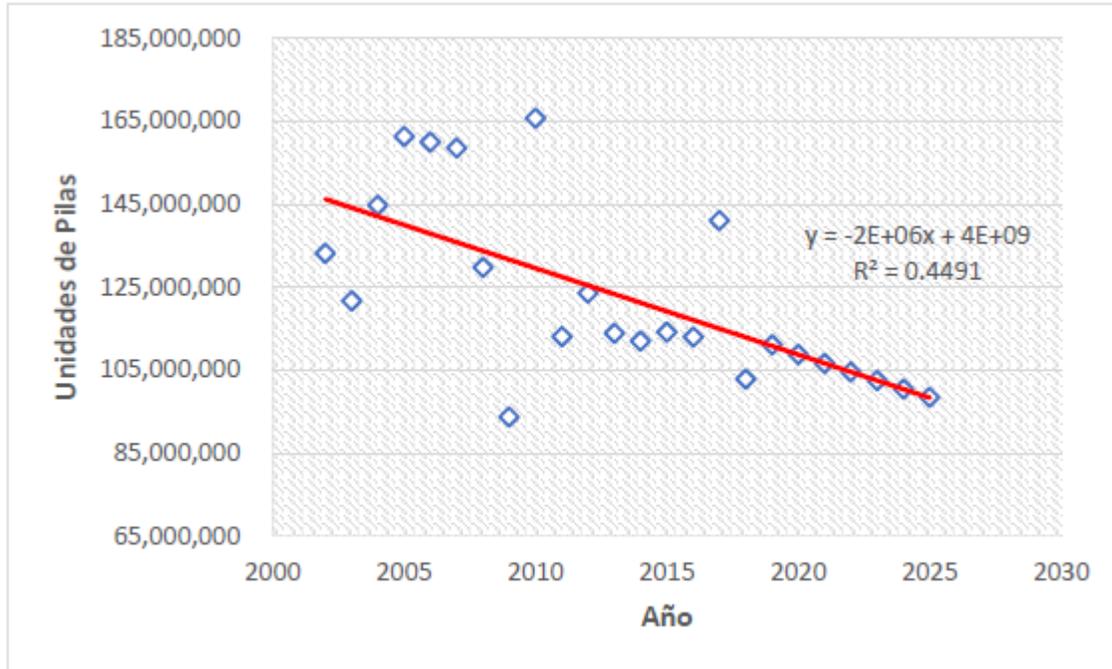


Figura 3-2 Tendencia de pilas primarias y proyección [unidades importadas/año]

Fuente: (WSP, 2020)

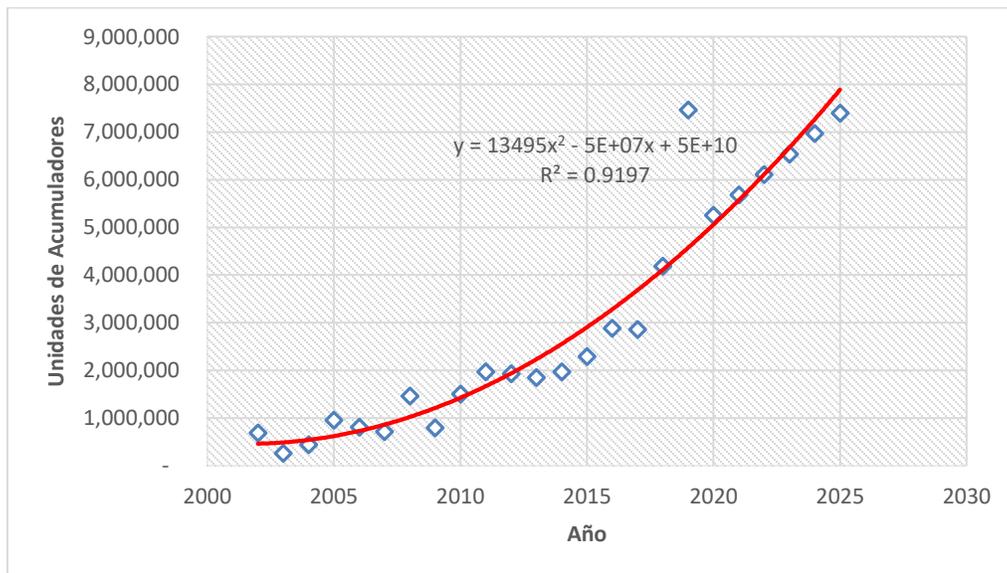


Figura 3-3 Tendencia de pilas secundarias y proyección [unidades importadas/año]

Fuente: Elaboración propia

3.2.4 Propuesta de categorización de pilas

De acuerdo a lo expuesto, la categorización está limitada por el nivel de desagregación de los datos originales de aduanas. Estos distinguen tres niveles de clasificación posible:

- Principal componente
- Categorización primaria y secundaria
- Tensión de pilas

Respecto al **principal componente**, se argumenta que para la elaboración de una evaluación económica de la implementación de una normativa sobre las pilas es relevante considerar este nivel de clasificación, puesto que parte de los beneficios y costos de tratamiento (o no tratamiento) dependen de los elementos que componen las pilas. De esta forma, en algunas pilas el proceso de reciclaje va a estar enfocado en la recuperación de Manganeso, Zinc, Cobalto o Litio, dependiendo de la composición de las pilas, mientras que los riesgos ambientales también dependerán variando en su magnitud según los elementos que sean mal dispuestos. En consideración de lo anterior se **opta por mantener este nivel de desagregación**.

Respecto a la **categorización de primaria y secundaria** de las pilas, si bien no tiene injerencia directa sobre los impactos ambientales y sociales (asociado a la composición), se considera que las diferencias entre los modos de operación, tamaños y tiempo de residencia de las pilas primarias con las secundarias son suficientemente altas para justificar una diferenciación por esta categoría. Esta diferenciación es relevante cuando se realicen los supuestos de proyección del consumo de pilas y la generación de PFU. Lo anterior adquiere especial relevancia al considerar las tendencias inversas observadas entre pilas y acumuladores. Por estos motivos, se decide **mantener este nivel de desagregación**.

De los 12 estudios sobre impactos (costos y beneficios) asociados a la disposición de pilas, ninguno hace distinción por **tensión de las pilas**. Si bien, la tensión de la pila podría ser utilizada posteriormente para la realización de supuestos más finos como la composición en término de materiales de las pilas, en principio se considera **no necesario** incluir este nivel de desagregación

De esta forma la categorización propuesta de pilas para el presente estudio y su relación con la información base utilizada en el estudio de WSP (2020) se presenta en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5 Código arancelarios contabilizados en estudio base y agrupación en categorías propuestas de pilas

Cód. Arancelario	Nombre Cód. Arancelario	Categoría de Pilas
8506.1010	Pilas secas de dióxido de manganeso, de tensión nominal de 1,5 volt (alcalinas)	Pilas secas de dióxido de manganeso
8506.1090	Las demás pilas secas de dióxido de manganeso (alcalinas)	
8506.3000	Pilas de óxido de mercurio	Pilas de óxido de mercurio
8506.4010	Pilas secas de óxido de plata, de tensión nominal de 1,5 volts	Pilas secas de óxido de plata
8506.4090	Las demás pilas secas de óxido de plata	
8506.5010	Pilas secas de litio, de tensión nominal de 1,5 volts	Pilas secas de litio
8506.5090	Las demás pilas secas de litio	
8506.6010	Pilas secas de aire-zinc, de tensión nominal de 1,5 volts	Pilas secas de zinc
8506.6090	Las demás pilas secas de aire zinc	
8506.8010	Las demás pilas secas y baterías de pilas de tensión nominal de 1,5 volts (Zn carbón u otras)	
8506.8090	Las demás pilas (Zn carbón u otras)	
8507.3000	Acumuladores eléctricos de níquel - cadmio	Acumuladores eléctricos de níquel - cadmio
8507.5000	Acumuladores de níquel hidruro metálico	Acumuladores de níquel hidruro metálico
8507.6000	Acumuladores de iones de litio	Acumuladores de iones de litio
8507.8000	Los demás acumuladores	Los demás acumuladores

Fuente: Elaboración propia

3.3 Estimación de PFU con “destino final desconocido”

La estimación de las pilas fuera de uso (PFU) con destino final desconocido se basa en una estimación secuencial de variables intermedias que permiten la caracterización del proceso que ocurre desde la importación⁸ hasta la disposición según destino de las PFU.

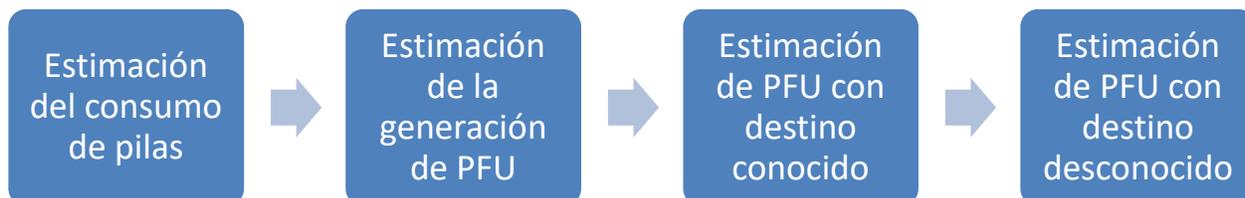


Figura 3-4 Etapas de metodología general

Fuente: Elaboración propia

La primera etapa del método es la estimación del consumo de pilas, la cual corresponde a la sistematización de la información proveniente del estudio “Asesoría para la implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor en Chile – Producto Prioritario Pilas” (WSP, 2020), el cual se basa en la información registrada en el Servicio Nacional de Aduanas. A partir de dicha información se estima la generación de PFU a nivel comunal, descrita por la Ecuación 1. La estimación de cuántas de estas PFU terminan en un destino conocido se obtiene desde las bases de datos de SIDREP del Ministerio de Salud, información que es complementada con la aplicación de una encuesta a los diferentes municipios del país que permite caracterizar la recolección municipal. La diferencia entre la generación de PFU y las PFU con destino conocido, son por definición las PFU con destino desconocidos (Ecuación 2). La distribución de estas según diferentes destinos se realiza bajo el supuesto de que no existen antecedentes para suponer un destino diferente al del resto de los residuos domiciliarios y luego sigue sus mismos destinos (ver Ecuación 3).

Ecuación 1 Estimación general de generación de PFU

$$PFU_{Generadas} = f(\text{Consumo de pilas})$$

Ecuación 2 Estimación general de PFU con destino desconocido

$$PFU_{Dest\ Desconocido} = PFU_{generadas} - PFU_{Dest\ Conocido}$$

⁸ Los antecedentes previos coinciden en que en Chile no hay producción de pilas.

Ecuación 3 Estimación general de PFU con destino desconocido por SDF

$$PFU_{Dest\ Desconocido}^{tipo\ SDF} = PFU_{Dest\ Desconocido} * \frac{Recolección_{Municipal}^{tipoSDF}}{\sum_{tipo\ SDF} Recolección_{Municipal}^{tipoSDF}}$$

El método a detallarse a continuación se implementa en el software *Analytica* el cual presenta ventajas para este tipo de modelaciones. En particular ante una modelación con un alto grado de incertidumbre, como la presente, el *software* permite con relativa facilidad la modelación basada en escenarios. Estos escenarios son utilizados con dos objetivos en el presente informe, por un lado, se utilizan para la sensibilización frente a supuestos con impactos directos y, por otro lado, se utilizan para obtener un rango de estimaciones en situaciones donde se cuenta con alternativas metodológicas.

Tabla 3-6 Resumen de escenarios modelados

Etapa	Escenarios	Descripción breve
Estimación del consumo de pilas	Enfoque Tiempo	Diferencias en los supuestos bases para el paso de la estimación del consumo a la generación de PFU
Estimación de PFU con destino desconocido	Escenarios SIDREP	Diferencias en el supuesto de cuales categorías de residuos en SIDREP son consideradas como PFU con destino conocido

Fuente: Elaboración propia

3.3.1 Estimación consumo de pilas

Tal como se plantea en la Sección 3.2.1, la estimación del consumo se realiza directamente desde los resultados del estudio “Asesoría para la implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor en Chile – Producto Prioritario Pilas” (WSP, 2020), el cual cuenta con un nivel de detalle asociado a las partidas arancelarias. Las importaciones son agrupadas en 9 categorías de pilas, según lo descrito en la Sección 3.2.4, las cuales son definidas a partir del elemento principal y el tipo de pilas (primaria o secundaria).

La serie de tiempo del consumo (importaciones) de pilas desde el año 2002 al 2019 se presenta en la Figura 3-5. Se observa que las importaciones se han mantenido desde el 2011 en el rango de 100 y 125 millones de pilas importadas, aunque mirando un periodo más largo se observa una suave tendencia a la reducción de la importación de pilas. Al observar la serie llaman la atención importaciones puntuales el año 2004 (pilas secas de litio) y 2008 (pilas secas de zinc), donde se observan discontinuidades muy marcadas que podrían deberse a errores puntuales en el registro, consolidación o procesamiento de los datos de importaciones. La revisión de dicha información se escapa del alcance de la presente consultoría.

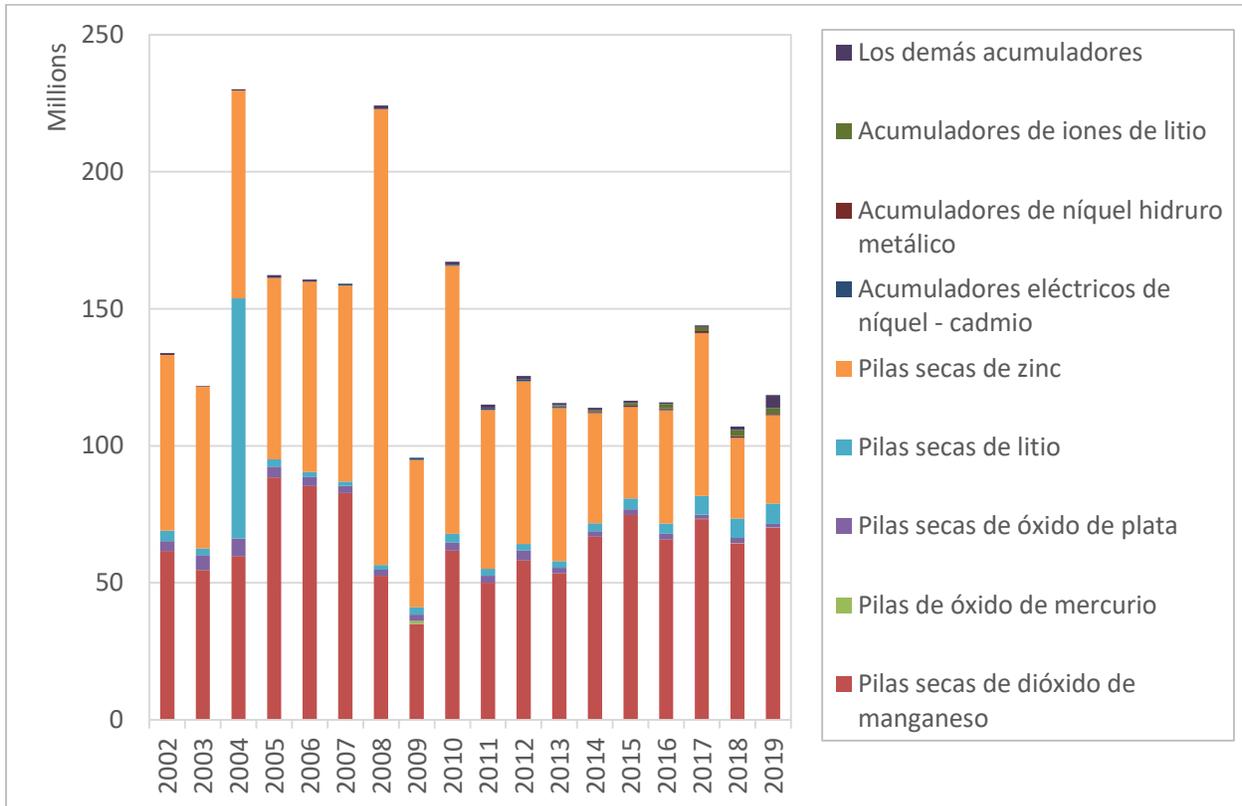


Figura 3-5 Serie de tiempo importaciones de pilas [unidades] 2002-2019

Fuente: Elaboración propia en base a (WSP, 2020)

Se observa que el volumen de consumo de pilas primarias es de tal magnitud que las pilas secundarias o acumuladores representan una fracción comparativamente muy menor en comparación a las pilas primarias. En particular, en el año 2019 - el año con el mayor consumo de acumuladores -, las importaciones de pilas primarias fueron el 94% de las pilas totales importadas.

Respecto a los tipos de pilas primarias se observa que durante todo el período dos tipos de pilas han representado la mayor parte de las importaciones: pilas secas de dióxido de manganeso y pilas secas de zinc. En la Figura 3-6 se presenta el detalle para un mediano plazo (diez años entre 2010 y 2019) y corto plazo (3 años entre 2017 y 2019). Se observa que, si bien se han mantenido las agrupaciones principales, en el corto plazo ha disminuido la participación de pilas secas de Zinc, aumentando en cambio, la participación de las pilas de dióxido manganeso y las pilas de litio.

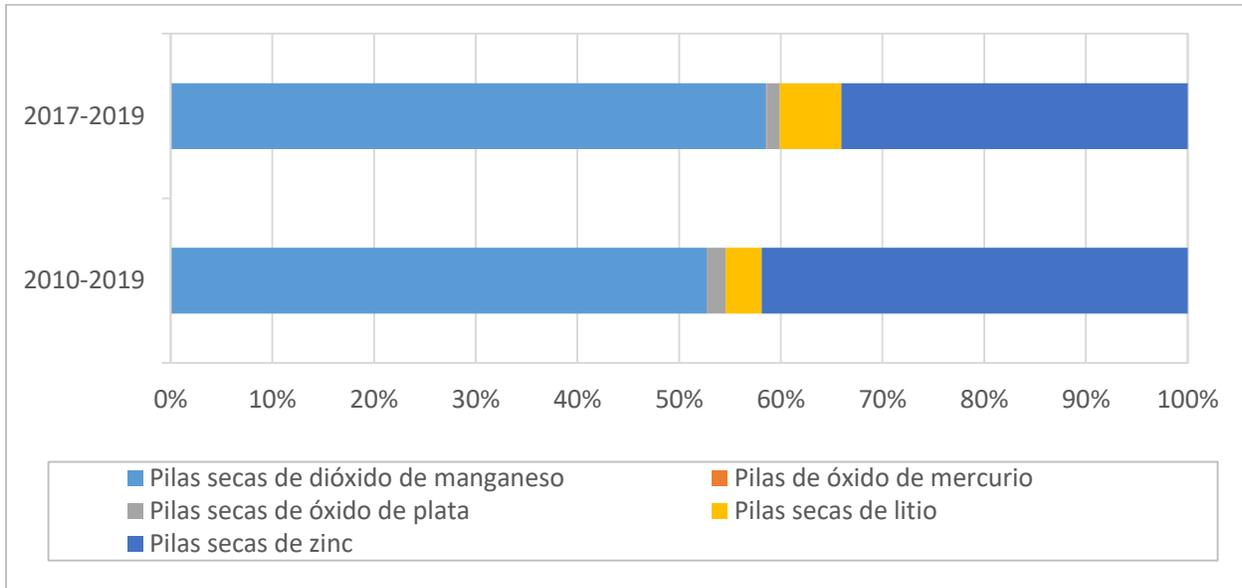


Figura 3-6 Distribución de consumo de pilas primarias periodo 2010-2019 y 2017-2019

Fuente: Elaboración propia en base a (WSP, 2020)

En la Figura 3-7 se presenta la distribución del consumo de acumuladores en los mismos horizontes. Se observa que la categoría “los demás acumuladores” mantiene una participación relativamente constante, mientras que los acumuladores de iones litio han aumentado su participación de forma relevante en desmedro, principalmente de los acumuladores de Ni-Cd. De esta forma, el primer año con registro de importaciones de acumuladores de ion litio es el año 2012 con 52 mil unidades, y para 2019 las importaciones ya superaban los 2 millones de unidades.

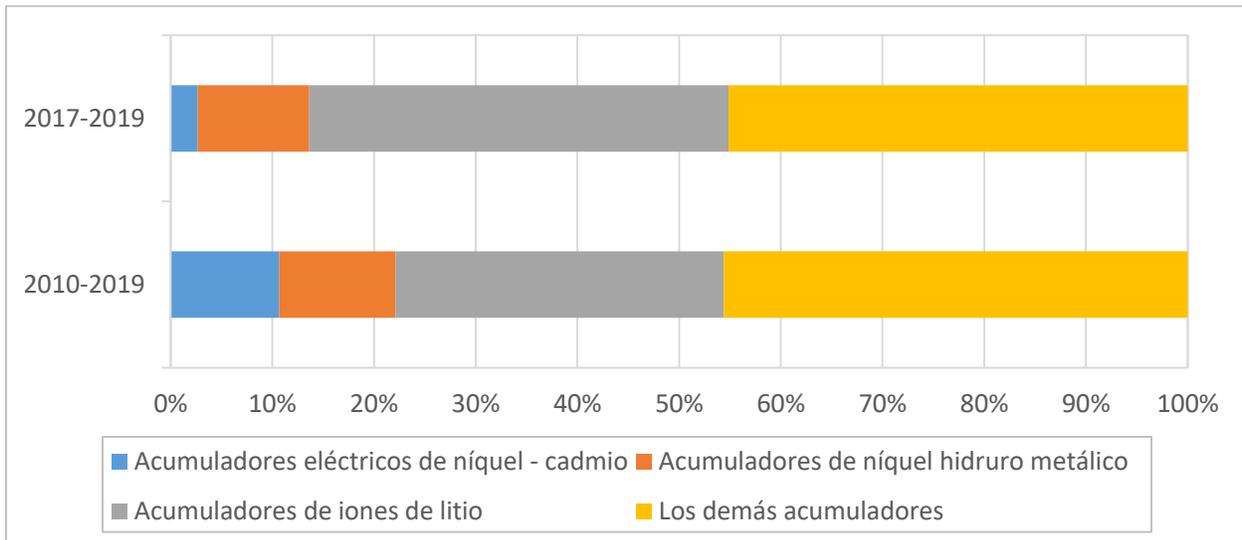


Figura 3-7 Distribución del consumo de acumuladores en el periodo 2010-2019 y 2017-2019

Fuente: Elaboración propia en base a (WSP, 2020)

El estudio de WSP también presenta proyecciones, para lo cual se probaron diferentes modelos de proyección, observándose que una proyección tendencial resultó ser aquella seleccionada en los resultados de proyección. Esta proyección considera la sustitución de los datos *outliers* mencionados anteriormente (pilas secas litio 2004 y pilas secas zinc 2008) además de las pilas de óxido de mercurio 2009, que eran un *outlier* en su serie específica. Los resultados de esta proyección se presentan en la Figura 3-8, donde se observa que se espera una reducción de las importaciones totales de pilas, impulsadas por reducción del consumo de pilas seas de zinc y contrarrestada por las pilas de litio (primarias y secundarias).

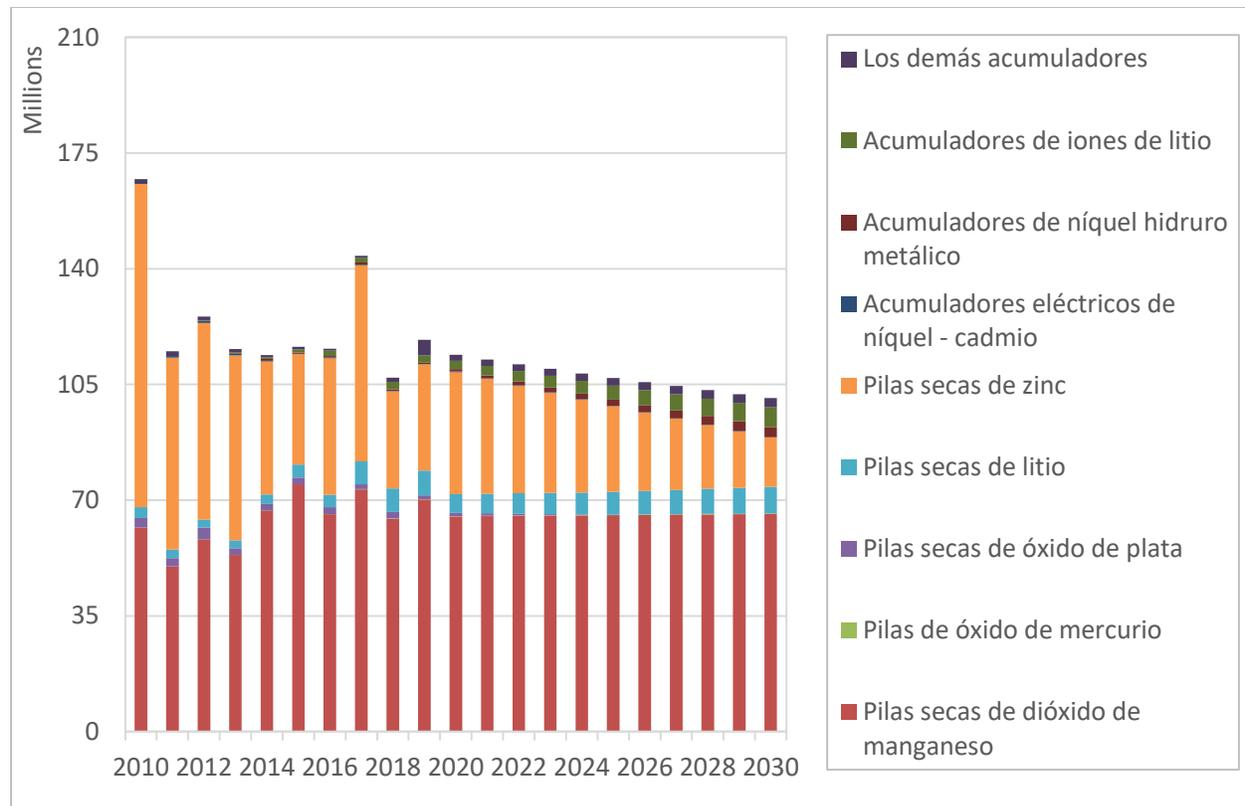


Figura 3-8 Proyección consumo de pilas 2010-2030

Se modifica la metodología de proyección para pilas secas de óxido, la cual cambiaba su método de cálculo a partir del año 2025, para evitar que la proyección fuera negativa. Se optó por mantener la metodología durante todo el período limitando a la proyección a 0.

Fuente: Elaboración propia en base a (WSP, 2020)

Se observa que, (1) las pilas secundarias tienen un aumento significativo y (2) en términos globales hay una reducción importante del número total de pilas consumidas. Una hipótesis que podría explicar ambos fenómenos observados es que la tendencia observada sería el resultado de la sustitución de funciones cubiertas por artefactos con pilas primaria por artefactos con pilas secundarias. Las pilas secundarias, al ser recargadas, pueden por definición reemplazar a múltiples pilas primarias, resultando en una disminución relevante en este tipo de pilas. Más aún, si bien es razonable esperar un aumento del uso de artefactos eléctricos con pilas, muchas de las

funciones se han ido concentrando en un menor número de aparatos más versátiles como celulares y *tablets*.

Una vez conocido el número total de pilas, se realiza la distribución del consumo nacional a nivel comunal. Para ello se mantiene la misma metodología de WSP, donde se distribuye el consumo de pilas según la distribución de la población a nivel comunal. Dicha metodología, tiene implícitamente como supuesto que, en promedio, el consumo per cápita de pilas no varía entre comunas. Si bien, es posible que factores económicos, distributivos o incluso territoriales, pudieran implicar diferencias en el consumo per cápita comunal, no se encontró evidencia para plantear una metodología diferente.

Para esta distribución se consideró la población comunal del INE, cuya última entrega incluye una proyección de la población hasta el año 2035 (INE, 2019). Los resultados agrupados por región y para todas las pilas, se presentan en la Figura 3-9.

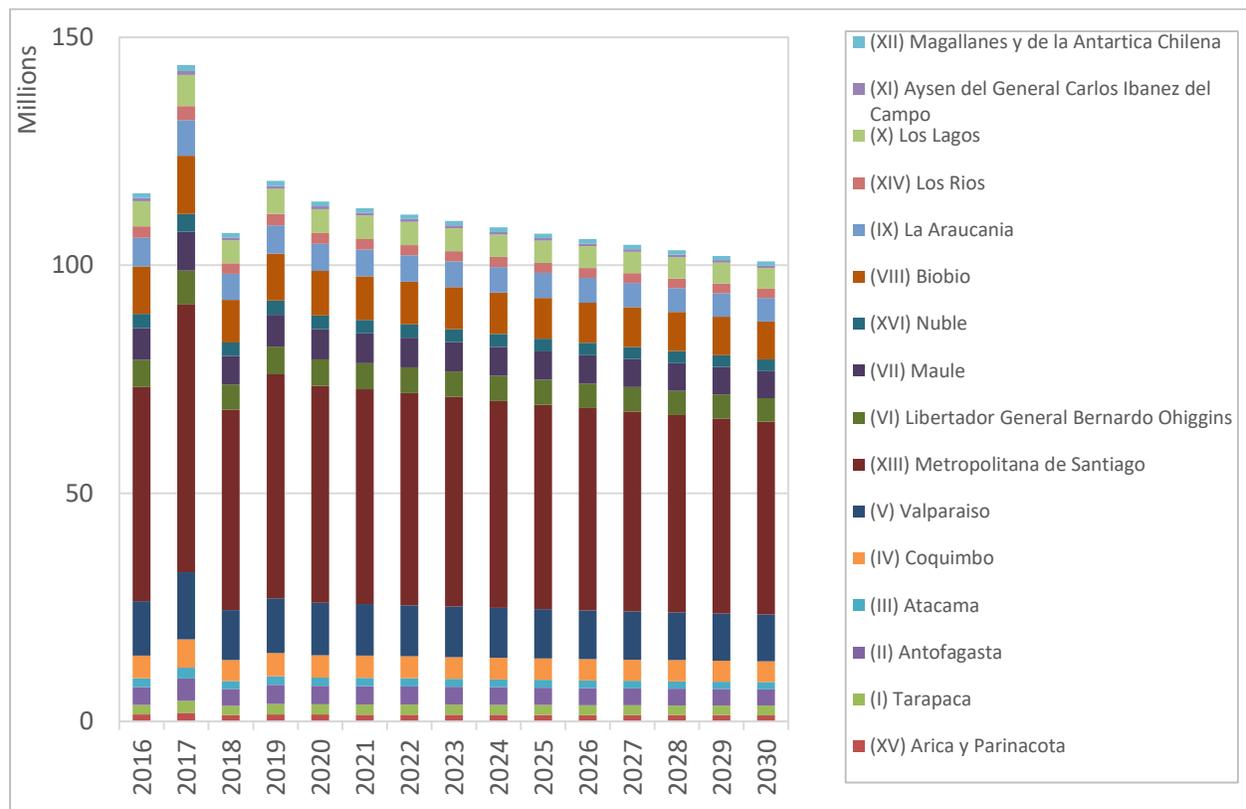


Figura 3-9 Proyección consumo regional de pilas

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las limitaciones del consumo, la principal limitación es que probablemente representa una sub/estimación de las pilas enajenadas en la medida que se limita a las pilas reportadas sólo

en la partida arancelaria 85.06 (primarias) y 85.07 (secundarias). Esto excluye pilas⁹ que puedan haber ingresado al país en otras partidas, por ejemplo, contenidas en diferentes artículos eléctricos como computadores y celulares. Sin perjuicio de lo anterior, se reconoce que los datos de consumo presentados en WSP (2020) corresponden a la mejor estimación a la fecha de las pilas, y permitirían realizar una cuantificación razonable de los impactos de la ley 20.920.

Otra limitación relevante tiene que ver con la inconsistencia que hay entre las definiciones de baterías utilizadas por el servicio Nacional de Aduanas y el establecido en el marco de la ley REP en la RE 409/2018 del MMA. Mientras la definición del Servicio Nacional de Aduanas guarda relación con la capacidad de recarga de los acumuladores, la definición de la ley REP distingue entre pilas y baterías de acuerdo al peso, siendo los acumuladores más livianos a 2 kg catalogados como pilas, y los mayores a 2 kg como baterías. Esta inconsistencia en la definición, resulta en que dentro de los mismos códigos arancelarios¹⁰ se estén importando tanto pilas como baterías, de acuerdo a la definición de la RE 409/2018 del MMA. De esta forma al considerar la totalidad de las importaciones de estos códigos arancelarios como pilas, en realidad se está tomando una cota superior de las importaciones, dado que algunos acumuladores podrían ser catalogados como baterías.

En el estudio “Actualización de información base e impactos ambientales específicos del producto prioritario baterías, contenido en la Ley 20.920” (GreenLab, 2021), se implementó una metodología basada en la identificación de palabras claves en las glosas arancelarias para, entre otros objetivos, estimar con mayor precisión para los años 2018 y 2019 la fracción de pilas y baterías en los códigos arancelarios conflictivos. Los resultados de dicho proceso, apuntan a que el 85% de las importaciones realizadas en dichos códigos arancelarios en los años 2018 y 2019 efectivamente corresponde a pilas, mientras que el 15% corresponderían a baterías, aquellas baterías utilizada con fines de tracción ya sea en vehículos livianos (bicicletas, scooter y similares) o de pasajeros. Dicha estimación, aunque se reconoce que presenta un alto nivel incertidumbre, da cuenta de que efectivamente la mayor parte de las importaciones corresponden a pilas, pero una fracción correspondería a baterías. Lo anterior refuerza la hipótesis de que la estimación de pilas secundarias corresponde a un umbral superior del valor.

3.3.2 Estimación generación de PFU

La estimación de la generación de residuos se realiza a partir del consumo de pilas. Al respecto se recogen dos enfoques diferentes para realizar la estimación de la generación de pilas fuera de uso (PFU):

Enfoque por pila: En este enfoque se realiza el seguimiento a cada pila desde que son importadas al país hasta que se dispone. Para ello se debe considerar el tiempo de residencia de las pilas,

⁹ Entendidas bajo la definición de la RE 409/2018 del MMA, como fuente de energía eléctrica obtenida por transformación directa de energía química y constituida por uno o varios elementos, con un peso no mayor a 2kg.

¹⁰ En específico en los códigos arancelarios 8507.3000, 8507.5000, 8507.6000 y 8507.8000.

que corresponde a la diferencia entre la enajenación y la generación del residuo, que usualmente corresponde a la vida útil de la pila más el tiempo promedio de almacenamiento en los hogares. Este es el enfoque propuesto por WSP en su estimación de residuos, y los residuos se calculan para cada categoría de pila como un desplazamiento en “n” años, equivalente al tiempo de residencia, de la serie de tiempo.

En la Figura 3-10 se presenta gráficamente la metodología del enfoque por pila. Se observa que una “Pila X” se convierte eventualmente en una “PFU X” transcurrido el tiempo de residencia de dicha pila, de la misma forma que una “Pila Y” eventualmente se transforma en una “PFU Y” transcurrido el tiempo de residencia de dicha pila. Es decir, se sigue la vida de cada pila considerando un tiempo de residencia. Es relevante notar que los tiempos de residencia pueden ser diferente entre las diferentes pilas.

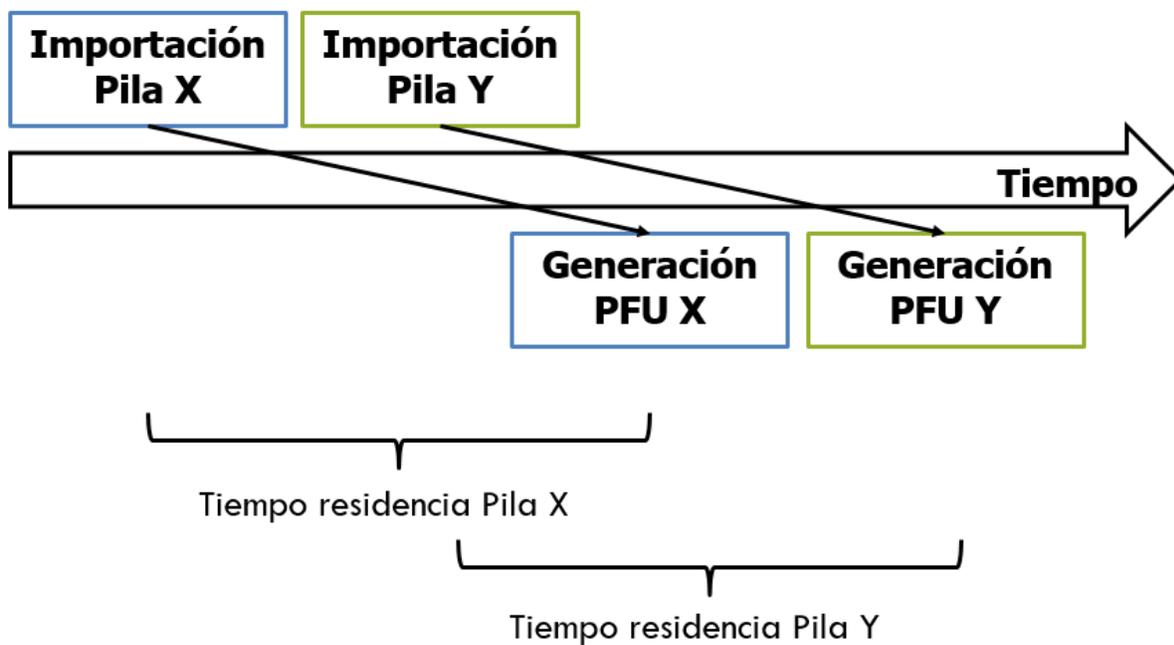


Figura 3-10 Diagrama esquemático de enfoque por pila

Fuente: Elaboración propia

Enfoque de reemplazo: En este enfoque se realiza el supuesto de que la enajenación de cada pila tiene como objetivo el reemplazo de otra pila de las mismas características la cual pasa a ser una PFU. En este caso la estimación de la estimación de la generación de PFU es igual a la estimación de consumo de PFU, es decir, las series son iguales sin ningún desplazamiento.

En la Figura 3-11 se presenta de forma esquemática la metodología bajo este enfoque. Bajo este enfoque, se supone que cada pila importada viene a reemplazar a una pila con las mismas características que pasa a ser una PFU. En este caso la “Pila X” viene a reemplazar

instantáneamente a la “Pila X’”, la cual pasa a ser la “PFU X’”, de forma análoga la importación de la “Pila Y” está asociada a la generación de la “PFU Y’” en el mismo instante del tiempo. Es relevante considerar que bajo este enfoque se pierde la trazabilidad de cada pila en particular.

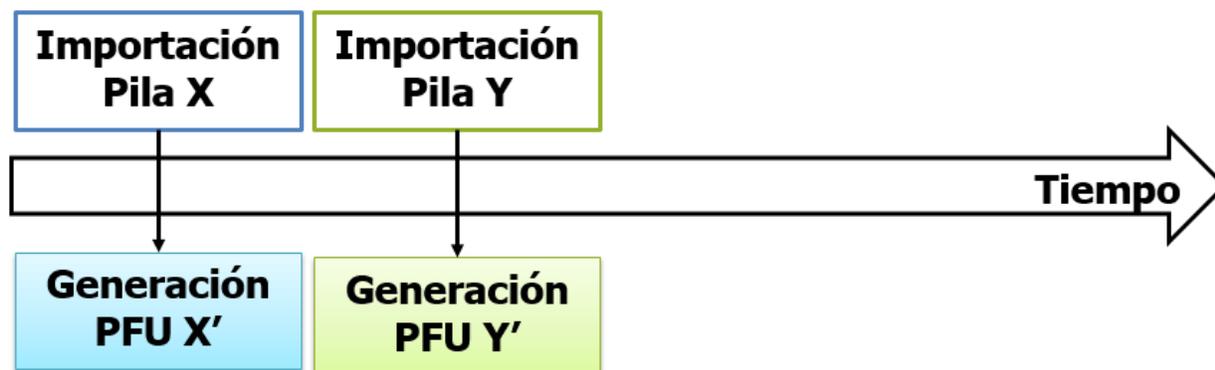


Figura 3-11 Diagrama esquemático de enfoque de reemplazo

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 3-7 resume el principal supuesto de cada uno de los enfoques explicitando algunas de las principales limitaciones comparativas, las cuales deben ser consideradas al momento de analizar los resultados. Se destaca que un enfoque por pila, con la información disponible actualmente, no incluye dentro de su estimación la generación de PFU aquellas pilas que fueron importadas en artefactos eléctricos. Esto más que una limitación del enfoque es una limitación de la información disponible, pues de contar con dicha información podría ser incluida. Esta información no podría ser incluida en el caso de enfoque por reemplazo, dado que las pilas entrantes en artefactos no vendrían a reemplazar otras pilas, sin embargo, este enfoque si incluiría la generación de PFU importadas en artefactos, en la medida que estas sean reemplazadas por pilas importadas a granel. Otra limitación relevante, es que no incluye la generación de PFU de aquellas pilas que no son reemplazadas.

Tabla 3-7 Limitaciones comparativas de supuesto subyacente de los enfoques

Enfoque	Enfoque por pila	Enfoque de reemplazo
Principal supuesto	Las pilas tienen un tiempo de residencia promedio invariable en el tiempo.	Todas las pilas importadas reemplazan a una pila de exactamente las mismas características que es dispuesta.
Limitaciones comparativas	Intensiva en el uso de información: requiere una serie de tiempo de información larga. Sensible al tiempo de residencia. No considera la generación de residuos de aquellas pilas que son importadas contenidas en artefactos.	No permite incorporar información adicional que eventualmente se pueda levantar respecto a la importación de pilas en artefactos. No considera la generación de residuos de pilas de aquellas pilas que no son reemplazadas.

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, los resultados del enfoque por pila dependen de forma directa del tiempo de residencia a considerar. Este factor es bastante incierto puesto que la residencia dependerá de la potencia del equipo, la intensidad de uso, la frecuencia de uso, el modo de recarga, entre otros factores. Un estudio dedicado a dicha estimación estimó tiempos de residencia media en el contexto de la UE, observándose valores que van de 4 a 12 años según el tipo de pilas. Sin embargo, se destaca que estos resultados vienen de una muestra bastante dispersa de años (ver Figura 3-12). Para el presente estudio se consideran los tiempos de residencia presentados en la Tabla 3-8.

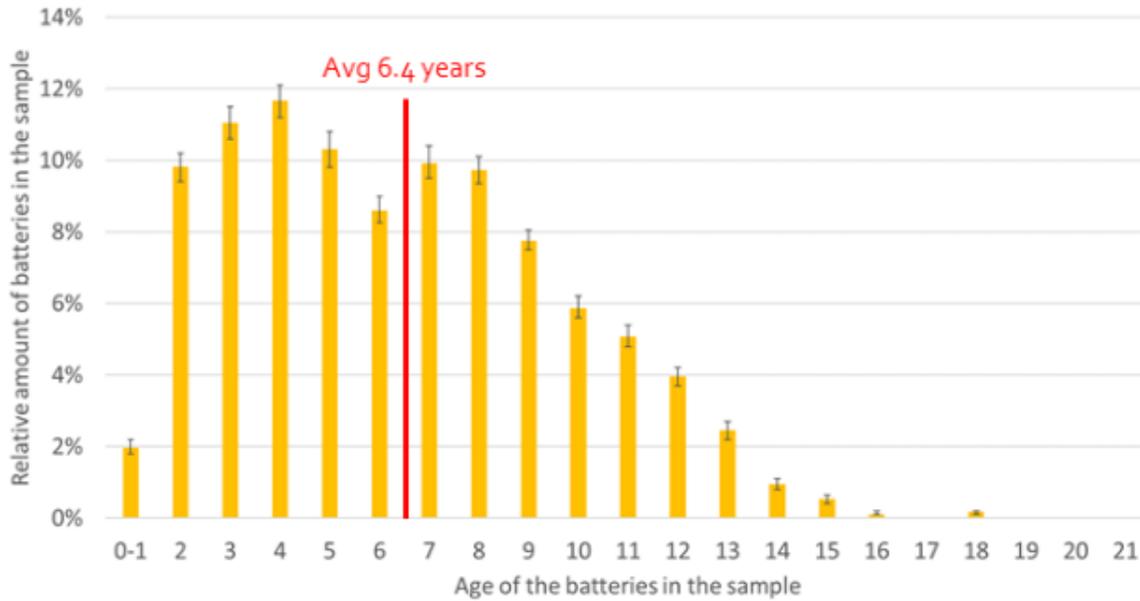


Figura 3-12 Distribución de años de residencia para acumuladores de litio

Fuente: (EUROBAT & Mobius, 2017)

Tabla 3-8 Tiempo de residencia [año] considerado

Categoría	Tiempo de residencia
Pilas secas de dióxido de manganeso	4
Pilas de óxido de mercurio	4
Pilas secas de óxido de plata	4
Pilas secas de litio	6
Pilas secas de zinc	4
Acumuladores eléctricos de níquel - cadmio	12
Acumuladores de níquel hidruro metálico	7
Acumuladores de iones de litio	6
Los demás acumuladores	6

Fuente: Elaboración propia basado en Tabla 5 de (EUROBAT & Mobius, 2017)

Ambos enfoques presentados tienen su ventaja metodológica en términos de capturar determinado efecto, así como diferentes fuentes de incertidumbre. Por este motivo se decidió

incluir ambos enfoques en la modelación, siendo considerados como dos escenarios alternativos de estimación y que dan cuenta del rango que cubre la estimación de generación de PFU.

Respecto a la distribución comunal, se realiza el supuesto de que la generación de la PFU es dispuesta según el lugar de origen del consumo. Para el caso del enfoque por pila, esto significa que las PFU generadas en una comuna en un año en particular es igual a las pilas consumidas en la misma comuna en el año equivalente a la resta del año actual y el tiempo de residencia de la categoría de pilas.

De esta forma se obtienen estimaciones de la generación de PFU en cuatro dimensiones:

- Comuna
- Categoría de pila
- Año
- Enfoque de generación de PFU

Los resultados completos con dicho nivel de detalle se presentan en los Anexos Digitales¹¹ del presente informe. En la Figura 3-13 se presenta la comparación de resultados nacionales para el total de pilas entre ambos enfoques. En ella se observa que, dado que se está observando una tendencia a la disminución del consumo, en los años de proyección el enfoque de pilas de reemplazo es generalmente menor a la estimación del enfoque por pilas.

¹¹ En específico: AnexoDigital-ResultadosGeneracionPFU.csv

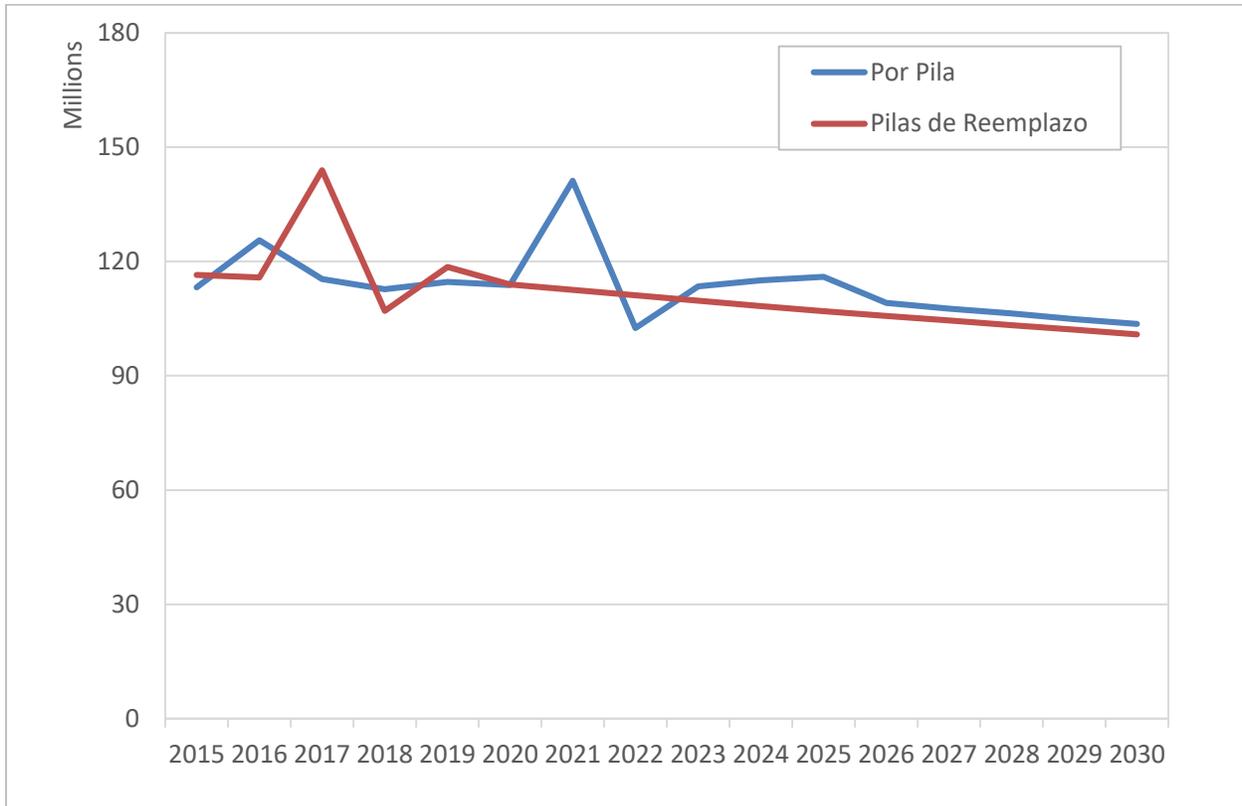


Figura 3-13 Generación de PFU [unidades] según enfoques a nivel nacional

Fuente: Elaboración propia

En la Figura, se observa notoriamente que el *peak* de consumo del año 2017 observable en los datos de consumo (ver Sección 3.3.1) se traduce en un *peak* de generación de PFU bajo el enfoque de “pilas de reemplazo” en el mismo año, mientras que en el enfoque por Pila dicho *peak* se observa cuatro años después (2021), cuando se cumple el tiempo de residencia de las pilas que explican el *peak* de consumo del año 2017. Al respecto se destaca que dado que las diferentes categorías de pilas tienen diferentes tiempos de residencia ambas series de tiempo no son exactamente un desplazamiento de ellas, aunque están marcadas por el alto volumen de importaciones de pilas primarias de manganeso y zinc, ambas con tiempo de residencia de 4 años.

En término de masa, a diferencia del estudio base se consideran pesos diferenciados según categoría de pilas. Los pesos fueron asignados según las pilas más comunes en cada categoría, para las categorías con pilas cilíndricas tipo AA (12-15 gr) o AAA (23-28 gr) se consideró un peso intermedio entre ambas categorías de 18 gr/unidad. Para aquellas categorías compuestas principalmente por pilas tipo botón, se consideró un peso medio de 3 gr/unidad, mientras que para los acumuladores de mayor capacidad se consideró un peso medio de 180 gr/unidad.

Tabla 3-9 Peso medio por pila considerado [gr/unidad]

Categoría	Por Pila
Pilas secas de dióxido de manganeso	18
Pilas de óxido de mercurio	3
Pilas secas de óxido de plata	3
Pilas secas de litio	18
Pilas secas de zinc	18
Acumuladores eléctricos de níquel - cadmio	18
Acumuladores de níquel hidruro metálico	18
Acumuladores de iones de litio	180
Los demás acumuladores	180

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3-14 se presenta la proyección de la generación de PFU en término de masa. Se observa que, a diferencia de la visualización por unidad, existe una tendencia al crecimiento. Esto se asocia al aumento de la participación de los acumuladores de iones de litio, asociados a equipos como celulares y computadores, los cuales tienen un peso significativamente mayor.

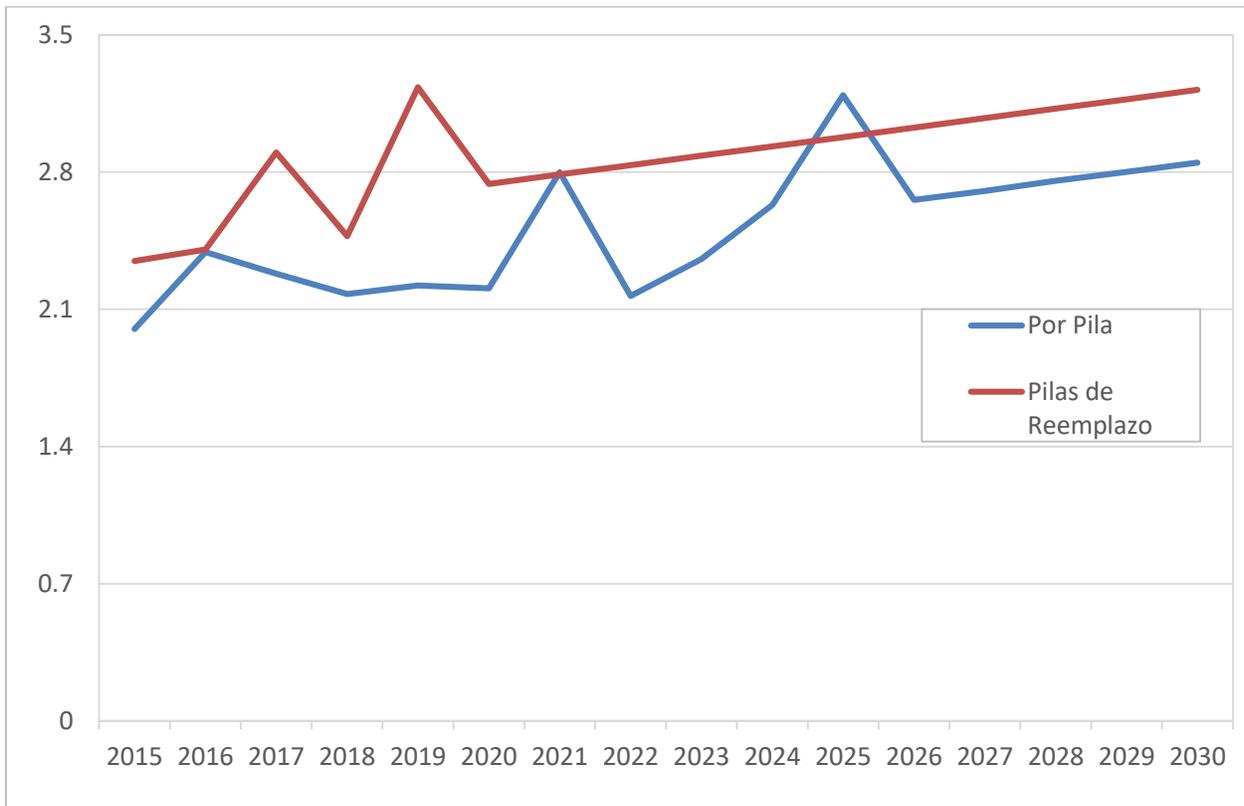


Figura 3-14 Generación de PFU [miles de toneladas] a nivel nacional según enfoque

Fuente: Elaboración propia

La ventaja de utilizar pesos promedios diferenciados por categoría de pilas, a diferencia de utilizar un peso promedio común, presenta la ventaja de que:

- 1) Da cuenta de la variabilidad interanual en la medida que la composición de las distintas categorías de pilas ha ido variando.
- 2) Los impactos asociados a los metales que componen las pilas dependen de la composición de las PFU. De esta forma una diferenciación de los pesos según tipo de pila permitirá una estimación más precisa de los beneficios y costos de la normativa.

En la Tabla 3-10 se presenta el resultado de los pesos promedios observados. En comparación con el peso promedio de 27 [gr/unidad] utilizado en el estudio base, se observa que pareciera ser un valor apropiado para la cuantificación de las importaciones del año 2019 (comparable al enfoque pilas de reemplazo), sin embargo, sobreestimaría el peso de las PFU según la metodología por pila. Esto sucede por dos motivos: por un lado, la participación de los acumuladores ha ido aumentando de forma consistente en el último tiempo y, por otro lado, los acumuladores tienen un tiempo de residencia mayor, por lo que su efecto se ve años después.

Tabla 3-10 Peso promedio de PFU [gr/unidad]

	2019	2030
Por Pila	19.4	27.5
Pilas de Reemplazo	27.3	31.9

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 PFU con destino conocido

La estimación de residuos con destino conocido se realiza a partir de los datos de SIDREP complementados con una encuesta realizada a los encargados ambientales de las municipalidades con el objetivo de identificar las prácticas en recolección y gestión de las PFU realizadas por los municipios.

3.3.3.1 Datos SIDREP

Como información primaria se consideró el procesamiento de las bases de datos del SIDREP del Ministerio de Salud, de la categoría de residuos peligrosos¹² Baterías realizadas en el estudio de WSP (2020), para los años 2017 a 2019. Dichas bases de datos fueron entregadas ya habiendo filtrado otros residuos no correspondientes a pilas ni baterías tales como neumáticos, ampolletas y tóner.

Los datos fueron reprocesados para el presente estudio. En primer lugar, se observan diferencias en cuanto a la cantidad de residuos reportados en origen y en destino final. En particular para el periodo completo se observa que la generación de residuos es de 3.57 millones de kg mientras que los residuos dispuestos son 3.95 millones de kg. Frente a esta diferencia de 10.6% se decide considerar solamente las cantidades declaradas en disposición, bajo el supuesto de que al ser un menor número de establecimientos de disposición y estar dedicados principalmente a la gestión de los residuos, presentan mediciones más precisas.

¹² Según la clasificación del DS 148/03 Lista A

Posteriormente se procede a clasificar los residuos. En general se distinguen dos agrupaciones de interés, aquellas clasificaciones de residuos que se refieren únicamente a “Pilas”, y otras clasificaciones que corresponden a “pilas y otros residuos”. Se observa que la clasificación de residuos provista por SIDREP no cuenta con un buen nivel de estandarización de los residuos, estando enfocada en la clasificación según código primario, secundario y peligrosidad, categorías que no son útiles para la clasificación según tipo de pilas.

De los 3.95 millones de kg de residuos considerados en el período 2017-2019, 1.23 millones son agrupados bajo la categorización de “pilas”, mientras que 1.10 millones son clasificados como “pilas y otros residuos”. Los 1.62 restantes corresponden a residuos que no contendrían pilas.

Tabla 3-11 Clasificación de residuos de interés de SIDREP

Agrupación	Clasificación de residuos
Categorizado como "Pilas"	PILAS
	PILAS ALCALINAS NI, CO, MN, AL, ZN.
	PILAS COMUNES RECAR Y LARGA DURACION Y DE BOTON
	PILAS DE LITIO
	PILAS DE MERCURIO DADAS DE BAJA
	PILAS DE NIQUEL
	PILAS NIQUEL-CADMIO
	PILAS SECAS
Categorizado como "Pilas y otros residuos"	BATERIAS - PILAS CON CONTENIDO MERCURIO
	BATERIAS CADMIO Y PILAS AGOTADAS
	BATERIAS DE RADIOS Y PILAS
	BATERIAS SIN PLOMO Y PILAS
	BATERIAS Y PILAS DE LI, CD, HG, PB.
	PIL.Y BATR. DE CEL, IPAQ, IMP. PORT. O SIM EN DESU
	PILAS ALCALINAS, AMPOLLETAS, BATERIAS NI-CD
	PILAS BATERIAS CEL, IPAQ, IMPRESORAS PORTA U OTROS
	PILAS TONER EN DESUSO
	PILAS Y BATERIAS
	PILAS Y BATERIAS DE CELULARES, IPAQ, IMPRESORAS PO
	PILAS Y BATERIAS DE EQUIPOS
	PILAS Y BATERIAS DE RADIO
	PILAS Y BATERIAS DE UPS
	PILAS Y TERMOGRAFOS

Fuente: Elaboración propia

Una vez identificados los residuos de interés se realiza una revisión para identificar posibles establecimientos que funcionen como intermediarios. Es posible que un gestor de residuos reciba los residuos de un establecimiento y los almacene por un tiempo, para posteriormente entregarlos a un establecimiento que realice la disposición final adecuada. En este caso dicho establecimiento es considerado como un intermediario, puesto que funciona como un establecimiento de disposición al recibir los residuos del primer establecimiento, y luego

funciona como un generador al entregar los residuos al establecimiento que se hará cargo de la disposición final.

Fueron catalogados como intermediarios, aquellos establecimientos cuya generación sea similar o mayor a la recepción de residuos. En parte la diferencia se explica por el almacenamiento de las PFU entre años, así como la recepción en estos sitios de residuos que por su volumen no se registran en el SIDREP. Otra explicación posible es que los residuos sean reclasificados por la empresa intermediaria. En particular se identificaron 11 establecimientos que funcionan como intermediarios y donde, por lo tanto, la disposición en ellos no es considerada como una disposición, para evitar doble contar.

Tabla 3-12 Empresas clasificadas como intermediarios y cantidad de residuos recepcionados [kg de PFU]

Empresas intermedias	Categorizados como "Pilas"	Categorizados como "Pilas y otros residuos"
BRAVO ENERGY CHILE S A	100,837	200,342
CEMENTO POLPAICO S A	24,392	22,510
GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS GEOBARRA EXINS LTDA	17,624	14,311
METALURGICA Y MECANICAS MIDAS LIMITADA	-	6,000
PROCESOS SANITARIOS SPA	89,096	30,423
RECYCLA CHILE S A	372	-
RECYCLING S.A.	10,271	1,535
SERVICIOS TECNICOS URBANOS LIMITADA	55,427	14,330
SOC COMERCIAL DEGRAF LIMITADA	1,438	19,838
SOLUCIONES ECOLOGICAS Y MEDIO AMBIENTALES S.A.	27	2,435
STERICYCLE MARITIMO SPA	6,256	8,892
Total	305,740	320,616

Fuente: Elaboración propia

Dicho proceso permite identificar que el 25% de los residuos categorizados como pilas son dispuestos en establecimientos intermediarios, mientras que un 29% de los residuos categorizados como pilas y otros también se dispondrían en dichos establecimientos.

Con todo lo anterior, el resultado respecto a la cantidad de residuos con disposición final en el período es de 925 y 785 miles de kg de residuos categorizados como "Pilas" o como "Pilas y otros residuos", respectivamente. Esto es equivalente a un 43% de los residuos totales identificados en la base de datos original.

Tabla 3-13 Resumen del procesamiento de la disposición de PFU con destino conocido según SIDREP [kg], periodo 2017 a 2019

Pila	Disposición final	Intermediario	Total
Categorizado como "Pilas"	924,555	305,740	1,230,295
Categorizado como "Pilas y otros residuos"	784,279	320,616	1,104,895
No pilas	1,083,973	533,265	1,617,238
Total	2,792,807	1,159,621	3,952,428

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SIDREP procesados (WSP, 2020)

Al observar los resultados desagregados por año (ver Tabla 3-14), se observa un aumento sostenido de la cantidad de Pilas con destino conocido en el tiempo, observándose que sí se observan solamente los residuos clasificados como "Pilas", el 2019 se dispusieron 2.7 veces más que el 2017. De la misma forma, si se observa la suma de ambas categorías, se observa que el 2019 se dispuso 1.5 veces más que al año 2017.

Tabla 3-14 PFU con destino conocido [kg] según datos de SIDREP

Agrupación	2017	2018	2019	Total
Categorizado como "Pilas"	152,318	357,739	414,498	924,555
Categorizado como "Pilas y otros residuos"	289,013	233,696	261,570	784,279
Total	441,331	591,435	676,068	1,708,834

Fuente: Elaboración propia en base a datos de SIDREP procesados (WSP, 2020)

Resulta interesante estimar la tasa de recolección a partir de estos resultados y la generación estimada de PFU presentada en la Sección 3.3.2. La tasa depende tanto del escenario de agrupaciones de los residuos de SIDREP como del enfoque utilizado para estimar la generación de PFU. Los resultados de esta estimación se presenta en la Tabla 3-15. Se observa que de considerarse sólo los residuos categorizados como "Pilas" la tasa de pilas dispuestas correctamente crece de un 7%-9% en el año 2017¹³ a un 14%-21% para el año 2019. De considerarse el total de pilas y "pilas y otros residuos" dicha tasa aumenta a un 21%-26% para el 2017 y a un 24% a 34% para el 2019.

Tabla 3-15 Tasa de disposición correcta de pilas según escenario de agrupación residuos SIDREP y enfoque de estimación de generación PFU

Año	2017		2018		2019	
	Sólo Pilas	Pilas y otros	Sólo Pilas	Pilas y otros	Sólo Pilas	Pilas y otros
Por Pila	9.1%	26.2%	17.9%	32.4%	20.5%	34.5%
Pilas de Reemplazo	7.2%	20.6%	15.7%	28.5%	14.1%	23.7%

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2 Encuesta y resultados de encuesta a municipios

Se diseñó una encuesta para ser respondida por todos los municipios del país. Dado que la cantidad de PFU con disposición adecuada es conocida directamente desde los datos de SIDREP,

¹³ Dependiendo del enfoque por pila o como reemplazo.

el objetivo de la encuesta no era cuantificar la disposición adecuada de PFU, sino que realizar una caracterización de los programas municipales en cuanto a la recolección y gestión de PFU. De esta forma, la información levantada en la encuesta es complementaria a la información del SIDREP.

La encuesta fue implementada en la herramienta de Google para estos fines. Se intentó aplicarla a todos los municipios del país, para lo cual se envió a los 325 municipios del país de los cuales se cuenta con un correo electrónico de al menos un encargado ambiental (entregados por la contraparte técnica). En los casos el correo proporcionado tuviera problemas, se intentó contactar en otro correo a los encargados o los municipios. Al igual que se intentó contactar a los 20 municipios para los cuales no se identificaron encargados ambientales, ya sea por correos electrónicos de contacto de la comuna, formularios de contacto o por redes sociales. De esta forma fue posible enviar la encuesta a 343 municipios¹⁴, desde un correo electrónico del MMA habilitado especialmente para este objetivo. Se enviaron tres correos, con diferencia de 4 semanas entre ellos, invitando a participar en la encuesta. Cada uno de ellos venía acompañado por una carta firmada por el Subsecretario del MMA.

En los Anexos, en la Sección 7.3, se pueden revisar las preguntas contenidas en la encuesta aplicada, así como sus alternativas de respuesta.

Si bien a continuación se presentan mayores análisis respecto a la información recogida en la encuesta, las principales observaciones de los resultados son:

- Los municipios que contestaron la encuesta representan un 53% de la población nacional. Para el análisis los municipios fueron agrupados según macrozona (5 zonas), tamaño poblacional (3 rangos) y nivel de urbanidad (3 niveles).
- El 54% de las comunas declara alguna iniciativa municipal para la recolección de PFU. Esta distribución no cambia por nivel de urbanidad, pero sí los municipios con mayor población tienden a declarar que cuentan o han contado con iniciativas municipales.
- De los que declara la existencia de iniciativas municipales, el 68% declara contar con métodos de recolección permanente. Nuevamente no se observa una variación según el nivel de urbanidad, pero sí según el tamaño poblacional. Las comunas más grandes tienden a preferir este método por sobre comunas más pequeñas poblacionalmente.
- Cerca de dos tercios de los municipios con iniciativas municipales declara que los residuos recolectados son gestionados por un tercero. La fracción restante se divide entre quienes acumulan los residuos o los llevan a puntos verdes (propios o en otros municipios), mientras una fracción menor declara gestionarlos mediante convenios con algún organismo estatal o disponerlos con los otros residuos municipales.
- Dado que la gestión no siempre es directa, en general no existe claridad respecto a los niveles de recolección. Frente a esto se cruzó con la información disponible en SIDREP, identificándose 21 comunas que respondieron tener iniciativas municipales y que a su

¹⁴ Los municipios que no se han podido contactar corresponden a Río Hurtado y Combarbalá.

vez, presentan declaraciones de Pilas en SIDREP. A partir de esto se observa que existe una amplia diferencia en la recolección per cápita según el método de recolección, alcanzándose una recolección per cápita entre 4 y 5 veces mayor con sistemas de recolección permanente por sobre campañas de recolección puntuales.

Tasa de respuesta

La encuesta fue enviada a 343 municipios en total, de ellos se obtuvieron respuestas de 157 municipios (45.8% del total contactado¹⁵), los cuales se presentan en la Figura 3-15. La muestra representa un 45.5% de los municipios del país. En términos de población, los municipios albergan el 53.0% de la población nacional.

¹⁵ Un 48.3% si se consideran solamente las comunas con encargados ambientales identificados. Solamente se recibieron respuestas de los municipios con contacto de los encargados ambientales.

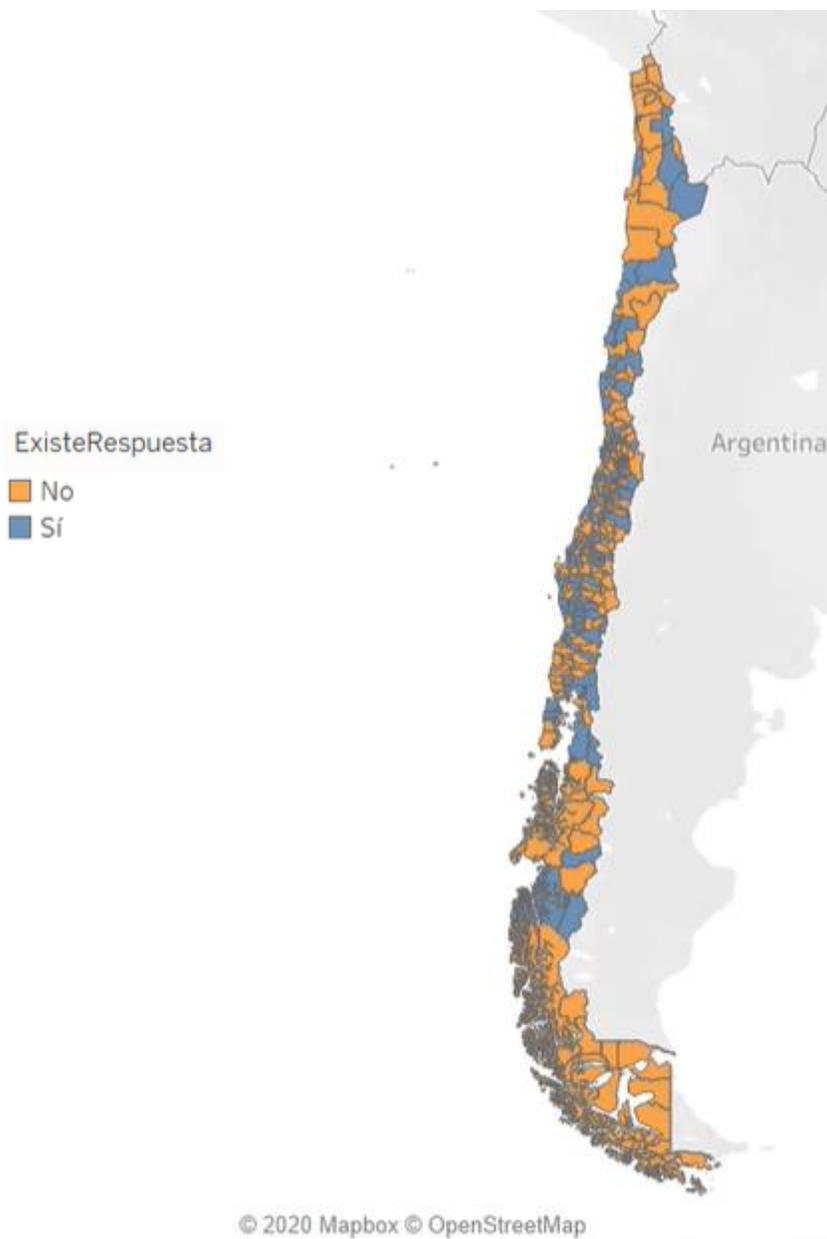


Figura 3-15 Comunas respondientes

Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de las respuestas, las comunas del país fueron agrupadas según tres características:

- Macrozona:
 - Norte: Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama
 - Centro Norte: Regiones desde la región de Coquimbo hasta la región de O'Higgins.
 - Centro Sur: Regiones del Maule, Ñuble y Biobío.
 - Sur: Regiones de la Araucanía, Los Ríos y Los Lagos.
 - Austral: Región de Aisén y Magallanes

- Rango tamaño población:
 - Comuna Alta Población: Comunas con población, según Censo 2017, superior a 100 mil habitantes
 - Comuna Mediana Población: Comunas con población, según Censo 2017, superior a 10 mil habitantes y no clasificadas como comunas de alta población.
 - Comuna Pequeña Población: Comunas con población, según Censo 2017, no clasificable como de Mediana Población o Alta Población.
- Rango Urbanidad:
 - Urbana: Población urbana superior al 80%, según Censo 2017.
 - Semi Urbana: Población urbana superior al 40%, según Censo 2017, y no clasificada como Urbana
 - No Urbana: Población, según Censo 2017, no clasificable como semi urbana o urbana.

En la Figura 3-16 se presenta la tasa de respuesta respecto al total de comunas para el total del país. Se observa que la distribución de respuestas es pareja entre las macrozonas, salvo para la región austral del país, donde se cuenta con una tasa de respuesta menor.

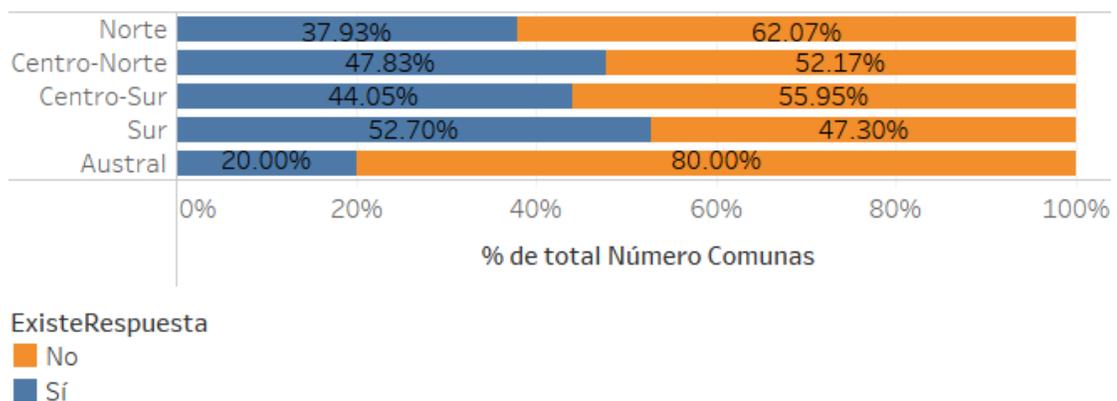


Figura 3-16 Tasa de respuesta según Macrozona

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-17 presenta la distribución de las respuestas según el tamaño de población y el nivel de urbanidad. Se observa que se cuenta con una mejor tasa de respuesta en la medida que aumenta el nivel de urbanidad, de esta forma para las comunas no urbanas se tiene 24 respuestas (36%), para las semi urbanas 69 (45%) y para las urbanas 64 (52%). Se puede notar esta misma tendencia al observar la tasa de respuesta según el tamaño de la población: para las comunas de pequeña población se obtuvieron 28 repuestas (32%), las comunas medianas (con población entre 10 mil y 100 mil habitantes) tienen 96 respuestas (49%) y las comunas con población superior a 100 mil habitantes cuentan con 33 respuestas (56%).

Rango Tamaño Población	No Urbana (<40%)		Semi Urbana (entre 40% y 80%)		Urbana (>80%)		Grand Total
	Sí	No	Sí	No	Sí	No	
Comuna Pequeña Población (menor a 10k)	15	32	12	22	1	6	88
Comuna Mediana Población (entre 10k y 100k)	9	11	56	61	31	30	198
Comuna Alta Población (>100k)			1	3	32	23	59
Grand Total	24	43	69	86	64	59	345

Figura 3-17 Distribución de respuesta según rango de tamaño de población y urbanismo

Fuente: Elaboración propia

La Figura 3-18 presenta la distribución de las respuestas según la población de cada municipio, agrupados según macrozona y nivel de urbanidad. En dicha figura, el área de los gráficos de torta es proporcional a la población, por ejemplo, la zona Centro-Norte y urbana corresponde al par con la población más grande. El 53.0% de la población nacional habita en una comuna que respondió la encuesta, observándose que las respuestas se concentran en las zonas urbanas centro-norte, centro-sur y sur del país.



El tamaño del gráfico de torta representa el tamaño de la población.

Figura 3-18 Distribución de respuestas según población

Fuente: Elaboración propia

Caracterización de municipios con respuesta

Respecto a las respuestas de la encuesta, 85 comunas (54%) declara que existe o ha existido en los últimos tres años (desde 2017) alguna iniciativa municipal para la recolección PFU¹⁶, mientras que 67 (43%) declara que no. Las 5 comunas restantes (3%) declaran no saber.

¹⁶ La pregunta de la encuesta es: “¿En su comuna existe, o ha existido en los últimos 3 años (desde 2017), alguna iniciativa municipal (puntos de recolección, campaña o similar), para la recolección de pilas fuera de uso? Esto incluye tanto iniciativas gestionadas directamente por la municipalidad, como las que hayan podido realizar por medio de un tercero”.

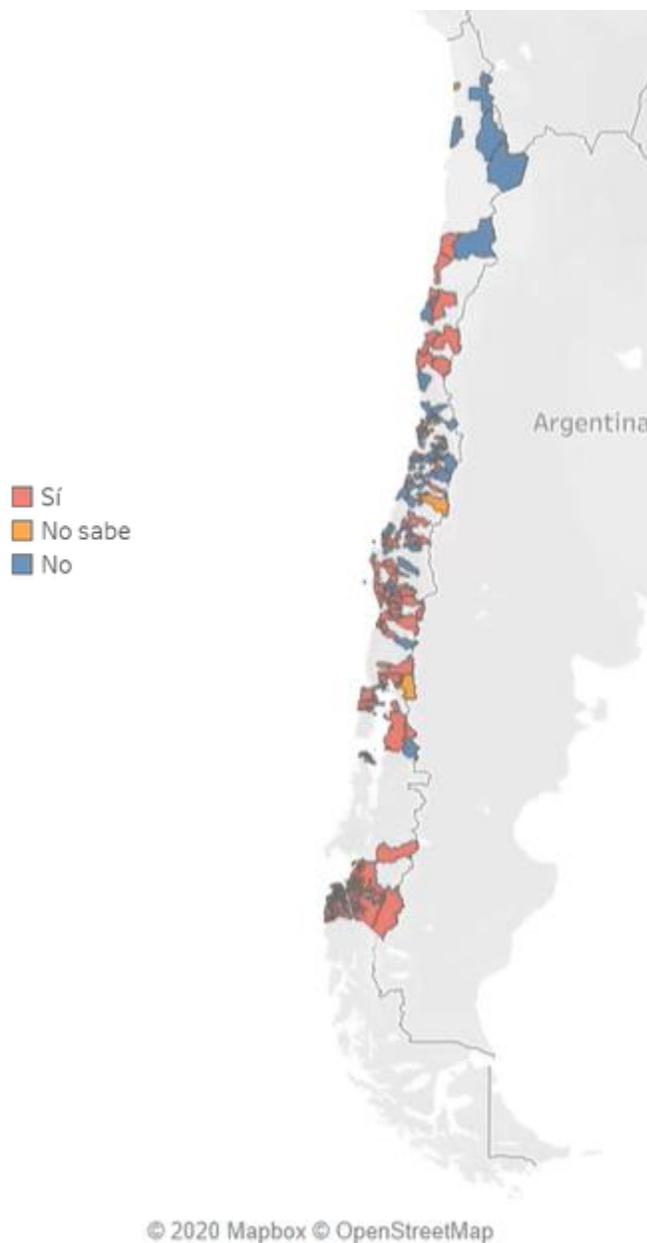
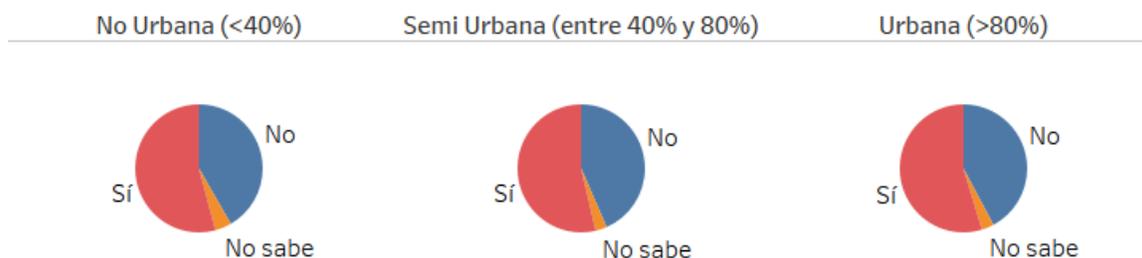


Figura 3-19 Existencia de iniciativa municipal de recolección de PFU

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3-20 se presenta la distribución de la respuesta a la existencia de alguna iniciativa municipal para la recolección de PFU según nivel de urbanismo, observándose que independiente del nivel de urbanismo de la comuna entre un 53% y un 55% de los municipios declaran contar con alguna iniciativa y entre un 41% y 44% de los municipios declara no haber tenido alguna iniciativa de este tipo.



El área de cada gráfico es proporcional al número de respuestas

Figura 3-20 Existencia de iniciativa municipal de recolección PFU según nivel de urbanismo

Fuente: Elaboración propia

No se observa la misma homogeneidad en las respuestas al realizar el análisis según el tamaño poblacional de las comunas. En la Figura 3-21 se observa que las ciudades con mayor población declaran contar o haber contado con alguna iniciativa de recolección de PFU en los últimos 3 años. En ciudades de más de 100 mil habitantes esta proporción llega a 67%, mientras que en ciudades medianas está en 52% y en ciudades pequeñas dicha proporción cae a 46%.



Figura 3-21 Existencia de iniciativa municipal de recolección PFU según tamaño de población

Fuente: Elaboración propia

Respecto al modo de recolección la mayor parte de los municipios con alguna iniciativa, declaran contar con un método de recolección permanente (68%), mientras que 22 de los 85 municipios (26%) declaran contar con campañas de recolección no permanente. Por último, 5 de los municipios restantes declaran contar con iniciativas de recolección que no incluyen puntos permanentes de recolección ni campañas temporales. La desagregación de estos según macrozona se presenta en la Figura 3-22

Modo Recolección	Norte	Centro-Norte	Centro-Sur	Sur	Austral
Recolección Permanente	1	19	10	26	2
Campañas de recolección	2	10	3	6	1
Recolección indefinida	1		4		
No sabe	1	2	1	1	
No hay recolección	6	35	19	6	1

Figura 3-22 Respuesta de modo de recolección

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3-23 se presenta la distribución del método de recolección según el rango de urbanismo y el tamaño de la población. Se observa que en cuanto al nivel de urbanismo este no presenta un efecto claro sobre los modos elegidos, observándose distribuciones similares independientes del nivel de urbanismo. Por el contrario, se observa una predilección por los sistemas de recolección permanente, por sobre las campañas puntuales de recolección en las ciudades con mayor población.

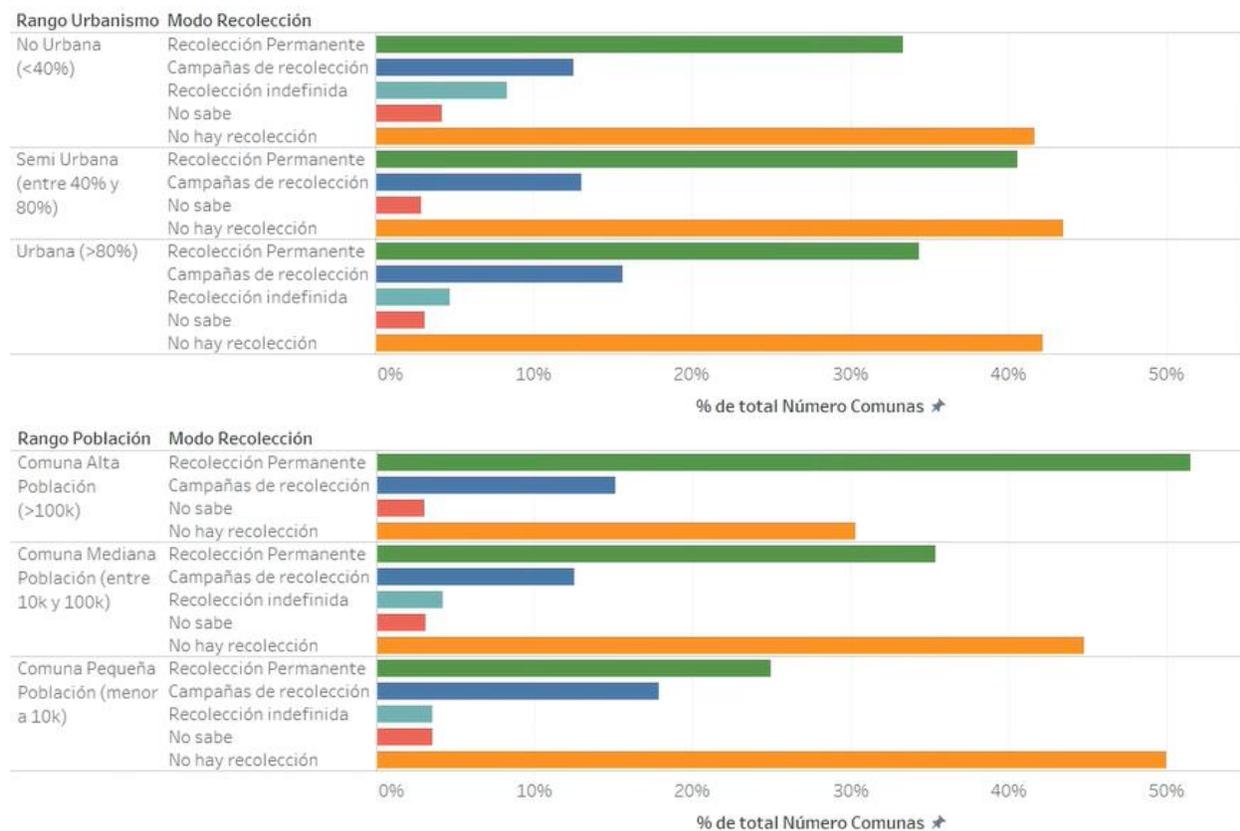


Figura 3-23 Modo de recolección según nivel de urbanismo y tamaño de población

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 3-16 se presentan los resultados de la forma de recolección en el caso de los municipios con iniciativas permanentes. Se observa que la instalación de contenedores de recolección en lugares público¹⁷ es la opción preferida, seguida por la instalación de contenedores de recolección en sitios privados¹⁸. Se observa que existen varias combinaciones entre los diferentes lugares de recolección.

Tabla 3-16 Número de comunas y población según punto de recolección permanentes de PFU

Puntos Verdes	Lugares públicos	Lugares Privados	Otros	Número Comunas	Población
Verdadero	Verdadero	Verdadero	n/a	2	443,249
		Falso		3	367,797
	Falso	Falso		4	145,183
		9		916,462	
Falso	Verdadero	Verdadero	Retiro en condominios	1	233,270
		Falso	n/a	38	2,465,493
	Falso	Falso	Juntas de vecinos	1	308,082
Total				58	4,879,536

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las respuestas de quienes realizan campañas puntuales, la Tabla 3-17 presenta las respuestas respecto a los puntos donde se realizan las campañas de recolección. Se observa que la mayor parte opta por la realización de campañas de recolección de PFU en lugares fijos¹⁹, aun así una parte relevante de quienes realizan campañas de recolección lo hacen en lugares no permanentes²⁰.

Tabla 3-17 Número de comunas y población según puntos de recolección de PFU en campañas puntuales

	Número Comunas	Población
Lugares Fijos y lugares no fijos	3	345,636
Sólo lugares Fijos	13	581,059
Sólo lugares no fijos	4	70,205
Otros	2	130,715
Total	22	1,127,615

Fuente: Elaboración propia

¹⁷ Opción Instalación de contenedor de recolección en sitios públicos como municipalidad, recintos educacionales, consultorios, CESFAM u otros.

¹⁸ Opción Instalación de contenedores de recolección en sitios privados, como centros comerciales, supermercados, almacenes, u otros.

¹⁹ Opción lugares fijos (públicos o privados), tales como recintos educacionales, recintos de salud, sitios de compra y abastecimiento, espacios municipales, entre otros.

²⁰ Opción lugares no permanentes, tales como ferias, actividades de la municipalidad, u otros similares.

Independiente del modo de recolección, se observa que la mayoría (64%) declara que los municipios son responsables por la gestión de los contenedores de las PFU, mientras que la fracción restante declara que la gestión es responsabilidad de un tercero.

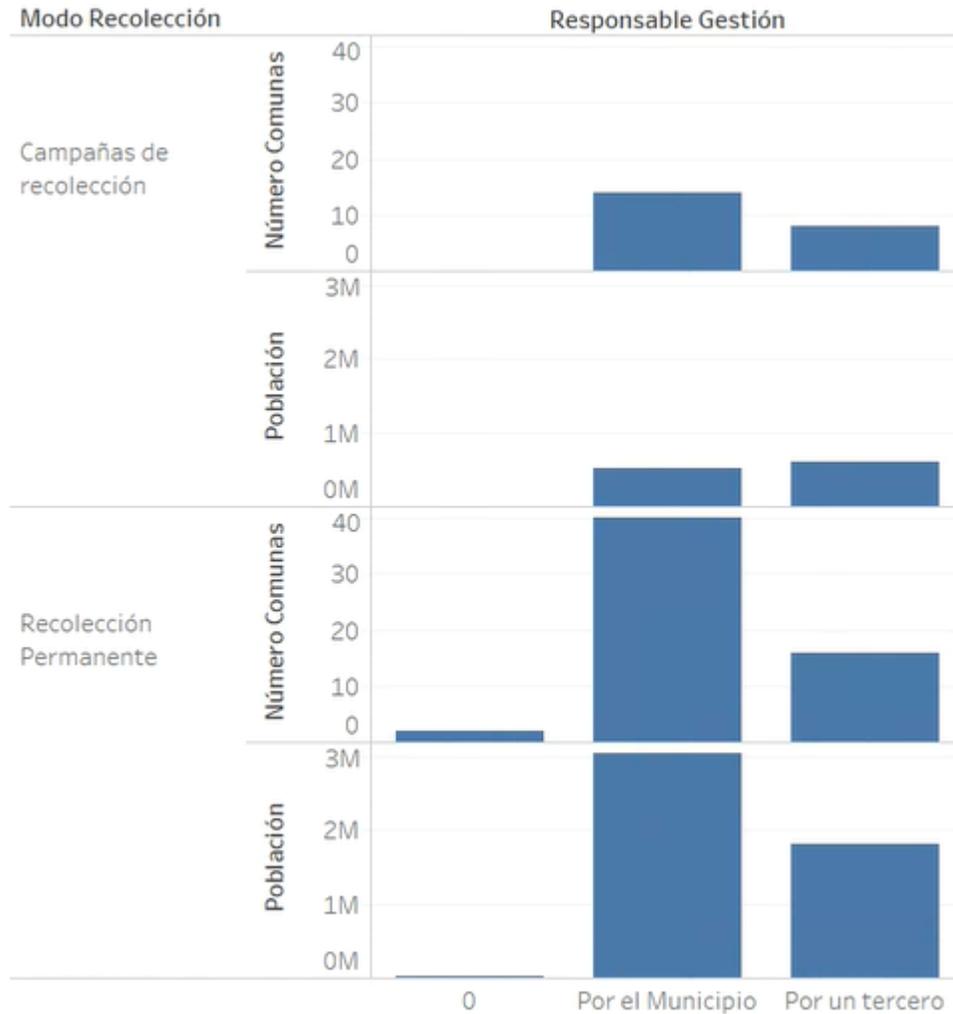


Figura 3-24 Responsable de la gestión de los contenedores de las PFU

Fuente: Elaboración propia

Respecto al destino de las PFU, se observa una distribución similar entre las campañas puntuales de recolección y aquellos municipios con recolección permanente (ver Figura 3-25). Entre un 64% y un 65% de las pilas son gestionadas por un tercero (“Desconocido”) o son directamente entregadas a un gestor. En la fracción restante se observan diferencias, mientras el 14% de quienes realizan campañas de recolección declaran llevarlos a otros puntos verdes (en otras comunas, o en la misma a CESFAM o colegios), sólo el 3% de quienes tienen recolección permanente mencionan esta actividad. Respecto al almacenamiento de las PFU es también una práctica habitual, observándose que el 18% de los municipios declara dicha actividad en el caso de las campañas de recolección y un 22% declara lo mismo en el caso de la recolección permanente. Destaca que aparece la alternativa de disponer las PFU junto con los otros residuos

municipales en una comuna con recolección permanente. La fracción restante declara que son gestionados mediante convenios con la SEREMI/MMA.

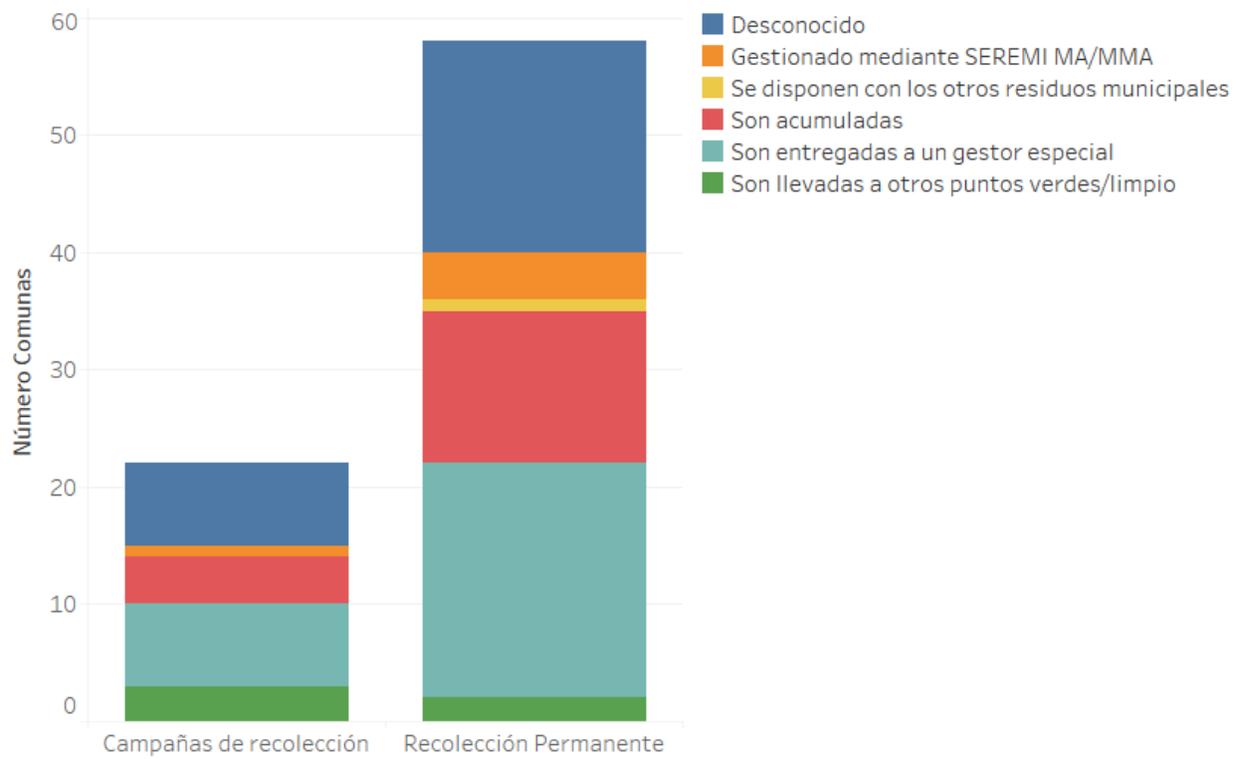


Figura 3-25 Destino de las PFU

Fuente: Elaboración propia

Al realizar el análisis de la cantidad que está siendo recolectada se cruzaron los datos con los datos de SIDREP. Para facilitar el análisis se realizó un análisis per cápita, en los cuales se observó que el principal factor determinante corresponde al modo de recolección, estudiándose diferentes combinaciones respecto a otros factores como el nivel de urbanismo y tamaño poblacional. En la Tabla 3-18 se presentan los resultados según modo de recolección, junto con el detalle según categoría de tamaño poblacional. Se observa que con recolección permanente se obtiene una recolección entre 4 y 9 veces mayor que con campañas de recolección. Este valor es consistente con lo observado con la desagregación por tamaño poblacional que se mantiene en niveles similares para las distintas desagregaciones, sin notarse una tendencia clara.

Tabla 3-18 Recolección per cápita promedio [g/hab-año] según modo de recolección y tamaño poblacional

Modo Recolección	Tamaño Poblacional	Recolección pc [g/hab-año]	
Recolección Permanente – 17 comunas	Comuna Alta Población (>100k) – 8 comunas	8.3	15.0/7.9 (1)
	Comuna Mediana Población (entre 10k y 100k) – 8 comunas	45.1/5.5 (1)	
	Comuna Pequeña Población (menor a 10k) – 1 comuna	6.9	
Campañas de recolección – 4 comunas	Comuna Alta Población (>100k) – 2 comunas	1.8	1.7
	Comuna Mediana Población (entre 10k y 100k) – 1 comuna	1.1	
	Comuna Pequeña Población (menor a 10k) – 1 comuna	2.6	

(1) Considerando Vitacura y sin considerar Vitacura. Vitacura tiene una tasa anual de recolección per cápita de 115 gr, escapando de los valores observados en las otras comunas.

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.3 Resultados PFU con destino desconocido

Para la estimación de las PFU con destino desconocido a nivel comunal, se realizó una distribución de las pilas con destino final conocido a nivel comunal. Para ello, el modelo toma como dato las PFU recolectadas por los municipios para los cuales se cuenta con información y los atribuye en su totalidad a dicha comuna. Este supuesto resultará en una mayor recolección para aquellos municipios que son receptores de PFU desde otras comunas.

Esta fracción es restada del total de PFU identificadas de la base de SIDREP. El resultado de esta resta es distribuido, de acuerdo, a la generación de PFU en las diferentes comunas estimado en la Sección 3.3.2.

En la Tabla 3-11 se presentan la agrupación de los residuos homologados a pilas de los datos de SIDREP, distinguiéndose dos agrupaciones: residuos clasificados como “pilas” y residuos clasificados como “pilas y otros”. El total de residuos cuantificado para dichas agrupaciones se presentó en la Tabla 3-14, observándose que la implicancia de considerar uno o las dos clasificaciones es, en forma gruesa, duplicar o no la cantidad total de pilas consideradas como con destino conocido.

En vista de lo anterior, se generan dos escenarios de análisis:

- Escenario conservador: sólo se consideran como pilas con destino conocido los residuos agrupados como “pilas”
- Escenario optimista: se considera como pilas con destino conocido la totalidad de los residuos agrupados como “pilas” y como “pilas y otros”.

En la realidad es esperable una situación intermedia entre ambos escenarios, donde sólo una fracción de los residuos de “pilas y otros” correspondan efectivamente a PFU. Sin embargo, ante la falta de información para realizar una aproximación más cercana se presentan ambos escenarios como una forma de dar un rango respecto de los valores posibles.

Como resultado de esta estimación se cuenta con una estimación de las PFU según:

- Comuna
- Tipo de pila
- Año
- Enfoque de generación de PFU
- Escenario de residuos SIDREP considerado

Para dar cuenta de la magnitud de la diferencia entre los diferentes escenarios en la Tabla 3-19 se presenta las PFU con destino desconocido a nivel nacional según la combinación de los diferentes escenarios. Se observa que para el año 2019, la diferencia entre el enfoque por pila o pila de reemplazo en la generación de PFU tiene mayor impacto que la diferencia entre el escenario conservador y optimista de cuáles residuos SIDREP considera.

Tabla 3-19 PFU [kg] con destino desconocido según combinación de escenarios

	Conservador: Sólo Pilas	Optimista: Pilas y otros
Por Pila	1,765,992	1,456,145
Pilas de Reemplazo	2,776,445	2,466,598

Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Estimación de PFU según destino final desconocido

Una vez estimada la cantidad de PFU con destino final desconocido, se procede a realizar la estimación según destino final. Dado que se considera que la mayor parte de los usos de las pilas, especialmente de aquellas que terminan con destino final desconocido, son de uso residencial se supone que habitualmente terminarían en los mismos destinos finales que el resto de los residuos domiciliarios. A la fecha no se cuenta con ninguna evidencia que permita suponer que el destino de las PFU sería distinto al del resto de los residuos domiciliarios. Aun cuando podría haber acumulación en las casas, se supone que sería limitado y no tendría un impacto relevante en el destino de las PFU generados, aunque podría alterar por ejemplo el tiempo medio de residencia (ver Sección 3.3.2).

Respecto al detalle comunal de los Sitios de Disposición Final (SDF) se considera la distribución regional a partir del catastro del diagnóstico realizado por la SUBDERE (2018). Si bien se cuenta con la información detallada a nivel comunal se considera que, dado los niveles de incertidumbre asociados al resto de las etapas, es razonable suponer que todas las comunas de una región se comportan igual. Lo anterior permite por un lado suavizar los resultados entre comunas y, por otro lado, comparar los resultados con otras estimaciones regionales de la distribución de los residuos.

De esta forma los resultados obtenidos cuentan con el siguiente detalle dimensional:

- Año
- Comuna
- Tipo de pila

- Tipo de SDF
- Enfoque de generación de PFU
- Escenario de residuos SIDREP considerado

Dado lo anterior, los resultados se presentan con un detalle de 4 dimensiones: tipo de pila, comuna, tipo de SDF y año, para una combinación de 4 escenarios diferentes dada por la combinación de las 2 dimensiones de escenario: enfoque generación PFU y escenarios de residuos SIDREP considerado. Los resultados a nivel nacional para el año 2019 son presentados en la Tabla 3-20.

Tabla 3-20 Estimación de PFU [kg] con destino desconocido según tipo de SDF, año 2019

Distribución tipo SDF	Residuos SIDREP considerados	Enfoque de generación PFU	Basural	Vertedero	Relleno Manual	Relleno Sanitario	Total PFU destino desconocido
Escenario distribución SDF por SUBDERE	Conservador Sólo Pilas	Por Pila	44,382	333,108	18,637	1,369,865	1,765,992
		Pilas de Reemplazo	67,848	520,779	28,329	2,159,489	2,776,445
	Optimista Pilas y Otros	Por Pila	36,583	274,930	15,368	1,129,264	1,456,145
		Pilas de Reemplazo	60,267	462,829	25,167	1,918,335	2,466,598

Fuente: Elaboración propia

4. Identificación de impactos (beneficios y costos) económicos, sociales y ambientales asociados al manejo del producto prioritario pilas

En la presente sección se identificarán y cuantificarán tanto los costos y beneficios económicos de cada etapa de la gestión de las PFU, así como el impacto ambiental asociado a cada una de ellas. Junto a esto se buscará mantener el nivel de detalle propuesto, especificando los impactos según la composición de pilas y acumuladores en la medida de que esta información pueda ser entregada. Resulta de interés realizar esta identificación ya que, como se presentó previamente, la composición de pilas y acumuladores clasificadas en el producto prioritario pilas (ver Tabla 3-3) incluye metales pesados de alta toxicidad como mercurio, plomo y cadmio, así como otros elementos menos de menor riesgo, pero que de todas maneras no deben ser dispuestos junto a la basura municipal, como níquel, zinc, manganeso y litio (Commision of the European Communities, 2003). La exposición a estos elementos tiene efectos tóxicos y cancerígenos sobre la salud humana, tanto en el corto como en el largo plazo, a la vez que algunos de ellos tienen efectos sobre los ecosistemas, por ejemplo, por efectos fitotóxicos (Javed & Usmani, 2019; WHO, 2010, 2017b, 2018, 2019). Debido a esto, se destaca que a través de su disposición las PFU pueden liberar metales tóxicos que terminan siendo drenados junto a los líquidos lixiviados típicamente generados en sitios de disposición (Karnchanawong & Limpiteeprakan, 2009; Panero, Romoli, Achilli, Cardarelli, & Scrosati, 1995), mientras que su incineración puede despedir varios gases peligrosos (Almeida, Xará, Delgado, & Costa, 2009).

Se realizó una revisión de antecedentes tanto nacionales como internacionales con el fin de identificar las metodologías usadas para evaluar la gestión de los residuos del producto prioritario pilas. Se analizaron los métodos para la estimación tanto de los impactos ambientales como de los impactos económicos. En la Tabla 4-1 se presenta una síntesis de la literatura revisada.

Tabla 4-1 Resumen de la revisión de antecedentes nacionales e internacionales

Título	Referencia	Tipo de pila	Asunto	Metodología Ambiental	Metodología Económica
Local government household battery collection programs: costs and benefits	(Shapek, 1995)	MnO ₂ , Ni-Cd, HgO, litio, ZnC	Análisis costo beneficio	Realiza una visión general de los posibles impactos ambientales al disponer o incinerar pilas	Presenta costos totales de recolección, reciclaje y disposición de las PFU como una proyección por 5 años para el estado de Florida
Impact Assessment on Selected Policy Options for Revision of the Battery Directive	(BIO Intelligence Service, 2003)	MnO ₂ , Zn-C, litio, botón, Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion	Análisis costo beneficio	Hacen un ACV complejo para distintos escenarios. Menciona pérdidas disipativas de Cd, emisiones de CO ₂ , SO _x , NO _x y consumo de energía primaria.	Presenta costos de recolección, selección, reciclaje (para cada tipo de pila), administración, relaciones públicas y comunicación.
Battery Waste Management Life Cycle Assessment	(ERM, 2006)	MnO ₂ , Zn-C, Zinc-aire, litio, Ag ₂ O, Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion	Análisis costo beneficio	Presentan un análisis completo de los impactos (costos y beneficios) ambientales que tiene el proceso de reciclaje sobre recursos abióticos, capa de ozono, calentamiento global, ecotoxicidad de agua fresca y suelos, acidificación, eutroficación e impactos sociales y de toxicidad sobre humanos.	Considera los costos de recolección, selección, reciclaje y disposición final de pilas, realizando una proyección de ellos para años futuros bajo múltiples escenarios. Incluye un análisis de los costos económicos por daños ambientales e impactos a la salud humana.
Impact Assessment of Implementation of European Batteries and Accumulators Directive (2006/66/EC) in the UK	(DEFRA, 2008)	MnO ₂ , Zn-C, Ag ₂ O, pilas de óxido de mercurio	Análisis costo beneficio	Cuantifica beneficios debidos a pequeñas reducciones de los impactos al cambio climático y sobre la salud humana producto de la eliminación de pilas. Presenta también cualitativamente impactos sobre la salud del ecosistema por la reducción de la disposición.	Considera costos de recolección, selección, publicidad, monitoreo, administración y tratamiento relacionados al programa de reciclaje de pilas. Monetiza los beneficios por reducción de emisiones de CO ₂ .

Título	Referencia	Tipo de pila	Asunto	Metodología Ambiental	Metodología Económica
Análisis de Factibilidad en la Recolección y Recuperación de Pilas de Zinc-Aire para Audífonos Cubiertos por el POS	(Espeleta Ríos, Rocha García, & Santos Milachay, 2012)	Zinc-aire	Análisis de factibilidad recolección y recuperación	Expone los impactos ambientales que tiene la producción y disposición de zinc, acero y mercurio, metales que contenidos en las pilas.	Realiza un análisis VAN considerando los costos totales de transporte, almacenamiento, publicidad y disposición de pilas, siendo éstos desagregados por mes y por año.
Business and Public Policy Case for Battery Stewardship (handheld batteries)	(MS2, 2013)	MnO ₂ , Zn-C, botón, Ni-Cd, etc.	Reciclaje en Australia	No hay análisis ambiental.	Utiliza costos de reciclaje y de transporte.
Evaluación de los Impactos Ambientales, Sociales y Económicos de la Implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor en Chile aplicada a Pilas y Acumuladores	(Amphos 21, 2014)	MnO ₂ , Zn-C, litio, botón, Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion	Evaluación de impactos económicos, sociales y ambientales	Presenta la variación que existe en términos de emisiones de CO ₂ y de uso de energía entre el uso de metales provenientes del reciclaje de pilas versus el uso de metales vírgenes.	Considera el total de pilas desechadas anualmente, el costo de tratamiento asociado y finalmente el costo total del programa y de cada una de sus etapas (recolección, selección, difusión y tratamiento)
Managing End-of-Life Lithium-ion Batteries: an Environmental and Economic Assessment	(Wang, 2014)	Li-ion	Beneficios del reciclaje de acumuladores de litio	ACV en términos de uso de energía según metal contenido en los acumuladores (MJ/kg) y Ecotoxicidad (puntos por tipo de metal).	Realiza una estimación de los costos totales del programa de reciclaje. Luego evalúa la cantidad y precio de los metales necesarios para cubrir los costos totales.
Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure	(Wang, Gaustad, Babbitt, & Richa, 2014)	Pilas genéricas, Ni-Cd, Li-ion	Análisis costo-beneficio acumuladores de litio	No hay análisis ambiental.	Según la composición química de la pila de litio, estudian qué tan rentable puede ser el reciclaje de sus componentes para los recicladores. Costos variables totales, que incluyen recolección, transporte y procesamiento. Costos fijos, con capacidades asociadas, que incluyen sueldos de administración, arriendo de oficinas y áreas de procesamiento.

Título	Referencia	Tipo de pila	Asunto	Metodología Ambiental	Metodología Económica
Final Impact Assessment on amendments to the Government Guidance Notes on the Waste Batteries and Accumulators Regulations 2009 (definition of a “portable” battery)	(DEFRA, 2015)	Pilas genéricas	Análisis costo beneficio	Presenta cualitativamente beneficios ambientales del reciclaje, tales como una reducción en el uso de metales vírgenes, menores emisiones de GEI y evita el lixiviado de metales en vertederos.	Costo de tratamiento (por tonelada).
The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries	(Boyden, Soo, & Doolan, 2016)	Li-ion	Valor potencial de acumuladores desechados	ACV que mide el potencial de calentamiento global, toxicidad sobre humanos y ecotoxicidad terrestre que involucra el transporte y reciclaje (por procesos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos) de pilas.	Presenta el precio de venta de níquel, aluminio, cobre, acero y óxido de cobalto-litio, metales que se pueden extraer a través del reciclaje de pilas de Li-ion.
Evaluation of the Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators	(Stahl et al., 2018)	MnO ₂ , Zn-C, litio, Ag ₂ O, Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion	Evaluación de aplicación Ley REP a pilas en Europa	Presenta cualitativamente los impactos ambientales y riesgos a la salud que tiene cada etapa del ciclo de vida (extracción de metales, producción, uso y reciclaje) de pilas alcalinas, Li-ion y Ni-Cd	Presenta costos para 5 países europeos en 2011 y 2016.
EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model	(Argonne National Laboratory, 2019)	Pilas genéricas	Modelo de costos de reciclaje de pilas	No presenta metodología ambiental	Presenta costos de inversión para la compra de maquinaria necesaria para llevar a cabo los distintos procesos de reciclaje. Se presentan precios para distintos equipos según la capacidad de tratamiento requerida

Fuente: Elaboración propia

A partir del análisis de la experiencia internacional y nacional resumida en la Tabla 4-1, es que en los siguientes capítulos se realiza la identificación de costos y beneficios económicos y financieros, e impactos socioambientales (Sección 4.1) mientras que en la Sección 4.2 se sistematizan, analizan y definen los costos unitarios potenciales a utilizar en el desarrollo del presente estudio.

Se llevó a cabo una sistematización de los costos económicos unitarios reportados en los distintos documentos analizados. Esta sistematización se presenta en los anexos digitales, en el documento “AnexoDigital-Costos-beneficios económicos y financieros.xlsx”. En esta base de datos los campos incluyen:

- Tipo de costo
- Etapa de la gestión de PFU
- Tipo de Pila (según referencia)
- País o Estado
- Moneda
- Año
- Valor medio (UF/ton)

Para poder comparar los valores propuestos por los distintos estudios fue necesario calcular el equivalente del precio propuesto por cada uno en UF correspondiente al año en cuestión. Con el fin de lograr esto, en primer lugar se calculó el equivalente en USD utilizando la conversión entregada por el World Bank (World Bank, 2019) para luego convertir tal valor a CLP según el mismo factor, valor que finalmente puede ser llevado a UF del año correspondiente utilizando la información disponible en el Servicio de Impuestos Internos (Servicio de Impuestos Internos, 2020).

4.1 Identificación de costos/beneficios e impactos

Tal como se observó en la revisión de antecedentes nacionales e internacionales (ver Tabla 4-1), los costos considerados en las evaluaciones y análisis se diferencian por etapa de gestión de las PFU y, en algunas ocasiones, por el tipo de pila cuando es pertinente. De modo que se opta por mantener este nivel de detalle al momento de presentar los costos y beneficios económicos y financieros e impactos socioambientales, donde las etapas de la gestión de PFU utilizadas corresponden a las presentadas a continuación en la Tabla 4-2 (ver Anexo 7.2. para mayor detalle sobre la justificación de la selección de estas etapas).

Respecto a la alternativa de exportación de los residuos con el objetivo de su posible valoración, se escapa del alcance del presente estudio la evaluación de la factibilidad legal de lo anterior. Sin perjuicio de lo anterior, se considera que la exportación no sería una etapa per sé, puesto que, desde el punto de vista de la cadena de gestión, la única diferencia es que la etapa final de disposición o reciclaje se realiza fuera de las fronteras. En este sentido, la exportación sólo implicaría un aumento en los costos asociados a transporte.

Tabla 4-2 Etapas de la gestión de PFU a ser consideradas en el presente estudio

Etapa	Descripción y Alcance
Recolección	<p>Según la definición del Proyecto de Reglamento Sanitario de Labores de Recolección e Instalaciones de Recepción y Almacenamiento de Residuos de Productos Prioritarios, es la operación consistente en recoger residuos, incluido su almacenamiento inicial, con el objeto de transportarlos a un centro de acopio, una instalación de valorización o de eliminación, según corresponda.</p> <p>En otras palabras, es un proceso en el que se utilizan sistemas establecidos para recolectar las PFU, que incluyen puntos de recolección con contenedores donde los usuarios puedan llevar sus residuos, los cuales son recogidos periódicamente para ser propiamente tratados y que generalmente se ubican en espacios públicos de municipalidades, instituciones educacionales o en las tiendas de los mismos productores. Otra alternativa es la recolección a domicilio de las PFU y otros residuos reciclables, separados de los residuos domiciliarios.</p> <p>En esta etapa se incluye también el almacenamiento en sitios con condiciones apropiadas para el acopio de residuos peligrosos hasta que estos puedan ser tratados, hasta que alcancen un volumen que justifique su transporte hacia una planta de reciclaje, o bien hasta que se cumpla el plazo de 6 meses de almacenamiento permitidos por el DS 148 para residuos peligrosos (Ministerio de Salud, 2004).</p>
Transporte	<p>Luego de ser recolectadas, las PFU pueden ser trasladadas a un centro de acopio, desde el cual son posteriormente transportados para continuar con su tratamiento, pudiendo ser llevadas a una planta de reciclaje, o directamente a sitios de disposición final. Este transporte debe cumplir con los estándares regulatorios para el manejo de residuos peligrosos de acuerdo al DS 148 (Ministerio de Salud, 2004).</p>
Selección	<p>Clasificación de las PFU según su composición química, previa al reciclaje, para entregar el tratamiento adecuado a cada tipo y tener una mejor eficiencia de recuperación de los metales.</p>
Reciclaje	<p>Tratamiento aplicado a las PFU, según su composición, generalmente por medio de un proceso de lixiviación, que puede ser hidrometalúrgico o pirometalúrgico.</p> <p>En esta etapa se incluyen también un pretratamiento en que se remueven las etiquetas plásticas y el material aislante, y se trituran las pilas de manera previa a la lixiviación.</p>
Disposición adecuada	<p>Debido a que las PFU contienen metales pesados y otros componentes tóxicos y explosivos (Ver Sección 4.1.6.1 y DS 148 (Ministerio de Salud, 2004)), en el presente estudio se considera que éstas son residuos peligrosos, por lo que deben ser dispuestas de manera adecuada en rellenos de seguridad. Luego de ser sometidas a un proceso de valorización, los residuos no valorizables restantes también deben ser dispuestos en rellenos de seguridad.</p>
Disposición inadecuada	<p>La disposición inadecuada de estos residuos ocurre cuando son llevadas a destinos finales desconocidos, los cuales normalmente son rellenos sanitarios, vertederos o basurales.</p>

Fuente: Elaboración propia

A su vez, se pueden dividir los impactos por un lado en costos y beneficios económicos, y por otro en impactos sobre el medioambiente y la salud humana. A continuación se presenta una identificación de estos impactos para cada una de las etapas identificadas en la Tabla 4-2.

4.1.1 Recolección

Costos/beneficios económicos o financieros

Sin importar el esquema de recolección que se decida utilizar, se requiere financiar la logística del programa de recolección, así como una inversión inicial para comprar contenedores donde los usuarios puedan depositar sus pilas fuera de uso.

Impactos socioambientales

Más allá de los impactos asociados al ciclo de vida de los contenedores utilizados en la recolección de los residuos, no se reconocen impactos socioambientales significativos, ya que no se requiere de consumo de combustibles, uso de energía u operación de maquinarias en esta etapa. De todas formas, la existencia de una mayor cantidad de campañas y contenedores de recolección, debiese aumentar la visibilidad y conciencia ambiental sobre los impactos negativos asociados a la disposición inadecuada de pilas fuera de uso, además de incentivar y facilitar la disposición adecuada de estas. Los impactos socioambientales de disminuir la disposición inadecuada se encuentran abordados en la Sección 4.1.6.

Esta etapa no se refiere al transporte asociado al manejo de las pilas fuera de uso, el cual si presenta impactos socioambientales.

4.1.2 Transporte

Costos/beneficios económicos o financieros

Se requiere transportar los residuos desde los puntos de recolección de PFU a plantas donde ocurre su selección y reciclaje, o bien directamente a un SDF. Para esto los costos a considerar corresponden al arriendo o compra de vehículos, sueldos de personal y combustible consumido por kilómetro recorrido.

Impactos socioambientales

El transporte de vehículos genera distintos tipos de emisiones producto del consumo de combustible, desgaste de neumáticos y desgaste de frenos. La principal fuente de emisiones corresponde al consumo de combustible, que libera GEI, material particulado y NOx. Además de esto, es necesario que los vehículos de transporte cumplan con los requerimientos presentados en el DS 298 de transporte de cargas peligrosas.

4.1.3 Selección

Costos/beneficios económicos o financieros

La selección de residuos es intensiva en mano de obra, por lo que se esperan costos asociados al sueldo de quienes se encarguen de este proceso. Además, para la segregación de los residuos se pueden usar distintos equipos, con lo cual se reduce la carga asociada al pago a personal, pero tienen asociado un costo de inversión, operación y mantención.

Impactos socioambientales

No se reconocen impactos socioambientales para esta etapa.

4.1.4 Reciclaje

Costos/beneficios económicos o financieros

A través del reciclaje de PFU se pueden percibir simultáneamente costos y beneficios financieros (egresos e ingresos). Por un lado, se requiere de una inversión inicial para comenzar la operación de una planta de reciclaje, la cual luego implica costos fijos relacionados a la mantención de maquinaria y sueldos de personal, así como costos variables debidos al consumo de energía y otros insumos requeridos para el tratamiento de los residuos, los cuales difieren según el proceso de valorización utilizado y el tipo de pila gestionado. Por otro lado, a través de la valorización de las PFU es posible extraer metales con valor de mercado. A continuación, en la Tabla 4-3, se presentan los metales que se pueden rescatar de los distintos tipos de pilas.

Tabla 4-3 Metales recuperados a través del reciclaje de distintos tipos de pilas

Tipo de pila	Tipo de pilas (abreviado)	Metales recuperados
Pila de dióxido de manganeso (alcalina)	MnO ₂	Se recupera zinc y manganeso
Pila de zinc-carbono	Zn-C	Se recupera zinc
Pila de óxido de mercurio	HgO	Se recupera mercurio Se pueden recuperar pequeñas cantidades de zinc o cadmio
Pila de óxido de plata	Ag ₂ O	Se recupera plata y zinc
Pila de litio	Litio	Se recuperan pequeñas cantidades de zinc
Acumulador de níquel - cadmio	Ni-Cd	Se recupera cadmio y Fe-Ni
Acumulador de níquel-hidruro metálico	Ni-MH	Se recuperan cobalto, metales preciosos y Fe-Ni
Acumulador de iones de litio	Li-ion	Se recupera cobalto

Fuente: Elaboración propia a partir de (Dolker & Pant, 2020; Norouzi, Adeli, & Zakeri, 2020; Scott, 2009; Stahl et al., 2018)

Impactos socioambientales

Por lo general, en las metodologías levantadas internacionalmente, la evaluación ambiental se aborda por medio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). En este caso, la evidencia de la experiencia internacional indica que se realiza una comparación entre la línea base sin aprovechamiento de los residuos de pilas, o a muy baja escala, la cual se compara con el escenario en que estos sí son tratados y valorizados. En dichas evaluaciones, se concluye que finalmente existe una ganancia ambiental debido a que se están recuperando metales valiosos, cuyo uso reduce la demanda de metales y materias primas vírgenes. A través de esto no sólo se evita el agotamiento de recursos naturales, sino que también se evitan los impactos socioambientales asociados a la extracción de tales metales, la cual implica un alto consumo de energía, agua y emisiones de GEI, material particulado y otros contaminantes. A pesar de lo anterior, cabe destacar que el proceso de reciclaje también consume energía y es responsable de emisiones de gases contaminantes, pero estos impactos son menores a los beneficios que implica la valorización de los residuos.

Por otro lado, al reciclarse una PFU se evitan los impactos socioambientales que implica la gestión inadecuada de estos residuos, los cuales dependen del tipo de pila en cuestión, impactos que son descritos en la Sección 4.1.6.

4.1.5 Disposición adecuada

Costos/beneficios económicos o financieros

La disposición de residuos peligrosos requiere de mayores medidas de seguridad y de control, por lo que esta gestión resulta más costosa cuando se la compara con el escenario de gestión inadecuada.

Impactos socioambientales

El depósito de residuos utiliza un volumen considerable, en el contexto de que esta disposición está sujeta a límites de físicos de capacidad.

4.1.6 Disposición inadecuada

Costos/beneficios económicos o financieros

Si bien la disposición inadecuada de los recursos tiene un costo menor a la disposición en rellenos de seguridad, su gestión suele tener un costo, el cual depende del SDF.

Impactos socioambientales

En cuanto a impactos socioambientales, a partir del análisis de las metodologías utilizadas por los estudios que son descritos en la Tabla 4-1 se observa que en algunos de ellos se identifica un potencial riesgo de infiltración de contaminantes contenidos en el lixiviado de los rellenos sanitarios. Sin embargo, en estos mismos estudios se considera que este tipo de sitio de disposición final cuenta con buena tecnología y regulaciones que impiden que este lixiviado percole y llegue a cuerpos de agua por lo que ningún estudio de los analizados utiliza metodologías para cuantificar y/o valorizar este tipo de impacto.

Se reconoce que en Chile la situación de disposición final de residuos no es realizada siempre en rellenos sanitarios que cuentan con la tecnología y protección necesaria para disminuir los riesgos de infiltración de percolados (ver Tabla 3-20 en donde se presenta, la estimación de pilas que se dispone inadecuadamente en sitios de disposición final que no corresponden a rellenos sanitarios). Si bien no existen metodologías directas de cuantificación y valoración para incluir este impacto en una evaluación socioeconómica, dado que se reconoce como un impacto relevante, en la Sección 4.2.7 se presenta una metodología alternativa para su valoración.

Se detallan a continuación las características de toxicidad y potenciales contaminantes que pueden ser emitidos hacia lixiviados para cada tipo de pila estudiado.

4.1.6.1 Impactos ambientales por metales

Como se ha mencionado previamente, las pilas y acumuladores contienen metales pesados y otros componentes peligrosos, pudiendo ser tóxicos y explosivos. A continuación se estudiarán los distintos efectos sobre la salud humana y los impactos ambientales de estos metales.

Pilas secas de dióxido de manganeso (alcalinas)

Las pilas de dióxido de manganeso están compuestas principalmente por zinc, manganeso e hidróxido de potasio. Todas estas sustancias son tóxicas sólo al ser ingeridas o inhaladas en altas concentraciones, siendo el manganeso el elemento más peligroso entre ellas, pudiendo causar daños neurológicos en casos extremos (ATSDR, 2012). Por otro lado, el zinc puede causar daños en el medioambiente al ser acumulado en suelos o agua y es considerado “extremadamente tóxico” para organismos acuáticos (Wu, Harper, & Harper, 2019).

Pilas secas de óxido de mercurio

Se ha visto que la intoxicación por mercurio afecta mayoritariamente al sistema nervioso, pero también puede dañar los sistemas motor, renal, cardiovascular, inmune y reproductivo (Dolker & Pant, 2020). Junto a esto cabe destacar también los impactos relativos tanto al zinc como al cadmio, los cuales se detallan en las secciones correspondientes a las pilas de dióxido de manganeso (Sección 0) y a los acumuladores de níquel-cadmio (Sección 0) respectivamente.

Pilas secas de óxido de plata

El consumo de plata por un tiempo prolongado produce argiria (enfermedad que causa una decoloración azul-grisácea de la piel) y puede provocar dolores abdominales (ATSDR, 1990). Se ha visto que su acumulación en suelos y en organismos no suele suceder (Ratte, 1999). Por otro lado, estas pilas también contienen zinc, el cual ya se ha mencionado puede ser tóxico para organismos acuáticos (ver Sección 0).

Pilas secas de zinc o zinc-carbono

Las pilas de zinc o zinc-carbono tienen una composición muy similar a las de dióxido de manganeso, siendo sus principales componentes zinc y manganeso. Por este motivo, se recomienda considerar sus impactos sobre el medioambiente y sobre la salud de las personas equivalentes a aquellos de las pilas de dióxido de manganeso (ver Sección 0).

Pilas secas de litio

Las pilas secas de litio o de litio-aire están compuestas principalmente por litio metálico, y solventes inflamables. Se ha visto que pueden generar hidrógeno gaseoso inflamable al contacto con agua y pueden presentar reacciones exotérmicas en caso de fallas (Lisbona & Snee, 2011), situación que puede ser peligrosa si no se disponen de medidas de seguridad adecuadas en el sitio de disposición donde se encuentren.

Acumuladores de níquel-cadmio

De acuerdo a la ATSDR, el cadmio es la séptima sustancia más riesgosa debido a su toxicidad y potencial de exposición a humanos (Jaishankar, Tseten, Anbalagan, Mathew, & Beeregowda, 2014), el cual está catalogado como un compuesto probablemente carcinógeno, puede causar enfermedades renales, y puede estar vinculado a un aumento en el riesgo de osteoporosis (Järup, Berglund, Elinder, Nordberg, & Vahter, 1998). A pesar de que solo el 2.5% de la exposición humana a cadmio proviene de acumuladores de níquel-cadmio fuera de uso (Morrow, 2001), dada la toxicidad de este elemento es importante evitar sus impactos sobre el medioambiente y la salud humana.

Junto a lo anterior, el contacto con níquel puede causar reacciones alérgicas (ATSDR, 2005), pero es poco probable que este efecto adverso se presente debido a la gestión de pilas y acumuladores. No se han observado efectos negativos sobre el ambiente producto de contaminación por níquel.

Acumuladores de níquel-hidruro metálico

Los acumuladores de níquel cadmio contienen níquel, cuyos impactos ya se han mencionado (ver Sección 0). Más allá de esto, en la literatura revisada no se hace mención de impactos socioambientales o sobre la salud humana que sean relevantes en la disposición o gestión de estas pilas, pero sí se piensa que su toxicidad es considerablemente menor a la de los acumuladores de níquel-cadmio (Scott, 2009).

Acumuladores de iones de litio

Pueden contener compuestos tóxicos como Cr, Co, Cu, Mn y Ni, así como otros compuestos que también son inflamables. En particular, se ha visto que estas PFU sufren de un “escape térmico” al hacer corto circuito producto de torsiones o cortes, con lo cual pueden alcanzar temperaturas superiores a 100°C en poco tiempo (Ren, Cox, & Wang, 2014). Por este motivo es importante que estos acumuladores sean dispuestos tomando las medidas de control apropiadas.

Resumen de impactos ambientales de los metales identificados en la composición de pilas

Tomando en cuenta la información presentada en la Sección 4.1.6.1, en la Tabla 4-4 se resumen los impactos asociados a la contaminación por distintos metales.

Tabla 4-4 Resumen de los impactos negativos sobre el ambiente y la salud humana de distintos metales presentes en pilas y acumuladores

Metal	Impactos
Plata	Consumo prolongado causa argiria Puede provocar dolores abdominales
Cadmio	Probablemente carcinógeno Puede causar enfermedades renales Puede aumentar el riesgo de osteoporosis
Mercurio	Daño al sistema nervioso, motor, renal, cardiovascular, inmune y reproductivo
Manganeso	Puede causar daños neurológicos al ser inhalado o ingerido
Níquel	Consumo excesivo puede producir efectos adversos en la sangre y riñones
Zinc	Causa daños al medioambiente al ser acumulado en suelos y agua Es extremadamente tóxico para ambientes acuáticos

Fuente: Elaboración propia

4.1.6.2 Contaminación de aguas por lixiviados

Junto a identificar los impactos de los distintos metales contenidos en las pilas se buscó también identificar y cuantificar el potencial de contaminación de aguas producto de la disposición inadecuada de las PFU. Para ello se realizó una revisión de dos estudios, los que se encargan de revisar y analizar las metodologías y resultados presentados por la literatura (CalRecovery Inc, 2007; Moguel, 2008). A continuación se presentan las principales conclusiones.

Moguel (2008) busca recopilar información con el fin de determinar la peligrosidad de los residuos de pilas fuera de uso, para lo cual revisa siete artículos internacionales. De ellos, seis aseveran que la disposición de pilas no representa un riesgo de contaminación, o bien que no existe evidencia suficiente para probar lo contrario, pero solo uno de estos estudios²¹ realiza una cuantificación que permita justificar esta aseveración. A partir de esto, Moguel concluye que todas las pilas pueden ser dispuestas sin un mayor riesgo de contaminación, lo cual se refleja a su vez en la política de países como Japón, Reino Unido, Francia y Estados Unidos, los cuales al 2008 calificaron las pilas como residuos no peligrosos. Es importante destacar en este caso que esta revisión fue confeccionada para la Asociación Mexicana de Pilas, por lo cual podría existir un conflicto de interés al momento de presentar los resultados.

La revisión de literatura realizada por CalRecovery (2007) cubre los resultados entregados por más de 80 artículos obtenidos de diversas bases de datos de universidades, instituciones, empresas asociadas al manejo de PFU y organizaciones públicas, además de revistas científicas. Se analizaron documentos que estudian la presencia de metales en lixiviados de sitios de disposición municipal, la disposición de pilas junto a basura domiciliaria y su aporte a la concentración de metales en el lixiviado, y también análisis de ciclo de vida de las pilas. De ellos, un 33% califica a las pilas como residuos peligrosos, mencionando que su disposición junto a basura domiciliaria implica un riesgo a la salud y el ambiente, pero sólo cuatro de estos estudios

²¹ Behavior of Mercury in Disposed Dry Batteries after 10 Years in Landfill Site (Yanase, Hirano, Matsufuji, & Hanashima, 2004) (disponible en japonés).

realizan mediciones directas que permitan estimar el aporte de las pilas a la concentración de metales en el suelo y en los lixiviados de estos sitios. En contraste, un 10% concluye que el riesgo de disponer pilas y acumuladores junto a basura municipal es insignificante, siendo las pilas de óxido de mercurio y los acumuladores de níquel-cadmio los únicos que requerirían de mayores medidas de seguridad para su disposición. El resto de los estudios no comentan sobre la peligrosidad de estos residuos.

A partir de esta revisión se observa lo siguiente:

- Mercurio y cadmio son los elementos tóxicos de mayor preocupación entre los contenidos de pilas y acumuladores. Por esto existe un consenso de que las pilas secas de óxido de mercurio y los acumuladores de níquel cadmio son residuos peligrosos que deben ser reciclados, siendo su disposición una vía de tratamiento menos deseada.
- Tomando en cuenta lo anterior, si bien en ocasiones se ha considerado que las pilas de dióxido de manganeso y de zinc-carbono también representan un riesgo debido a su contenido de mercurio, se destaca que estas aseveraciones se realizaron previo a la promulgación para la Unión Europea de la Directiva 2006/66/CE relativa a pilas y acumuladores (Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea, 2006), la cual limita el contenido de mercurio y cadmio en estos productos a un 0.0005% y 0.002%, exceptuando las pilas tipo botón, las cuales pueden contener hasta un 2% de mercurio. Previo a esto, varias compañías productoras de pilas a nivel mundial ya habían comenzado iniciativas para eliminar el uso de mercurio en sus productos (C y V Medioambiente, 2011).
- A pesar de existir una tendencia hacia la clasificación de todas las PFU como residuos peligrosos, en general existen pocos estudios que permitan cuantificar efectivamente sus impactos, siendo esta calificación basada principalmente en los contenidos tóxicos totales de los residuos (mercurio, cadmio y zinc principalmente), sin tomar en cuenta el potencial de liberación de estos contaminantes a suelos y agua.

A pesar de existir antecedentes que han cuantificado experimentalmente el aporte de residuos de pilas al contenido de metales en los lixiviados liberados en sitios de disposición de basura municipal, no se ha podido acceder a estos estudios, o bien han sido publicados en idiomas distintos al español o inglés. Por este motivo, se buscó información adicional que permita contrastar estas conclusiones, encontrándose un único estudio de laboratorio realizado por Karnchanawong & Limpiteeprakan (2009). En este se identifica un aumento en la concentración de metales en los lixiviados producto de la disposición de pilas y acumuladores junto a basura municipal. La metodología y resultados de este estudio serán analizados en mayor profundidad en la Sección 4.2.7.1.

4.1.7 Comparación de impactos de pilas y acumuladores

En el contexto de estudiar los impactos ambientales de la gestión de pilas, corresponde realizar una comparación entre los dos tipos de pilas presentados en este estudio, las pilas primarias y secundarias. Los acumuladores, a diferencia de las pilas primarias, tienen la capacidad de ser

recargados y así ser utilizados múltiples veces, extendiendo su vida útil. Por este motivo, se espera que el uso de estos productos implique una menor generación de residuos en peso y volumen, pero a la vez las pilas secundarias requerirían de un mayor consumo de energía en su etapa de uso en comparación a las pilas desechables.

A raíz de esto se ha visto que al menos cuatro estudios han realizado un ACV dedicado directamente a abordar esta situación (Lankey & Mcmichael, 2000; Menet & Gruescu, 2014; Parsons, 2007; UNIROSS, 2007), tres de los cuales han sido revisados por BIO Intelligence Services (2010). Estos se enfocan principalmente en realizar una distinción entre el uso de pilas alcalinas y acumuladores de níquel-cadmio o níquel-hidruro metálico, los productos de uso más común en ambas categorías de pilas. A excepción del estudio llevado a cabo por Menet & Gruescu, quienes no toman en cuenta el ciclo de vida del cargador usado para pilas secundarias, los sistemas analizados corresponden a, por un lado, una pila secundaria, su cargador y la energía usada en el proceso de recarga; y por otro la cantidad de pilas primarias requeridas para obtener la misma cantidad de energía que la entregada por las pilas secundarias. En todos los casos se estudió todo el ciclo de vida de ambos sistemas (extracción de metales, producción, uso y gestión final).

A partir de la literatura se extrae que el impacto asociado al uso de pilas recargables es significativamente menor al de las pilas alcalinas, sin importar el tipo de tratamiento final que se les entregue a los residuos (disposición, incineración o reciclaje), incluso bajo un escenario pesimista donde los acumuladores son sometidos a solo 50 ciclos de carga-descarga. En particular, los estudios mencionan que las emisiones de gases de efecto invernadero son 15 – 28 veces menores para el ciclo de vida de pilas secundarias en comparación a las pilas primarias cuando se considera un consumo de energía equivalente, lo cual está asociado principalmente a una menor necesidad de transporte de estos productos. Cabe destacar que la cantidad esperada de ciclos varía según el estudio, siendo 50 de acuerdo con Parsons, 200 según Lankey & Mcmichael y 330 de acuerdo con UNIROSS.

4.1.8 Resumen de los costos/beneficios identificados por etapa

En la siguiente Tabla 4-5 se presenta una síntesis de los costos y beneficios económicos y financieros, y los impactos socioambientales identificados, según cada etapa.

Tabla 4-5 Identificación de costos/beneficios económicos y financieros e impactos socioambientales para cada etapa del proceso de gestión adecuada de PFU por tipo de pila

Etapa	Tipo de pilas	Costos/beneficios económicos y financieros	Impactos socioambientales
Recolección	Todos	Costos de inversión en contenedores para recolección Costos administrativos Costos de campañas publicitarias	Impactos asociados al ciclo de vida de contenedores
Transporte	Todos	Consumo de combustible Sueldos de personal Costo de arriendo o inversión en vehículos	Emisiones GEI y MP por transporte en ruta
Selección	Todos	Sueldos de personal	No se reconocen impactos
Reciclaje	Todos	Costos de inversión, operación y mantenimiento de una planta de reciclaje	Mayor consumo de energía en comparación a su disposición directa (sea adecuada o inadecuada) Emisión de GEI, MP y otros contaminantes al aire Al recuperar los metales, se evitan los impactos asociados a su producción a partir de materia prima virgen.
	MnO2 Zn-C	Se recupera zinc	
	Óxido de mercurio	Se recupera mercurio	
	Óxido de plata	Se recupera plata y zinc	
	Litio	Se recuperan pequeñas cantidades de zinc	
	Ni-Cd	Se recupera cadmio y Fe-Ni	
	Ni-MH	Se recuperan metales preciosos	
Disposición adecuada	Todos	Mayor costo por tonelada dispuesta en relleno de seguridad, en comparación a su disposición inadecuada junto a residuos domiciliarios	Se requiere de espacio para contener el volumen de residuos
Disposición inadecuada	Todos	Costo que varía según el SDF	Se requiere de espacio para contener el volumen de residuos
	MnO2 Zn-C		Zinc puede acumularse en suelos Zinc puede contaminar napas subterráneas Zinc extremadamente tóxico para organismos acuáticos
	Óxido de mercurio		Mercurio extremadamente tóxico para humanos
	Óxido de plata		Plata tiene baja movilidad y acumulación en suelos y organismos vivos
	Litio		Contiene compuestos inflamables Puede prenderse en llamas en contacto con agua
	Ni-Cd		Cadmio muy tóxico para humanos
	Ni-MH		No se reconocen impactos
Li-ion	Sufre rápido aumento de temperatura ante un corte circuito producto de cortes o torsiones Contiene compuestos tóxicos y también riesgo de incendios y explosión.		

Fuente: Elaboración propia

4.2 Estimación de costos y beneficios unitarios

A continuación, se presenta una propuesta de costos unitarios, económicos y financieros y socioambientales, a considerar para la evaluación de las metas de recolección y valorización del producto prioritario Pilas. Se presentan estos costos analizándolos según cada una de las etapas descritas en la Tabla 4-2, diferenciando por tipo de pila cuando corresponde²².

4.2.1 Recolección

Costos/beneficios económicos o financieros

Para la recolección de los residuos se deben considerar tanto los costos involucrados en el equipamiento necesario para la recepción de las pilas, como en la logística del esquema de recolección.

En el primer caso, sólo Espeleta Ríos et al. (Espeleta Ríos et al., 2012) y BIO Intelligence Service (BIO Intelligence Service, 2003) han cuantificado los costos involucrados en la compra de equipamiento necesario para la recolección de estos residuos, pero sólo el último presenta costos unitarios por tonelada de pila recolectada, mientras que el primero ha medido los costos de contenedores de distintos volúmenes, sin aclarar la masa de pilas que son capaces de almacenar estos recipientes. Es por este motivo que se propone utilizar el valor propuesto por BIO Intelligence Service en este caso. Los costos estimados por ambos estudios se presentan a continuación en la Tabla 4-6. En este caso, los costos son independientes de la composición química de cada pila.

Tabla 4-6 Costos económicos y financieros [UF] involucrados en el equipamiento necesario para la recolección de PFU

Referencia	País	Tipo de costo	Costo [UF]
(Espeleta Ríos et al., 2012)	Colombia	Recipiente 35cm x 35cm	1.03
(Espeleta Ríos et al., 2012)	Colombia	Recipiente 60cm x 50cm	1.49
(BIO Intelligence Service, 2003)	Bélgica, Francia, Alemania, Holanda	Equipamiento de recolección (/ton)	4.63

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, en cuanto a la logística de un esquema de recolección, BIO Intelligence Service (2003), ERM (2006) y DEFRA (2008) cuantifican sus costos, los cuales se presentan en la Tabla 4-7. Si bien no es mencionado de manera explícita, se asume que todos ellos incluyen los costos de transporte en el costo logístico de la recolección de residuos, dado que ninguno menciona estos costos de manera separada. En este caso, se propone considerar de manera adicional el costo

²² Cabe destacar que, si bien se presentan únicamente los costos de operación para cada una de las etapas, ninguno de los estudios revisados presenta de manera explícita los costos de inversión necesarios para llevar a cabo la gestión de estos residuos, por lo que se debe asumir que estos costos están incluidos de manera anualizada en los costos variables expuestos.

presentado por BIO Intelligence Service, debido a que este estudio presenta una clara división entre los costos de equipamiento y los de logística, a diferencia de las otras dos referencias.

Tabla 4-7 Costos económicos y financieros variables [UF/ton] asociados a la logística y ejecución de esquemas de recolección

Referencia	País	Costo [UF/ton]
(ERM, 2006)	Inglaterra	10.7
(DEFRA, 2008)	Inglaterra	12.5
(BIO Intelligence Service, 2003)	Bélgica, Francia, Alemania, Holanda	18.56

Fuente: Elaboración propia

Impactos socioambientales

Como se describió en la Sección 4.1.1, los impactos socioambientales asociados a esta etapa corresponden por un lado, al impacto ambiental de las actividades asociadas a campañas y contenedores, los cuales no se consideran significativos por lo que no son cuantificados. Por otro lado, si bien con la existencia de mayor cantidad de contenedores y aumento de campañas se espera que aumente la conciencia ambiental disminuyendo la disposición inadecuada de las pilas fuera de uso, no existe información como para cuantificar una relación de causalidad. La cuantificación y valoración de los impactos socioambientales de la disposición inadecuada se discuten en la Sección 4.2.6.

4.2.2 Transporte

Costos/beneficios económicos o financieros

Los costos económicos o financieros asociados al transporte se asocian al traslado desde los centros de recolección hasta los centros de selección y reciclaje. Estos costos dependen de la localización tanto de los centros de recolección como de los centros de selección y reciclaje. De esta forma, los costos económicos variarán para cada una de las comunas del país.

El costo de transporte se aproxima mediante el costo del combustible utilizado para el transporte, para ello se considera el transporte carretero por medio de camiones autorizados para el transporte de residuos peligrosos. Esta forma de estimación permite, mediante el uso de supuestos del tipo de camiones y rendimiento, contar con una estimación sensible al punto de origen y destino de los residuos. Además de generar información, respecto del consumo de combustible, variable necesaria para estimar los impactos socioambientales.

De esta forma, se considera que los residuos serán transportados en camiones con capacidad de 3 toneladas con un consumo de 240 [gr diésel/km] (EMEP/EEA, 2019)²³. Lo anterior,

²³ Equivalente a 3.5 [km/lt] considerando la densidad de 0.84 [t/m³] referenciada en el Manual para la Elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas (MMA, 2017)

considerando un precio de 0.02 [UF/lit de diésel]²⁴, **resulta en un costo de 0.002 [UF/km-ton PFU]**. Con dicha tarifa, la cantidad de PFU a trasladar y la distancia entre origen y destino se puede estimar el costo de transporte, de acuerdo, a lo que se presenta en la Ecuación 4.

$$\begin{aligned}
 \text{CostoTransporte} \left[\frac{UF}{\text{año}} \right] &= \sum_{\text{Origen}} \sum_{\text{Destino}} \text{Tarifa} \left[\frac{UF}{\text{km} - \text{ton}} \right] * PFU_{\text{origen}} \left[\frac{\text{ton}}{\text{año}} \right] * Dist_{\text{origen}}^{\text{destino}} [\text{km}]
 \end{aligned}$$

Ecuación 4 Estimación del costo de transporte

Para la aplicación de dicha ecuación se cuenta con una matriz origen-destino, que mide la distancia en carretera entre los principales poblados de cada ciudad. Al respecto, se destaca que, ante la inexistencia de conexión terrestre, en la presente estimación no se considera el costo de las comunas Isla de Pascua, Juan Fernández, y de toda la región de Magallanes. En este sentido, tampoco se considera la potencial exportación de las PFU mediante medios marítimo o aéreos.

Impactos socioambientales

Respecto a los impactos socioambientales cuantificados, se consideran las emisiones producto de la combustión del diésel en los camiones de traslados. Para ello se considera el consumo de combustible bajos los supuestos explicitados recientemente, que equivale a 0.1 [lt/km-ton]. Utilizando la guía para la estimación de emisiones atmosféricas de EMEP/EEA (2019), se utilizan los siguientes factores de emisión.

Tabla 4-8 Factores de emisión para transporte

Contaminante	Tasa emisión [g/kg combustible]	Tasa emisión por transporte PFU [g/km-ton PFU]
CO2	3,169	253.5
MP	0.61	0.05
NOx	28.34	2.27
Carbono Negro	0.32	0.03

Fuente: (EMEP/EEA, 2019) considerando camión con capacidad de 3 tons

Si bien las emisiones de contaminantes locales tienen impactos sobre la población expuesta, la cuantificación en términos de impactos en salud se vuelve dificultosa, por cuanto no existe claridad del lugar preciso donde ocurren las emisiones, de su impacto en la concentración atmosférica, ni de la real exposición. Al respecto cabe destacar que la mayor parte de las emisiones se darían en zonas no urbanas, durante el recorrido de los camiones por las carreteras.

Por su parte, las emisiones de CO2 y de carbono negro, pueden ser cuantificadas de acuerdo a contribución al cambio climático. Para ello se considera su potencial de calentamiento global a 100 años (PCG-100), que permite cuantificar las emisiones en término de CO2 equivalente

²⁴ Considerando un precio promedio del diésel de 564 CLP/lit y una UF de 29,070 CLP/lit (31 diciembre 2020).

(CO₂e). En particular, para el CO₂ su PCG-100 es de 1 [gCO₂e/g], mientras que para el carbono negro es de 910²⁵ [gCO₂e/g] (IPCC, 2013). Lo anterior resulta en emisiones de 276.8 [gCO₂e/km-ton PFU]. Considerando el precio social del carbono vigente, de 0.823 UF/tCO₂e], **el costo ambiental es de 2.28e-4 [UF/km-ton PFU]**.

4.2.3 Selección

Costos/beneficios económicos o financieros

Los costos de selección expuestos por la literatura revisada se presentan en la Tabla 4-9 a continuación. De ellos, se puede ver inmediatamente que el propuesto por ERM es considerablemente mayor al presentado por los otros estudios. Esto se debe a que el valor propuesto por ERM corresponde a una suposición a la cual se llegó luego de hablar con agentes de la industria, pero este valor fue posteriormente corregido por DEFRA, quienes presentan un valor significativamente menor. Se propone utilizar el costo propuesto por DEFRA por sobre el presentado por BIO Intelligence Service únicamente por ser un estudio más reciente, el que puede reflejar de mejor manera la reducción de costos debido a economías de escala y a tecnología más avanzada.

Tabla 4-9 Costos económicos y financieros variables [UF/ton] asociados a la selección y segregación de PFU

Referencia	País	Costo [UF/ton]
(ERM, 2006)	Inglaterra	26.9
(DEFRA, 2008)	Inglaterra	5.2
(BIO Intelligence Service, 2003)	Bélgica, Francia, Alemania, Holanda	9.3

Fuente: Elaboración propia

Impactos socioambientales

No se han identificado impactos socioambientales en esta etapa.

4.2.4 Reciclaje

Costos/beneficios económicos o financieros

En cuanto a los costos de reciclaje, se puede hacer una distinción de ellos según el tipo de pila tratada, tal como se muestra en la Tabla 4-10. Vale mencionar que todos los estudios presentan los costos de reciclaje como el precio que cobran las plantas de reciclaje por recibir los residuos. Esto implica que hay situaciones en las que el costo presentado es nulo, lo cual se debe a que el ingreso que perciben las plantas de reciclaje por la venta de los metales obtenidos luego del tratamiento es menor al costo que implica el procesamiento de tales residuos, y que por lo tanto

²⁵ Existe un rango de incertidumbre amplio que va desde 100 a 1700, asociado a su efecto sobre el albedo y su impacto en la nubosidad.

los reciben de manera gratuita en lugar de cobrar una cuota por su gestión. Para esta etapa se ha asumido que el costo de trituración y otros procedimientos llevados a cabo en la etapa de pretratamiento están incluidos dentro de los costos expuestos para todo el proceso de reciclaje.

A partir de los valores identificados en la literatura se ha construido la Tabla 4-12, donde se presentan los costos que se propone considerar para cada tipo de pila, utilizando el promedio de los costos en los casos en que exista más de un valor entre las referencias revisadas, situación que sucede producto de diferencias de precios entre los países. Por último, para todos los tipos de pilas que no se han especificado en la Tabla 4-12 se recomienda utilizar el valor genérico propuesto por DEFRA.

Cabe mencionar que los costos presentados están sujetos a economías de escala, por lo que es útil conocer las capacidades de tratamiento asociadas a estos valores. Si bien ERM no presenta las capacidades anuales consideradas para cada uno de los costos propuestos, estima que para pilas de dióxido de manganeso y de zinc-carbono existe una reducción de ~30% de los costos al aumentar la capacidad a 1,000 toneladas procesadas, y una reducción de ~45% al aumentar la capacidad a 5,000 toneladas; para las pilas de níquel-hidruro metálico el costo podría ser cero al alcanzar una capacidad de 1,000 toneladas; en el caso de pilas de litio el costo de procesamiento podría verse reducido al alcanzar capacidades mayores a 100 toneladas; y para los demás tipos de pilas no se reconocen cambios asociados a la capacidad de procesamiento. Por otro lado, BIO Intelligence Services tampoco de manera específica las capacidades de procesamiento consideradas, pero se destaca que mencionan que en Francia se procesan 3,985 toneladas de pilas de dióxido de manganeso y zinc-carbono al año, siendo esta capacidad insuficiente para tratar todas las PFU recolectadas en el país. Finalmente, DEFRA menciona únicamente la capacidad de tratamiento del país para pilas de dióxido de manganeso y zinc-carbono, la cual equivale a 500 – 1,500 toneladas anuales.

Comparando con las estimaciones realizadas para Chile, si se toma en cuenta que las pilas de dióxido de manganeso y las pilas secas de zinc representan más del 90% del mercado de pilas (ver Sección 3.3.1), y que se generan al menos 2 mil toneladas de PFU al año (ver Sección Estimación generación de PFU 3.3.2), Chile estaría generando PFU suficientes para un planta de tratamiento como la presentada por DEFRA para el Reino Unido, para estos tipos de pilas. En particular²⁶, se observa una producción de PFU de dióxido de manganeso superior a las mil toneladas anuales y pilas secas de zinc en torno a las 500 toneladas anuales. También se destaca que la tasa de crecimiento de las PFU de acumuladores de iones litio podría superar el umbral de 500 toneladas anuales durante la presente década. A esto se suma la posibilidad de que se traten localmente PFU generadas en otros países y que pudieran ser tratadas nacionalmente²⁷.

²⁶ Los valores precisos varían según el tipo de enfoque utilizado en la metodología de estimación de la generación de PFU (ver Sección 3.3.2), pero lo expuesto ocurre en todos los escenarios.

²⁷ Lo anterior sujeto a que se cumplan con las condiciones legales para el transporte de residuos con componentes tóxicos entre fronteras, análisis que queda fuera del alcance del presente estudio.

Tabla 4-10 Costos económicos y financieros variables [UF/ton] asociados al tratamiento por reciclaje de los residuos de PFU

Tipo de Pila		Referencia	País	Costo [UF/ton]	Costo promedio [UF/ton]
Pilas primarias					
Ag2O	Pila de óxido de plata	(ERM, 2006)	Inglaterra	0.0	0.0
MnO2	Pila de dióxido de manganeso (alcalina)	(BIO Intelligence Service, 2003)	Bélgica y Francia	44.0	36.5
		(BIO Intelligence Service, 2003)	Holanda	20.4	
		(ERM, 2006)	Inglaterra	45.0	
LiMn	Pila de litio	(ERM, 2006)	Inglaterra	110.1	101.4
Litio		(BIO Intelligence Service, 2003)	Francia	92.6	
		(ERM, 2006)	Inglaterra	110.1	
Botón*	Sin clasificación	(BIO Intelligence Service, 2003)	Bélgica	185.2	152.8
		(BIO Intelligence Service, 2003)	Francia	120.4	
Zn-C	Pila de zinc-carbono	(BIO Intelligence Service, 2003)	Bélgica y Francia	44.0	36.7
		(BIO Intelligence Service, 2003)	Holanda	20.4	
		(ERM, 2006)	Inglaterra	45.7	
Pilas secundarias					
Li-ion	Acumulador de iones de litio	(BIO Intelligence Service, 2003)	Francia	46.3	23.2
		(ERM, 2006)	Inglaterra	0.0	
Ni-Cd	Acumulador de níquel-cadmio	(ERM, 2006)	Inglaterra	30.6	18.8
		(BIO Intelligence Service, 2003)	UE	6.9	
Ni-MH	Acumulador de níquel-hidruro metálico	(BIO Intelligence Service, 2003)	Bélgica y Francia	0.0	6.7
		(ERM, 2006)	Inglaterra	13.4	
Todas	Otras	(DEFRA, 2008)	Inglaterra	36.4	36.4

* Pilas botón corresponden a pilas de zinc-aire, óxido de plata, óxidos de manganeso y de litio. El alto costo de reciclaje se debe a su alto contenido de mercurio.

Fuente: Elaboración propia

Mientras que en las entrevistas a recicladores nacionales fue posible identificar costos de reciclaje, los que se presentan en la Tabla 4-11. Se obtiene un rango de valores de reciclaje de pilas alcalinas realizado por Recybatt, sin embargo, este valor se debe considerar con precaución, dado que no fue posible realizar una entrevista con la empresa, para confirmar a qué corresponde este monto, y si se mantiene vigente. Al respecto, es relevante destacar que el nivel de procesamiento de Recybatt estaría entre 0.3 y 0.6 [t/mes]. En el caso de los valores de Ecominería para el reciclaje de acumuladores de iones de litio de celulares y computadores portátiles, el monto indicado se indica con signo negativo dado que es un precio que la empresa Ecominería paga como incentivo para que les entreguen estos residuos. Este valor debe ser considerado con precaución, pues depende en parte de las ventas de Cobalto recuperado – cuyo

precio es volátil – y que requiere un volumen de procesamiento de entre 3 y 4 [ton/mes] para alcanzar a cubrir sus costos²⁸.

Tabla 4-11 Costos económicos y financieros variables [UF/ton] asociados al tratamiento por reciclaje de los residuos de PFU

Tipo de pila	Referencia	Valor original	Valor medio [UF/ton]
Pila Alcalina	Entrevista WSP (2020) a Recybatt	10-20 UF/ton*	15.00
Acumulador de iones de litio	Entrevista WSP (2020) a Ecominería**	-1.21 USD/kg	-30.53
	Valor para pilas de celulares, indicado por Ecominería en entrevista realizada en esta consultoría (ver minuta en anexos digitales)	-1000 CLP/kg	-35.90
	Valor para pilas de computadores portátiles, indicado por Ecominería en entrevista realizada en esta consultoría (ver minuta en anexos digitales)	-750 CLP/kg	-26.93

* En la minuta de la entrevista realizada a Recybatt indican el valor 10 UF/ton por recepción y tratamiento, mientras que en el cuerpo del informe, en la Tabla 38, indican 20 UF/ton.

** En el informe de WSP llaman esta empresa “Ecoprojects”.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-12 Costos económicos y financieros variables [UF/ton] propuestos para ser considerados en el reciclaje de las PFU

Tipo de Pila	Costo [UF/ton]	Referencia
Pilas primarias		
Pila de dióxido de manganeso (alcalina)	36.5	(BIO Intelligence Service, 2003; ERM, 2006)
Pila de óxido de plata	0.0	(ERM, 2006)
Pila de zinc-carbono	36.7	(BIO Intelligence Service, 2003; ERM, 2006)
Pila de litio	101.4	(BIO Intelligence Service, 2003; ERM, 2006)
Pilas secundarias		
Acumulador de níquel-cadmio	18.8	(BIO Intelligence Service, 2003; ERM, 2006)
Acumulador de níquel-hidruro metálico	6.7	(BIO Intelligence Service, 2003; ERM, 2006)
Acumulador de iones de litio	23.2	(BIO Intelligence Service, 2003; ERM, 2006)
Otras	36.4	(DEFRA, 2008)

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, si bien en los valores presentados previamente se incluye de manera implícita el precio de los metales recuperados a través del reciclaje de pilas, a continuación se presenta, a modo de referencia, el precio por tonelada para estos metales. Los valores presentados corresponden a los disponibles en el sitio web del London Metal Exchange, los cuales han sido transformados a su equivalente en UF considerando el precio del dólar y de la UF en pesos chilenos al 24 de febrero de 2021²⁹.

²⁸ De acuerdo a la entrevista, ver minutas adjuntas en anexos digitales, tendrían capacidad de procesamiento de hasta 10 [ton/mes], sin embargo, en sus primeros 6 meses estarían con un procesamiento promedio de 1 [ton/mes]

²⁹ 1 UF = 29,258.21 CLP; 1 USD = 704.70 CLP

Tabla 4-13 Precio de distintos metales recuperados en el reciclaje de pilas

Metales recuperados	Precio [UF/ton]
Plata	21,361
Cadmio	S/I
Cobalto	1,250
Mercurio	S/I
Níquel	462
Zinc	69

Fuente: Elaboración propia a partir de (London Metal Exchange, 2021), obtenidos el 24 de febrero

Impactos socioambientales

Por medio de la realización de estudios de análisis de ciclo de vida de las pilas y acumuladores, se ha concluido que existe evidencia que su reciclaje presenta beneficios o ganancias ambientales comparado a su disposición final o incineración debido a que se están recuperando metales valiosos, cuyo uso reduce la demanda de metales y materias primas vírgenes (DEFRA, 2015; ERM, 2006). Por lo mismo y como se ha presentado anteriormente, de acuerdo a la experiencia nacional e internacional, resumida en la Tabla 4-1, los impactos de la realización de un tratamiento y valorización de los residuos de pilas que han sido cuantificados y monetizados corresponden a pequeñas reducciones de los impactos al cambio climático y algunos beneficios para la salud humana asociados a cambios en la emisión de contaminantes de MP10, NOx, SO2 y VOC según los escenarios de línea base (disposición final o incineración) y de implementación de políticas que fomentan el reciclaje de este tipo de residuos, ambos resultados, producto de aplicar el método de Análisis de Ciclo de Vida (DEFRA, 2008, 2015).

Debido a la evidencia existente respecto a que el tratamiento de pilas por medio del reciclaje de estas implica un beneficio ambiental respecto a disponerlo en un relleno sanitario (European Portable Battery Association, 2006), y debido a la no posibilidad de realizar una evaluación del tipo Análisis de Ciclo de Vida de la situación de línea base y de las opciones de reciclaje a nivel local, se propone utilizar como beneficio ambiental el valor de **487 [kg CO2e/ tonelada de pilas reciclada]** en comparación con su disposición final sin recuperación de recursos, valor que proviene de *Defra / DECC's 2011 Guidelines to GHG Conversion Factors for Company Reporting* (DEFRA, 2011) y que fue utilizado en las evaluaciones costo beneficio (*Impact Assesment*) asociadas a la implementación de la LEY REP de Reino Unido (DEFRA, 2008, 2015). Este valor corresponde al resultado de un análisis de ciclo de vida en donde se compara un escenario de disposición de pilas sin recuperación de material junto con un escenario en donde las pilas se reciclan recuperándose recursos evitando así la extracción de materia prima virgen.

Considerando el precio social del carbono de **0.823 [UF/ton CO2e]** (Ministerio de Desarrollo Social, 2020), implica que el reciclaje de una tonelada de pila genera un beneficio social asociado a la reducción de emisión de GEI de **0.4 [UF/ton pila reciclada]**.

Cabe destacar que, para el caso nacional, no se considera la ganancia ambiental asociada a beneficios para la salud humana de cambios en la emisión de contaminantes de MP10, NOx, SO2 y VOC, ya que, la extracción de materia prima virgen no se realiza en Chile, por lo que no sería correcto asignar dicho beneficio localmente. Coincidentemente, la evaluación realizada por DEFRA (DEFRA, 2015) tampoco incorpora este beneficio, considerando solo el beneficio ambiental de cambio en emisiones GEI debido a la recuperación de metales valiosos, cuyo uso reduce la demanda de metales y materias primas vírgenes. Por su parte, el cambio en emisiones GEI y su valoración como también el cambio de emisión para contaminantes locales asociado al transporte para la gestión adecuada de este tipo de residuo es discutido en la Sección 4.2.2.

Por otro lado, si bien se ha identificado el impacto negativo que tiene la disposición de pilas en rellenos sanitarios, vertederos y/o disposición desconocida respecto a la salud de los ecosistemas y la salud de la población producto del riesgo de lixiviación y emisión de metales pesados (ver Sección 4.1.6.2), y por ende, bajo la opción de reciclaje de estas este impacto negativo se evita, no existe suficiente información ni metodología que se haya utilizado en la experiencia internacionalmente para medir y monetizar este impacto directamente (DEFRA, 2008, 2015).

Por último, se realizó una revisión bibliográfica respecto a investigaciones asociadas a la disposición a pago por la disminución de los impactos socioambientales asociada a una mala gestión de este tipo de residuos o disposición a pago por el reciclaje de este tipo de pilas, a modo de poder incorporar aquellos beneficios no transables en el mercado, en particular aquellos asociados a reducir el riesgo hacia el ecosistema y salud de la población, no encontrándose ninguna evidencia. Este resultado es coincidente con lo realizado en evaluaciones costo beneficio asociadas a este tipo de políticas públicas, en donde no se han incorporado este tipo de estudios de disposición a pago a modo de poder monetizar los beneficios socioambientales asociados (DEFRA, 2008, 2015; NZIER, 2013). Específicamente, la revisión bibliográfica solo identificó análisis del tipo costo beneficio asociadas a este tipo de políticas públicas en el Reino Unido, para la evaluación de impacto inicial del año 2008, como también para ciertas modificaciones a la ley al año 2015. En ninguna de estas dos evaluaciones de impacto considerando un análisis del tipo costo beneficio fueron incluidos en la evaluación valores de disposición a pago por la disminución de impactos socioambientales de la disposición inadecuada. Para otros países en donde se ha identificado la existencia de regulaciones o iniciativas asociadas a este tipo de políticas públicas, como Australia, Nueva Zelanda y Estados Unidos (regulaciones que varían entre Estados), no se identificaron ni evaluaciones del tipo costo beneficio, ni existencia de estudios de disposición a pago por la gestión adecuada de este tipo de residuos.

Debido a la no existencia de evidencia y antecedentes previos para realizar una cuantificación y monetización directa de los impactos socioambientales asociados a una mala gestión de este tipo o disposición a pago por el tratamiento adecuado de este tipo de residuos, es que en la Sección 4.2.7 se presenta un método alternativo para la valorización con el objetivo de establecer un orden de magnitud de los potenciales beneficios socioambientales que se generarían por una disposición adecuada de este tipo de residuos. Asimismo, se presenta una propuesta de

indicadores que permiten cuantificar el impacto relativo asociado a la cantidad total de metales en el ambiente, que potencialmente podrían ser liberados producto de una disposición inadecuada.

4.2.5 Disposición adecuada

Costos/beneficios económicos o financieros

Los costos asociados a la disposición adecuada de los residuos de pilas se presentan en la Tabla 4-14. WSP (2020) presenta, en primer lugar, el precio que cobra Coactiva para actuar como intermediarios para la disposición final de 1 ton de PFU, valor que fue confirmado en una entrevista; el segundo valor que se presenta corresponde al rango de precios que se cobra en Volta para la disposición directa de 1 ton de PFU en relleno de seguridad. Amphos 21 (2014) presenta el precio de disposición en Hidronor, el cual se asume que corresponde al año de realización del estudio, valor que no ha sido confirmado y es disímil con el valor presentado por WSP. Por último, MS2 (2013) presenta los costos de disposición de residuos peligrosos en Australia. En este caso **se recomienda ser conservador y considerar la cota superior correspondiente al precio propuesto por Volta, es decir, 7 [UF/ton]**. Esto porque corresponde a un valor que fue medido recientemente por WSP, corresponde a un valor nacional, son responsables de la gestión de la mayor parte de las pilas de acuerdo con el RETC y se encargan directamente de esta gestión, a diferencia de Coactiva.

Tabla 4-14 Costos económicos y financieros variables [UF/ton] asociados a la disposición adecuada de PFU

Referencia	Empresa	País	Costo [UF/ton]
(WSP, 2020)	Coactiva	Chile	15.0
(WSP, 2020)	Volta	Chile	5.0-7.0
(Amphos 21, 2014)	Hidronor	Chile	10.0
(MS2, 2013)	No aplica	Australia	10.4

Fuente: Elaboración propia

Impactos socioambientales

Debido a la no posibilidad de cuantificar y valorizar directamente los impactos asociados a esta etapa, en la Sección 4.2.7 se presenta un método alternativo para la cuantificación y valorización con el objetivo de establecer un orden de magnitud de los potenciales beneficios socioambientales que se generarían por una disposición adecuada de este tipo de residuos.

4.2.6 Disposición inadecuada

Costos/beneficios económicos o financieros

Los costos económicos o financieros de la disposición inadecuada de las PFU no se diferencian de los costos económicos de otros residuos sólidos domiciliarios y asimilables. Al respecto el costo de la disposición de los residuos en SDF son variables y representan una parte significativa

de los presupuestos municipales, llegando a estimarse que entre un 20% y un 40% de los presupuestos municipales a nivel mundial se dedica a la gestión de los residuos (UN-HABITAT, 2010).

A nivel nacional, el catastro realizado en el marco del “Diagnóstico de la situación por comuna y por región en materia de RSD y asimilables” (SUBDERE et al., 2018), presenta una estimación del costo por tonelada de residuos con detalle regional y diferenciando entre el costos de recolección y transporte, del costo de disposición. Los valores reportados se presentan en la Tabla 4-15.

Tabla 4-15 Costo unitario de disposición inadecuada de residuos [UF/ton]

Región	Costo Disposición	Costo Recolección y Transporte	Costo Total
Arica y Parinacota	0.11	0.30	0.41
Tarapacá	0.46	0.70	1.16
Antofagasta	0.27	1.08	1.35
Atacama	0.55	1.23	1.78
Coquimbo	0.35	0.80	1.15
Valparaíso	0.28	1.39	1.66
Metropolitana	0.38	0.80	1.18
O'Higgins	0.32	1.13	1.45
Maule	0.34	1.43	1.77
Ñuble	0.37	0.98	1.36
Biobío	0.45	1.61	2.06
La Araucanía	0.37	1.48	1.85
Los Ríos	0.23	1.04	1.27
Los Lagos	0.29	0.95	1.23
Aysén	0.45	0.93	1.38
Magallanes	0.25	0.91	1.16

Costos originales reportados en [CLP/ton], convertidos a [UF/ton] considerando una conversión de 26,798 [CLP/UF] (31 dic 2017).

Fuente: (SUBDERE et al., 2018)

Si bien en el estudio original no se discuten las causas de las diferencias observadas entre las regiones, presumiblemente parte de las diferencias observadas corresponden al tipo de SDF, así como las distancias y tamaños de poblaciones atendidas. Ante la falta de información sistematizada comunal, y considerando que la distribución de los SDF también se hace a nivel regional (ver Sección 3.3.4), es razonable utilizar como supuesto de modelación que los costos comunales son iguales al promedio de los costos regionales.

Por último, se destaca que en los escenarios en que se considere la disposición adecuada de las PFU, los costos unitarios presentados corresponderían a costos evitados (ahorros) y luego serían considerados como beneficios.

Impactos socioambientales

Debido a la no posibilidad de cuantificar y valorizar directamente los impactos asociados a esta etapa, en la Sección 4.2.7 se presenta un método alternativo para la cuantificación y valorización

con el objetivo de establecer un orden de magnitud de los potenciales beneficios socioambientales que se generarían por una disposición adecuada de este tipo de residuos.

4.2.7 Metodología alternativa para incorporar costos/beneficios no cuantificables ni valorizables

Como ya se ha dicho anteriormente, si bien se ha identificado el impacto negativo que tiene la disposición de pilas en rellenos sanitarios, vertederos y/o disposición desconocida respecto a la salud de los ecosistemas y la salud de la población producto del riesgo de lixiviación y emisión de metales pesados (ver Sección 4.1.6), y por ende, bajo la opción de reciclaje o disposición adecuada en relleno de seguridad de estas este impacto negativo se evita, no existe suficiente información para medir y monetizar este impacto directamente (DEFRA, 2008, 2015). Además, en la bibliografía no se encontró ningún estudio del tipo disposición a pago por la disminución de los impactos socioambientales asociada a una mala gestión específica a este tipo de residuos o disposición a pago por el reciclaje de este tipo de pilas, a modo de poder incorporar aquellos beneficios no transables en el mercado, en particular aquellos asociados a reducir el riesgo hacia el ecosistema y salud de la población.

El impacto negativo que puede tener la disposición inadecuada de pilas tiene consecuencias del tipo sitio específico como también va a depender de las condiciones físicas y ambientales en las cuales se manifiesta esta disposición inadecuada. Dadas estas características, la utilización de un valor proveniente de un ejercicio de valoración ambiental en el que se levante la disposición a pago por la disminución de los impactos socioambientales asociados a la disposición inadecuada de este tipo de residuos de un modo amplio y genérico, sería lo recomendable. Sin embargo, la inexistencia de este tipo de estudios previos como también la inexistencia de recursos para realizarlo con información primaria, hacen esta opción de valoración en el marco de este estudio impracticable.

Debido a la no existencia de evidencia (i.e. falta de estudios de análisis de riesgo con todas sus etapas desarrolladas asociados a la disposición inadecuada de pilas fuera de uso) y antecedentes previos para realizar una cuantificación y monetización directa de los impactos socioambientales asociados a una mala gestión de PFU o de la disposición a pago por el tratamiento adecuado de este tipo de residuos, pero reconociendo que efectivamente existe un impacto socioambiental negativo y que existe una valoración ambiental de la sociedad por esto, es que en la presente sección se presenta un método alternativo para la valoración con el objetivo de establecer un orden de magnitud de los potenciales beneficios socioambientales que se generarían por una disposición adecuada de las PFU. Asimismo, se presenta una propuesta de indicadores que permiten cuantificar el impacto relativo asociado a la cantidad total de metales en el ambiente, que potencialmente podrían ser liberados producto de una disposición inadecuada.

4.2.7.1 Indicadores de cuantificación

Disposición evitada de metales con impacto socio ambiental

Como se ha mencionado, una aproximación a la cuantificación del riesgo de disponer residuos de pilas en sitios sin medidas de control es la cantidad total de metales contaminantes y tóxicos contenidos en ellas. En la Tabla 4-16 se presenta una estimación de los componentes de los distintos tipos de pilas³⁰ para los metales donde se han identificado impactos socioambientales. Se han agrupado los metales sin impactos socioambientales identificados en la Sección 4.1.6.1 de manera separada como “Otros metales”. Cabe destacar, que los valores son consistentes con los valores y rangos observados en otros estudios (Scott, 2009).

Tabla 4-16 Contenido total de metales por tipo de pila [kg metal/ton pila]

Tipo de pila	Contenido de metales [kg metal/ton pilas]						
	Cd	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn	Otros metales
Alcalina	-	-	223.0	5.0	-	149.0	261.0
Zn-C	-	-	150.0	-	1.0	194.0	176.0
HgO	-	310.0	10.0	10.0	-	140.0	370.0
Li	-	-	180.0	10.0	-	-	630.0
Ag2O	-	4.0	20.0	20.0	-	90.0	770.0
Ni-Cd	150.0	-	-	220.0	-	-	350.0
Ni-MH	-	-	10.0	350.0	-	10.0	340.0
Li-Ion	-	-	-	-	-	-	590.0

Fuente: Elaboración propia en base a (ERM, 2006)

Este indicador da cuenta de la cantidad de metales con impactos socioambientales que se han evitado disponer en destinos desconocidos.

Impacto sobre los lixiviados

Se ha visto que algunos de los metales contenidos en pilas son tóxicos y peligrosos, pudiendo estos ser liberados a cuerpos acuáticos a través de una disposición inadecuada, por lo que se propone como un indicador de cuantificación de riesgo el potencial de contaminación de aguas en estos casos, en particular a través de lixiviados. Para ello se ha realizado una búsqueda bibliográfica, a partir de la cual se ha encontrado un único estudio de laboratorio en el cual se modela y cuantifica la concentración de metales en los lixiviados generados en un sitio de disposición de basura municipal.

Karnchanawong & Limpiteeprakan (2009) estudiaron una experiencia para determinar el aporte de metales por la disposición de PFU junto a los residuos sólidos domiciliarios (RSD). Para ello prepararon cuatro lisímetros con distintas proporciones de contenido de PFU y RSD: Sólo RSD, 1%, 5% y 100% PFU. Para representar de mejor manera una situación real, los autores consideran

³⁰ Estos valores deben ser utilizados únicamente como una aproximación, ya que la composición de los componentes de pilas y acumuladores cambia frecuentemente según la empresa fabricante y según las tecnologías disponibles

una composición de los RSD que representa la composición real de los RSD. Asimismo, se incluyen mayoritariamente PFU alcalinas y de zinc-carbono, mientras que la proporción de acumuladores de níquel cadmio y níquel hidruro metálico es mucho menor, siguiendo la lógica de que las pilas alcalinas y de Zinc-Carbono son las principales pilas consumidas. Posteriormente estos lisímetros fueron regados de manera tal de simular la infiltración de agua que ocurre realmente en rellenos sanitarios en Tailandia. Finalmente miden la concentración de metales y pH en los lixiviados liberados en cada experimento a lo largo de los seis meses de estudio. Los resultados de este estudio en términos de lixiviado generado y concentración de metales de este lixiviado se presentan a continuación en la Tabla 4-22. Como se puede apreciar, para todos los metales analizados a excepción del Mn, la concentración de estos metales en la muestra de lixiviado que tiene presencia de residuos de pilas es más alta en comparación a aquella muestra que solo tiene presencia de residuos domiciliarios. Además, si comparamos esta concentración con la Norma Chilena de Emisión de Residuos Líquidos a aguas subterráneas establecida en el Decreto Supremo N°46, la concentración de metales también supera la norma permitida.

Tabla 4-17 Valores observados en estudios de laboratorio y su comparación con los límites de emisión de contaminantes líquidos a aguas subterráneas según el Decreto Supremo N°46

Contaminante	Valor Medio Observado (Karnchanawong & Limpiteeprakan, 2009)				Decreto Supremo N°46 (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2002)	
	0% pila	1% pila	5% pila	100% pila	Vulnerabilidad media	Vulnerabilidad baja
Volumen lixiviado [L/kg residuos]	0.77	0.80	0.78	0.24	N/A	N/A
pH	3.91 - 5.94	3.86 - 6.09	3.84 - 6.62	5.01 - 9.05	6.0 - 8.5	6.0 - 8.5
As [mg/L]	0.0054	0.0058	0.0057	0.0055	0.0100	0.0100
Cd [mg/L]	0.0110	0.0164	0.0679	0.0571	0.0020	0.0020
Hg [mg/L]	0.0213	0.0316	0.0270	0.0029	0.0010	0.0010
Mn [mg/L]	7.0500	7.2200	12.5500	24.0000	0.3000	2.0000
Ni [mg/L]	0.1000	0.2700	0.5900	0.4900	0.2000	0.5000
Pb [mg/L]	0.0099	0.0140	0.0300	0.0290	0.0500	0.0500
Zn [mg/L]	4.6100	18.5000	20.0000	12.7200	3.0000	20.0000

Fuente: Elaboración propia

A partir de la estimación de PFU con destino desconocido Sección 3.3.4 se observa que en el escenario más conservador se estarían generando cerca de 2.8 [miles de toneladas de PFU] los cuales representan en torno al 0.03% de los RSDyA dispuestos en los distintos sitios de disposición final si se considera la estimación realizada por la SUBDERE (2018). En este sentido, es esperable que la situación chilena se encuentre entre el escenario de 0% pilas y de 1% pilas estudiado en el estudio de Karnchanawong & Limpiteeprakan (2009).

En consideración de lo anterior, si se considera una relación lineal entre la proporción de PFU respecto de los residuos totales y la concentración de los diferentes contaminantes en los lixiviados, es posible a partir de los datos de la Tabla 4-17 contar con una estimación del aporte

de contaminantes a los lixiviados por tonelada de residuos. Los resultados de este proceso se presentan en la Tabla 4-18. Cabe destacar que, dado que los rellenos sanitarios tienen sistemas de control de lixiviados, se considera que en este caso no habría aporte de contaminantes a lixiviados. Por este motivo, en los anexos digitales se presenta una estimación diferenciada por comuna del aporte unitario de contaminantes a lixiviados considerando la distribución geográfica de los sitios de disposición final (SUBDERE, 2018).

Tabla 4-18 Estimación de aporte unitario de contaminantes a lixiviados [g contaminante/ton PFU]

Contaminante	Aporte a lixiviados [g cont/ton PFU]	Concentración límite OMS [ug/l] (1)	Aguas contaminadas [l/ton PFU] (3)
As	0.05	10	~5,000
Cd	0.47	3	~150,000
Hg	0.89	6	~150,000
Mn	34.75	s.i. (2)	n.a.
Ni	13.90	70	~200,000
Pb	0.36	10	~35,000
Zn	1,125.03	s.i. (2)	n.a.

(1) Valor en base al valor de las "Directrices para calidad de agua potable" (WHO, 2017a)

(2) La OMS no establece un valor en sus directrices

(3) Cantidad de agua contaminada, entendido como por sobre el límite de concentración de la OMS. Este es un supuesto grueso, con el objetivo de dar cuenta de la magnitud del impacto potencial.

Fuente: Elaboración propia

4.2.7.2 Propuesta de valoración

Con el objetivo de entregar un orden de magnitud y valores referenciales, se proponen dos enfoques de valorización ambiental asociados a la reducción del impacto ambiental de la disposición inadecuada de pilas; a) Enfoque utilizando como método de valoración el método de disposición a pago por medio de preferencias declaradas y b) Enfoque utilizando como método de valoración el método de costo de restauración.

A continuación, se presentan los antecedentes para cada uno de estos enfoques.

a) Disposición a Pago (DAP) por medio de método de preferencias declaradas

Como se ha indicado anteriormente, no existen estudios de DAP por la gestión adecuada de las PFU. Sin embargo, con el objetivo de tener un valor referencial, se propone tomar como proxi valores de disposición a pago por la disposición adecuada o por evitar la disposición inadecuada de otro tipo de residuos. Debido a que los impactos que generan en el medio ambiente y la salud de la población de las pilas son principalmente el potencial impacto de la liberación de metales tóxicos, se estima pertinente utilizar como proxi los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), ya que dentro de los impactos que estos tienen, al igual que en el caso de las pilas, se encuentra la potencial liberación de metales tóxicos, con sus correspondientes efectos en el medio ambiente y la salud de la población.

La Tabla 4-19 presenta un resumen de los estudios de DAP que se han encontrado en la literatura, junto su valor ajustado por poder de paridad de compra, en UF³¹.

³¹ Utilizando los valores de (Servicio de Impuestos Internos, 2020), (World Bank, 2019) y (World Bank, 2018).

Tabla 4-19 Revisión bibliográfica de estudios para la valoración de la DAP por la gestión adecuada de RAEE

Estudio	Resumen	Tipo de ejercicio	¿Qué aparatos electrónicos incluyen?	Qué información y qué impactos ambientales presentan al encuestado	DAP original	DAP unificada [CLP/persona-mes]
Resident's behaviour, attitudes and willingness to pay for recycling e-waste in Macau (Song, Wang, & Li, 2012)	Se determina la DAP por la gestión adecuada de los residuos electrónicos. Macau, China.	Encuesta (no especifica método)	No se especifican.	El cuestionario tenía preguntas sobre el uso de productos electrónicos y las actitudes de los encuestados sobre eliminación, la segregación y el reciclaje de desechos electrónicos, algunas preguntas sobre el conocimiento y una sección en que se describen opciones de eliminación actuales y un nuevo método hipotético de reciclaje y de pago de estos.	Se calcula la DAP mensual, por hogar, de la gestión adecuada de residuos electrónicos en USD\$2.50/hogar/mes	DAP por reciclaje de residuos electrónicos ³² : 0.008 UF/persona/mes
Willingness to pay for e-waste recycling (Rolls, Jeffery, & Bennett, 2009)	Se estima la DAP por diferentes escenarios de combinaciones de tipo de recolección (recolección diferenciada, sitios de reciclaje) y porcentaje de recuperación. Melbourne, Sydney, Adelaide, Perth y Brisbane, Australia	Experimento de elección discreta	No se especifican, aunque se mencionan el televisor y computador.	No se especifica.	Se calcula una DAP de AUS\$0.50 centavos extra al comprar un nuevo ítem para un aumento del 1% de reciclaje de desechos electrónicos.	DAP por el aumento en 1% de reciclaje de aparatos electrónicos: 0.0042 UF/persona/ítem

³² Para transformar la DAP del hogar a una individual, se consideró, según Censo 2010 de Macao, que el tamaño de familia promedio es 2.82

Estudio	Resumen	Tipo de ejercicio	¿Qué aparatos electrónicos incluyen?	Qué información y qué impactos ambientales presentan al encuestado	DAP original	DAP unificada [CLP/persona-mes]
Willingness to Engage in Pro environmental behaviour. An analysis of e-waste recycling based on a national survey of US Households (Saphores, Ogunseitán, & Shapiro, 2012)	En una encuesta nacional de hogares de EEUU, encontraron las variables más importantes para explicar la disposición a reciclar de desechos electrónicos. EEUU.	Disposición a actuar	Residuos electrónicos ("todos los productos rotos, obsoletos o pasados de moda que contienen una placa de circuito").	La encuesta tenía preguntas acerca de las actitudes ambientales y la participación con organizaciones no gubernamentales, recopiló información sobre la basura doméstica y las actividades de reciclaje, preguntaron sobre la voluntad de llevar los desechos electrónicos a los centros de reciclaje, los peligros de arrojarlos y el conocimiento de las leyes sobre desechos electrónicos.	-	-
Financing electronic waste recycling Californian households' WTP advanced recycling fees (Wisconsin DNR, 2012)	Una serie de encuestas a consumidores (2006, 2010, 2011). Wisconsin, EEUU.	Monto dispuesto a pagar declarado	Televisores, computadores y teléfonos celulares.	No se especifica.	Monto dispuesto a pagar declarado de hasta USD\$5 para reciclar dispositivos electrónicos.	Monto dispuesto a pagar para reciclar dispositivos electrónicos: 0.0449 UF/persona/ítem reciclado
Financing Electronic Waste Recycling Californian Households' WTP Advanced Recycling Fees (Nixon & Saphores, 2007)	Estiman la disposición de las personas a pagar una tarifa de reciclaje avanzada al comprar nuevos productos electrónicos. California, EEUU.	Encuesta (no especifica método)	No se especifican, pero en algunas preguntas mencionan teléfonos celulares y computadores de escritorio.	No se especifica.	Disposición a pagar un 1% adicional sobre el precio de compra para mejorar la eliminación de desechos electrónicos.	Disposición a pagar un 1% adicional sobre el precio de compra.

Estudio	Resumen	Tipo de ejercicio	¿Qué aparatos electrónicos incluyen?	Qué información y qué impactos ambientales presentan al encuestado	DAP original	DAP unificada [CLP/persona-mes]
Understanding Preferences for Recycling Electronic Waste in California: The Influence of Environmental Attitudes and Beliefs on Willingness to Pay (Nixon, Saphores, Ogunseitan, & Shapiro, 2009)	Comparan cinco programas hipotéticos de reciclaje de desechos electrónicos (pague por lo que desecha, SDDR o reciclaje de entrega en la vereda, en centros regionales, o en establecimientos de <i>retail</i>). California, EEUU.	Ranking contingente	No se especifican los residuos electrónicos, pero sí mencionan como ejemplos televisores y computadores.	Encuesta con preguntas generales sobre actitudes, creencias y comportamientos ambientales, así como del reciclaje doméstico; y sobre el reciclaje de desechos electrónicos, conocimiento de las regulaciones sobre desechos electrónicos y cantidad de desechos electrónicos almacenados en el hogar. No especifican información entregada a los encuestados.	Estiman la DAP por aumentar la conveniencia del reciclaje de desechos electrónicos, en aprox. USD\$0.13 por mes por milla equivalente anualmente.	DAP por aumentar la conveniencia del reciclaje de desechos electrónicos: 0.0001 UF/milla equivalente/mes
Estimación de Beneficios Ambientales Asociados a la Implementación de la Ley REP para los Residuos de Productos Prioritarios (Aparatos Eléctricos y Electrónicos), a través de Experimentos de Elección (GreenLab, 2019)	Se estima la DAP por la obtención de los beneficios asociados a evitar la disposición final inadecuada de RAEE. Se presentan alternativas de programas hipotéticos para el aumento del tratamiento adecuado de los RAEE. Chile.	Experimento de elección	Todos los aparatos eléctricos (“aparatos que, para funcionar, necesitan corriente eléctrica, desde un enchufe, batería o pila”), pero no considera las pilas y baterías contenidas en estos.	Se indican los impactos negativos de botar inadecuadamente los RAEE: contaminación de aguas superficiales y subterráneas, generación de microbasurales e impacto visual negativo, daño a la salud humana, daño a flora y fauna, un impacto negativo a la atmósfera y contribución al calentamiento global. También se detalla que estos impactos negativos se deben, en parte, a la presencia de metales pesados, como mercurio, plomo, y otras sustancias tóxicas.	DAP por aumento en un punto porcentual del tratamiento de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) (pago permanente mensual): -En reciclaje: \$69 -En rellenos de seguridad: \$91	DAP por aumento en un punto porcentual del tratamiento de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) (pago permanente mensual): -En reciclaje: 0.0025 UF/persona/mes -En rellenos de seguridad: 0.0033 UF/persona/mes Se presentan valores de DAP por categoría de RAEE.

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4-19 se observa que ninguno de los estudios internacionales revisados indica explícitamente cuáles RAEE están incluidos, así como tampoco indican si dentro de los residuos electrónicos incluyen o no las pilas. También, dadas las características de los estudios y de los resultados presentados, tampoco son fácilmente comparables los valores de disposición a pago, además de que las situaciones de valoración difieren también en cada estudio.

Como se aprecia en la Tabla 4-19, existe un estudio nacional de valoración de gestión adecuada de RAEE. En este estudio se realizó un análisis comparativo bajo diferentes contextos de pregunta y escenarios de valoración, que demostró los resultados de disposición a pago obtenidos en este estudio se encuentran dentro de los rangos de magnitud encontrados en la literatura (GreenLab, 2019). Este estudio tiene la ventaja de que se levantó una DAP por reciclaje y una DAP por tratamiento en relleno de seguridad de los RAEE, precisamente las dos opciones de tratamiento adecuado que tienen las pilas (ver Tabla 4-2, Sección 4.1).

Adicionalmente, este estudio también tiene la ventaja de que incorporó un método para desglosar la DAP por tipo de RAEE, por medio del cual se distribuye el pago mensual en entre distintas categorías de RAEE, de modo que se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 4-20. Esta ventaja permite hacer un proxi aún más específico según tipo de impacto y tipo de aparato.

Tabla 4-20 DAP por categoría por aumento de un punto porcentual en el reciclaje y en tratamiento en relleno de seguridad

Categoría de residuo	Aparatos eléctricos y electrónicos incluidos en la categoría	Impactos negativos específicos presentados en la encuesta*	Reciclaje		Relleno de seguridad	
			DAP por reciclaje [CLP/personas]	Intervalo de confianza	DAP tratamiento en relleno de seguridad [CLP/personas]	Intervalo de confianza
Aparatos refrigerantes	Refrigerador, aire acondicionado, congeladora.	Contiene componentes que contribuyen al calentamiento global y a la destrucción de la capa de ozono.	18.18	[15;21]	23.98	[21;27]
Electrodomésticos grandes, medianos y pequeños	Lavadora, horno, torre computador, aspiradora, ventilador, taladro, auto de juguete.	Mayor generación de residuos debido a su menor vida útil o gran tamaño.	17.95	[15;21]	23.68	[21;26]
Aparatos de iluminación	Lámpara, tubo o ampolleta fluorescente, ampolleta LED.	Las lámparas fluorescentes contienen mercurio, que provoca impactos dañinos acumulativos en los seres vivos.	15.35	[13;18]	20.24	[18;22]
Aparatos con monitores y pantallas	Celulares, tablet, computadores, monitores, televisor.	Las pantallas LCD tienen arsénico, componente tóxico y dañino para la salud. Si se rompen las pantallas se liberan sales y componentes tóxicos (arsénico, plomo, mercurio, sulfuro de zinc, entre otros), dañinos para la salud	17.52	[14;20]	23.10	[21;26]
TOTAL			69.00	[57;80]	91.00	[81;101]

* Para todas las categorías se indicaron los siguientes impactos negativos generales: "Presencia de metales pesados que pueden liberarse en el suelo y aguas subterráneas: Cromo (componentes de almacenamiento de datos), Plomo (cableado y soldaduras); Potencial daño a seres vivos; Impacto visual negativo."

Fuente: (GreenLab, 2019)

A partir de lo que se describe en la Tabla 4-20, se propone hacer un proxi a partir de la DAP por aumentar la gestión adecuada de Aparatos de iluminación y Aparatos con monitores y pantallas, tomando como DAP el promedio de los valores obtenidos para estas dos categorías. Los valores propuestos se presentan en la Tabla 4-21³³.

Tabla 4-21 Valor propuesto de DAP por el aumento en un punto porcentual (1%) del tratamiento adecuado de PFU, por reciclaje y tratamiento en relleno de seguridad

Tipo de tratamiento	DAP [CLP/persona-mes]	DAP [UF/persona-mes]
Reciclaje	16.44	0.000590
Relleno seguridad	21.67	0.000778

Fuente: Elaboración propia a partir de (GreenLab, 2019)

Para obtener un valor unitario, en término de toneladas, se revisan los antecedentes entregados durante el ejercicio de obtención de la DAP, lo cual corresponde a 128,490 [ton/año]. A partir de este valor, se toma como supuesto de que la reducción de 1% considerada en la DAP es equivalente al 1% de dicho valor. De esta forma se puede obtener un valor por tonelada en lugar de reducción porcentual. Al respecto se destaca, que dicho valor es una aproximación puesto que la DAP fue estimada por reducción porcentual y no absoluta. A partir de dicho valor, se multiplica por la población mayor a 18 años³⁴ y por lo 12 meses en un año. A partir de dicho procesamiento se obtiene una **DAP equivalente a 80.7 y 106.4 [UF/ton], para reciclaje y rellenos de seguridad respectivamente.**

b) Costo de Restauración

Un método alternativo de valoración propuesto corresponde al método conocido como “Costo de reemplazo/restauración”. Este método consiste en estimar el valor económico de un servicio ecosistémico calculando cuánto costaría en el mercado reemplazarlo con tecnología o restaurarlo, si este ha sido dañado (Cerde & Melo, 2014). En este caso, el costo representa el beneficio económico mínimo perdido por el deterioro del servicio ecosistémico, ya que la sociedad podría estar dispuesta a pagar más por su recuperación. Sin embargo, en el caso de utilizar este valor en una evaluación *ex ante*, como es el caso de la presente situación, no es seguro que la sociedad esté dispuesta a efectuar dicho desembolso económico, como también, por el contrario, podría estar dispuesta a pagar un monto mayor por reestablecer el servicio ecosistémico perdido, por lo que el valor económico utilizado es incierto, pudiendo ser tanto un valor menor como también mayor a la realidad.

En el caso de la presente situación de evaluación, para realizar una valorización utilizando este método, se requiere estimar la generación de lixiviado con presencia de metales producto de la

³³ Se utiliza el valor de la UF de 2019, 27854.4 CLP (Servicio de Impuestos Internos, 2020).

³⁴ 14,646,285 habitantes al año 2019 según estimación oficial del INE.

disposición inadecuada de pilas, que será sujeto a tratamiento, junto con el costo unitario de este último (i.e. UF/m3).

Karnchanawong & Limpiteeprakan (2009) estudiaron una experiencia para determinar el aporte de metales por la disposición final de pilas junto con los residuos sólidos domiciliarios. Para ello prepararon cuatro lisímetros con distintas proporciones de contenido de pilas y residuos sólidos domiciliarios: solo basura municipal, 1%, 5% y sólo pilas. Para representar de mejor manera una situación real, los autores buscaron mantener la proporción que se presenta en la basura domiciliaria correspondiente a cada categoría de pila, por lo que se incluyen mayoritariamente pilas alcalinas y de zinc-carbono, mientras que la proporción de acumuladores de níquel cadmio y níquel hidruro metálico es mucho menor. Posteriormente estos lisímetros fueron regados de manera tal de simular la infiltración de agua que ocurre realmente en rellenos sanitarios en Tailandia. Finalmente miden la concentración de metales y pH en los lixiviados liberados en cada experimento a lo largo de los seis meses de estudio. Los resultados de este estudio en términos de lixiviado generado y concentración de metales de este lixiviado se presentan a continuación en la Tabla 4-22. Como se puede apreciar, para todos los metales, la concentración de estos metales en la muestra de lixiviado que tiene presencia de residuos de pilas es más alta en comparación a aquella muestra que solo tiene presencia de residuos domiciliarios. Además, si comparamos esta concentración con la Norma Chilena de Emisión de Residuos Líquidos a aguas subterráneas establecida en el Decreto Supremo N°46, la concentración de metales también supera la norma permitida.

Tabla 4-22 Valores observados en estudios de laboratorio y su comparación con los límites de emisión de contaminantes líquidos a aguas subterráneas según el Decreto Supremo N°46

Contaminante	Valor Medio Observado (Karnchanawong & Limpiteeprakan, 2009)				Decreto Supremo N°46 (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2002)	
	0% pila	1% pila	5% pila	100% pila	Vulnerabilidad media	Vulnerabilidad baja
Volumen lixiviado [L/kg residuos]	0.77	0.80	0.78	0.24	N/A	N/A
pH	3.91 - 5.94	3.86 - 6.09	3.84 - 6.62	5.01 - 9.05	6.0 - 8.5	6.0 - 8.5
As [mg/L]	0.0054	0.0058	0.0057	0.0055	0.0100	0.0100
Cd [mg/L]	0.0110	0.0164	0.0679	0.0571	0.0020	0.0020
Hg (mg/L)	0.0213	0.0316	0.0270	0.0029	0.0010	0.0010
Mn (mg/L)	7.0500	7.2200	12.5500	24.0000	0.3000	2.0000
Ni (mg/L)	0.1000	0.2700	0.5900	0.4900	0.2000	0.5000
Pb (mg/L)	0.0099	0.0140	0.0300	0.0290	0.0500	0.0500
Zn (mg/L)	4.6100	18.5000	20.0000	12.7200	3.0000	20.0000

Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de utilizar este método alternativo de valoración, es posible suponer que toda aquella pila que no es dispuesta adecuadamente (i.e. es tratada en relleno de seguridad o reciclada) es dispuesta inadecuadamente mezclada con los residuos domiciliarios. Sin embargo,

si esta pila es dispuesta en rellenos sanitarios con las respectivas medidas de control de lixiviados, este lixiviado con mayor contenido de metales no es necesario de tratar, dadas las condiciones de seguridad que requieren estos sitios de disposición final. No es así el caso de aquellas pilas que son dispuestas junto a los residuos sólidos domiciliarios pero en vertederos o basurales, los cuales no tienen las medidas apropiadas de captación y tratamiento de los lixiviados generados. Esta situación implica que, con el objetivo de plantear una metodología alternativa de valoración utilizando el método de costo de restauración, todo flujo de residuos domiciliarios que posee residuos de pilas y que va a vertederos, podría implicar un costo de restauración que en este caso considera un costo de tratamiento de los lixiviados generados.

En este caso, para estimar el total de lixiviados que debiesen ser gestionados, y por ende, que implican un costo de tratamiento, se debe conocer el total de residuos sólidos domiciliarios generados que terminan siendo dispuestos en vertederos y utilizar la tasa de generación de lixiviados con alta presencia de metales producto de la presencia de pilas igual a 0.8 L/kg de residuo sólido domiciliario (Karnchanawong & Limpiteeprakan, 2009). Esta estimación se detalla en la Sección 4.3.

Por su parte, respecto a los costos de restauración, se realizó una revisión bibliográfica respecto a costos de tratamientos de aguas contaminadas, revisión que se resume en la Tabla 4-23.

Tabla 4-23 Costos identificados para el tratamiento de aguas contaminadas con componentes inorgánicos

Referencia	Tratamiento	Descripción	Componentes del costo	Costo original	Unidad del costo original ^a	Costo medio en UF	Unidad costo medio
Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Second Edition, de la EPA (Peter J. Marks, Walter J. Wujcik, 1994)	Precipitación	Se transforman los contaminantes disueltos a sólidos insolubles, facilitando así su posterior eliminación de la fase líquida por sedimentación o filtración. El proceso, por lo general, utiliza el ajuste del pH, la adición de un precipitante químico, y la floculación.	Costo de capital de sistema para precipitación de metales, para tratar 75 L/min.	\$85,000	USD	\$3,230.0163	UF
			Costo de capital de sistema para precipitación de metales, para tratar 250 L/min.	\$115,000	USD	\$4,370.0220	UF
			Costo de operación	\$0.08-\$0.18	USD/m3	\$0.0049	UF/m3
			Costo adicional de operación por tratamiento de agua subterránea por precipitación. Costo estimado de USD\$330 por tonelada métrica de lodos (USD\$300 por tonelada).	\$0.13	USD/m3	\$0.0049	UF/m3
	Filtración	Se aíslas las partículas sólidas mediante el paso de una corriente de fluido a través de un medio poroso.	Costo total de operación	\$0.36-\$1.20	USD/m3	\$0.0296	UF/m3
	Intercambio iónico	Se eliminan los iones de la fase acuosa mediante el intercambio con los iones inocuos presentes en el medio de intercambio.	Costo total de operación	\$0.08-\$0.21	USD/m3	\$0.0055	UF/m3
	Extracción de Agua (Pump & Treat)	Extracción de agua contaminada del suelo y del subsuelo, tanto de la zona saturada como de la zona no saturada. Cuando se busca actuar sobre la zona no saturada, se requiere una inyección previa de agua, que arrastre y lave los elementos contaminantes del suelo.	Diseño e instalación de sistema para 380 L/min.	\$200	USD	\$7.6000	UF
			Operación	\$0.26-\$26.4	USD/m3	\$0.5065	UF/m3

Referencia	Tratamiento	Descripción	Componentes del costo	Costo original	Unidad del costo original ^a	Costo medio en UF	Unidad costo medio
Programa de Cumplimiento Ecomaule S.A. (Ecomaule S.A., 2015)	Remoción de apozamiento en la base del relleno	Succión y conducción de apozamiento de lixiviados a una planta de tratamiento.	Incluye los costos de la maquinaria necesaria y las Horas-Hombre de personal no calificado.	\$2,000.00	CLP/m ³	\$0.0799	UF/m ³

^a Valores en moneda de los años de estudio respectivos.

Fuente: Elaboración propia

Respecto a lo presentado en la Tabla 4-23, si bien no existe ningún costo que represente de manera cercana la situación de tratamiento de aguas debido a la presencia de metales pesados en sitios de disposición de residuos sólidos domiciliarios, la mejor aproximación de costos es aquella que proviene del estudio de la EPA (1994), proponemos utilizar los valores presentados específicamente para los tipos de tratamiento precipitación, filtración e intercambio iónico³⁵, por ser los más apropiados y los más utilizados en aguas contaminadas con metales (Peter J. Marks, Walter J. Wujcik, 1994). Si bien estos valores dan cierta confianza, por encontrarse dentro del rango de valores presentados en toda la literatura revisada, se debe tener en consideración que habría mucha incertidumbre asociada a la utilización de estos en una posible valorización. Esta incertidumbre no solo estaría asociada a la pertinencia del valor al caso nacional, sino también a la dificultad de cómo identificar cuál es la cantidad de aguas contaminadas que se deben recuperar. Adicionalmente, cabe mencionar que se decide no utilizar el valor de la referencia chilena, debido a que es una medida en que ya se encuentra operativo el sistema de tratamiento, y solo incluye el bombeo y conducción de los lixiviados a dicha instalación.

Si bien, según la literatura, la precipitación sería el método más común para tratar las aguas contaminadas con metales, no es claro si los costos de operación identificados para este sistema incorporan o no los valores asociados a la inversión inicial para su instalación. Si se consideran solamente los costos de operación de la precipitación, tanto del sistema en sí como del tratamiento de los lodos generados, se obtiene un costo de operación de 0.0098 UF/m³, cuyo orden de magnitud se encuentra dentro de los rangos del valor medio estimado para los tratamientos de intercambio iónico y de filtración, también aptos para el tratamiento de aguas con metales. Por lo anterior, para una posible evaluación a modo referencial del costo de tratamiento de lixiviados con alto

³⁵ De acuerdo con la EPA (1994), la precipitación permite tratar aguas contaminadas con plomo y otros metales pesados; la filtración permite la eliminación de metales precipitados; el intercambio iónico permite eliminar todos los elementos metálicos disueltos en agua.

contenido de metales pesados, se propone utilizar el rango de costos identificados, entre el tratamiento por intercambio iónico y la filtración, lo que equivale a un costo aproximado de entre 0.0055 y 0.0296 UF por cada m³ de agua tratada.

4.2.8 Resumen de los costos unitarios propuestos por etapa

En la Tabla 4-24 siguiente se presenta una síntesis de los costos unitarios propuestos para utilizar en la evaluación de las metas de recolección y valorización del producto prioritario Pilas, por etapa y por tipo de pila si corresponde.

Tabla 4-24 Costos unitarios, económico y financieros y ambientales, que se propone utilizar, según etapa

Etapa	Costos económicos y financieros		Impactos socioambientales
Recolección (UF/ton)	23.19		-
Transporte (UF/km-ton)	0.002		0.000228e-4
Selección (UF/ton)	5.2		-
Reciclaje (UF/ton)	MnO2	36.5	- 0.4
	HgO		
	Ag2O	0	
	Zn-C	36.7	
	Litio	101.4	
	Ni-Cd	18.8	
	Ni-MH	6.7	
	Li-ion	23.2	
Disposición adecuada (UF/ton)	7.00		_36
Disposición inadecuada (UF/ton)	Ver Tabla 4-15		Ver Tabla 4-27

Fuente: Elaboración propia

4.3 Método para estimación de costos y beneficios asociados a la gestión adecuada de PFU

Con la estimación de los costos unitarios presentados en la Sección 4.2 se desarrolla un método para la estimación de los costos y beneficios relacionados al paso desde una gestión inadecuada de PFU a una gestión adecuada. El método es implementado en el software de modelación *Analytica*, que funciona de forma complementaria a lo descrito en la presente sección.

El método es estructurado considerando las mismas etapas de gestión descritas en la Tabla 4-2 y que estructuran también la presentación de los costos unitarios en la Sección anterior. Asimismo, se mantiene la diferenciación entre tipos de impactos: económicos y socioambientales, como una forma de mantener el orden. Esta combinación de etapas y tipos de impactos permiten una comprensión ordenada de los momentos y tipos de beneficios y costos identificados. Se destaca, sin embargo, que las etapas no son necesariamente consecutivas, habiendo etapas que son exclusivas. De esta forma, el método distingue tres opciones posibles de gestión de los residuos, cuya relación con las etapas estructurantes se resume en la Tabla 4-25:

³⁶ Si bien la disposición adecuada de residuos evita impactos socioambientales negativos, estos ya están considerados junto a los impactos asociados a su disposición inadecuada

- Gestión inadecuada: implica una gestión donde el destino final es desconocido. Si bien, en la teoría los destinos de las PFU podrían ser múltiples, en el presente estudio se argumenta que es razonable considerar que las PFU son dispuestas como el resto de los residuos sólidos domiciliarios y asimilables. En este caso sólo se incurriría en los costos de recolección, transporte y disposición descritos en la Sección 4.2.6.
- Gestión adecuada en rellenos de seguridad: implica que las PFU tienen como destino final rellenos de seguridad (ver Sección 3.1.1.1 para más detalles). En este caso las PFU pasan por las etapas de recolección, transporte y disposición adecuada.
- Gestión adecuada mediante reciclaje: implica que las PFU son conducidas a centros de reciclaje donde son diferenciadas por tipo de pilas, y tratadas para recuperar los metales valiosos. En este caso las PFU pasan por las etapas de recolección, transporte, selección y reciclaje.

Tabla 4-25 Relación entre cadenas de gestión de PFU y etapas

Etapa	Gestión inadecuada	Gestión adecuada en rellenos de seguridad	Gestión adecuada mediante reciclaje
Recolección		✓	✓
Transporte		✓	✓
Selección			✓
Reciclaje			✓
Disposición adecuada		✓	
Disposición inadecuada	✓		

Fuente: Elaboración propia

El método se basa en la comparación de la gestión adecuada de las PFU (ya sea en rellenos de seguridad o reciclaje) respecto a una situación base entendida como de gestión inadecuada. En este sentido, el nivel de actividad corresponderá a cuantas PFU son destinadas a rellenos de seguridad y/o a reciclaje respecto de una situación base donde eran dispuestas junto a otros residuos en rellenos sanitarios, vertederos y/o basurales. En este sentido, los costos evitados de una gestión inadecuada se consideran como ahorros del escenario de gestión adecuada, así como los beneficios evitados de una gestión inadecuada son tratados como costos del escenario de gestión adecuada. Lo anterior se resume en la Ecuación 5.

Ecuación 5 Estimación del costo neto por gestión adecuada

$$\Delta Costo\ Neto_{Adec} = Costo\ Neto_{Adec} - Costo\ Neto_{NoAdec}$$

$$= (Costos_{Adec} + Beneficios_{NoAdec}) - (Beneficios_{Adec} + Costos_{NoAdec})$$

Respecto al nivel de detalle seguido se observa que los costos unitarios de transporte y disposición inadecuada tienen detalle comunal, mientras que los costos unitarios de reciclaje tienen diferencias por tipo de pilas. De esta forma, el método mantiene el mismo detalle, correspondiendo al mismo detalle utilizado para la estimación de PFU con destino final desconocido, esto es según tipo de pila y acumulador (ver Sección 3.2.4) y por comuna.

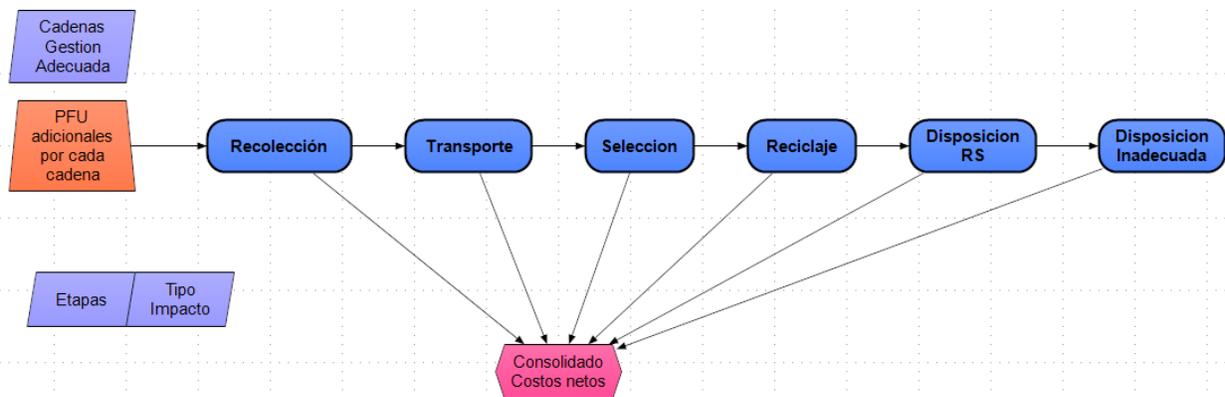


Figura 4-1 Vista del modelo general para estimación de beneficios y costos

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4-1 se presenta una visualización de la estructura metodológica para la estimación de los costos netos³⁷. Se observa que es la metodología se compone de un insumo principal (PFU adicionales por cada cadena), seis módulos metodológicos que estiman los costos de cada una de las etapas identificadas, los cuales son consolidados en los costos netos totales.

Se observa que la metodología depende del **insumo principal** que da cuenta de la variación de PFU que son destinadas a las diferentes cadenas de gestión adecuada. En la evaluación de potenciales escenarios de ley REP, este insumo representa la mejor estimación de cuantas PFU adicionales tendrían una gestión adecuada respecto de un escenario base en que no existe una ley REP, y donde, presumiblemente, menos PFU tendrían una disposición adecuada. Este insumo debe ser ingresado con el mismo detalle en que se esperan los resultados, esto es la cantidad de PFU (en toneladas por año) según tipo de pilas y acumulador, comuna, año y cadena de gestión.

En el módulo de **Recolección** se estiman los costos asociados a la recolección de PFU considerando tanto los costos de recolección como los costos de logísticas, de acuerdo a lo presentado en la Sección 4.2.1. Estos costos no diferencian por tipo de pila, por comuna ni por cadena de gestión.

En el módulo de **Transporte** se estiman los costos asociados al transporte de las PFU desde el punto donde se almacenan tras la recolección hasta el centro de selección y reciclaje (en el caso de la cadena de reciclaje) o el sitio de disposición en relleno de seguridad. Si bien este costo no depende del tipo de pila, sí depende de la comuna y del tipo de cadena. Estos costos se estiman a partir de la distancia en carretera entre la comuna de recolección y la comuna de selección y reciclaje o de relleno sanitario, de acuerdo a lo descrito en la Sección 4.2.2. Dado que el método está trabajando bajo un escenario hipotético de implementación de la ley REP, se debe incluir también los supuestos respecto a donde son instalados estos centros, y desde que comunas se reciben las PFU.

³⁷ Implementado en el modelo Analytica

Como una forma de simplificar este proceso y evitar tener que definir una a una los destinos de las PFU de cada comuna, el método considera las siguientes restricciones:

1. Cada comuna transporta su PFU a sólo un destino por cadena, es decir, a un destino para el reciclaje de PFU y un destino para la disposición en relleno de seguridad, pudiendo ser diferentes entre ellos.
2. Todas las comunas de una región transportan sus PFU al mismo destino para cada cadena.

Actualmente, para la cadena de disposición en relleno de seguridad, se están considerando el destino más frecuente en el periodo 2017-2019 de cada región, de acuerdo con los datos de SIDREP Sección 3.3.3.1. Se observa que, en el periodo cinco sitios concentran el 99% de las disposiciones de PFU³⁸, ubicados en cinco comunas diferentes. Respecto a los supuestos utilizados para el destino de reciclaje, se considera la instalación de tres centros de reciclajes de PFU: Norte, Centro y Sur. En el Norte, se considera un centro ubicado en Copiapó, comuna donde actualmente está ubicado RECYBATT, en el centro se considera Quilicura, comuna donde actualmente está ubicado ECOMINERÍA, y en el sur se considera un centro de reciclaje en Lota, en la zona industrial del gran Concepción principal centro urbano del sur y principal polo de generación de PFU.

Tabla 4-26 Supuesto de destino PFU según cadena de gestión adecuada

Región	Destino más común SIDREP (1)	Cadena Relleno Seguridad	Cadena Reciclaje
Arica y Parinacota	Séché – Sierra Gorda (100%)	Sierra Gorda	Copiapó
Tarapacá	Séché – Sierra Gorda (70%)	Sierra Gorda	Copiapó
Antofagasta	Séché – Sierra Gorda (87%)	Sierra Gorda	Copiapó
Atacama	Solenor – Copiapó (100%)	Copiapó	Copiapó
Coquimbo	Hidronor - Pudahuel (100%)	Pudahuel	Quilicura
Valparaíso	Escobio – Chillán Viejo (88%)	Chillán Viejo	Quilicura
Metropolitana	Hidronor - Pudahuel (49%)	Pudahuel	Quilicura
O'Higgins	Escobio – Chillán Viejo (65%)	Chillán Viejo	Quilicura
Maule	Escobio – Chillán Viejo (89%)	Chillán Viejo	Lota
Ñuble	Hidronor - Florida (93%)	Florida	Lota
Biobío	Escobio – Chillán Viejo (53%)	Chillán Viejo	Lota
La Araucanía	Escobio – Chillán Viejo (60%)	Chillán Viejo	Lota
Los Ríos	Hidronor - Florida (100%)	Florida	Lota
Los Lagos	Escobio – Chillán Viejo (80%)	Chillán Viejo	Lota
Aysén	Escobio – Chillán Viejo (80%)	Chillán Viejo	Lota
Magallanes	Hidronor - Florida (75%)	Florida	Lota

- (1) Empresa disposición – Comuna y porcentaje de destino respecto del total de PFU con destino a relleno de seguridad. Estimado a partir de datos de SIDREP para periodo 2017-2019 considerando sólo residuos categorizados como pilas y sin considerar empresas identificadas como intermediarios.

Fuente: Elaboración propia

³⁸ Considerando únicamente los residuos categorizados como pilas, de acuerdo las definiciones presentadas en la Sección 3.3.3.1

En el módulo de **Selección** se estiman los costos asociados a la selección de PFU realizada para separar las pilas de acuerdo con su contenido previo al proceso de reciclaje. Estos costos sólo aplican a la cadena de reciclaje y no diferencian por tipo de pila ni por comuna.

En el módulo de **Reciclaje** se estiman los costos netos asociados al proceso de reciclaje, estos costos netos diferencian por tipo de pilas dado que existirían diferencias tanto en los procesos de reciclaje como en el valor de venta de los metales recuperados. Al respecto, si bien el ideal hubiera sido contar con valores unitarios diferenciados para los costos de reciclaje y los beneficios de la venta del reciclaje, en la práctica no fue posible recolectar los costos de reciclaje, sino que sólo se pudieron recolectar las tarifas de gestión cobradas por centros de reciclaje de diferentes tipos de pilas (ver Sección 4.2.4). En este sentido se está utilizando dicha tarifa como el costo económico del reciclaje, bajo el supuesto de que dicha tarifa representa la diferencia entre los costos de operación y los ingresos por venta de recuperación.

En el módulo de **Disposición en Relleno de Seguridad** se estiman los costos asociados a la disposición adecuada de las PFU. Para ello se consideran las tarifas cobradas actualmente por los rellenos de seguridad (ver Sección 4.1.5), las cuales no diferencian entre tipo de pilas. Parece relevante destacar que se está suponiendo que las PFU son dispuestas sin una selección previa, esto es parte de las diferencias con los costos observados con intermediarios que realizan un proceso de selección previo y que manejan tarifas más altas.

Por último, el módulo **Disposición Inadecuada** también se basa en las tarifas observadas de la disposición de residuos, las cuales se diferencian a nivel regional (ver Sección 4.1.6). En este caso, corresponden a costos netos evitados y, por lo tanto, representan beneficios en la medida que representarían ahorros de un escenario de gestión adecuada respecto de un escenario sin gestión adecuada.

Los resultados de cada uno de los módulos recién descritos, son consolidados en un resultado final que, para cada combinación de tipo de pila y acumulador, y comuna, permite observar los resultados para cada cadena de gestión adecuada clasificados según etapa y tipo de impacto. Un ejemplo de lo recién descrito se presenta en la Figura 4-2.

Mid Value of Consolidado Costos netos (UF/año)			
Pilas y acumuladores segun compuesto		Pilas secas de zinc	
Comuna		Teodoro Schmidt	
Cadenas Gestion Correcta		Reciclaje	
Etapas		<input checked="" type="checkbox"/> Totals	
		Tipo Impacto <input checked="" type="checkbox"/> Totals	
	SocioAmbiental	Economico	Totals
Recoleccion	0	23.19	23.19
Transporte	0.07678	0.6238	0.7006
Seleccion	0	5.2	5.2
Reciclaje	-0.4008	36.7	36.3
Disposicion RSeg	0	0	0
Disposicion Incorrecta	0	-1.851	-1.851
Totals	-0.324	63.86	63.54

Figura 4-2 Ejemplo de consolidado de costos netos [UF/año]

Fuente: Elaboración propia

En el caso particular de la **Disposición Inadecuada** se incluye una estimación del rango de los costos evitados siguiendo la metodología descrita en la Sección 4.2.7.2, para lo cual se obtiene resultados según dos “aproximaciones” por costo de reparación y por disposición a pago. Ambos resultados presentan consideraciones particulares; la aproximación por costo de reparación varía según los sitios de disposición final considerados en cada comuna, dado que se considera que los lixiviados generados en rellenos sanitarios son gestionados y luego no sería necesario su tratamiento, y presentan un rango de costo inferior y superior según la tecnología de reparación considerada. Por su parte, los costos de estimación por DAP diferencia entre la cadena de gestión, observándose que la DAP de rellenos de seguridad es mayor que reciclaje. Dada la alta dimensionalidad de estos valores se presentan estos resultados como una variable diferenciada.

Tabla 4-27 Costos socioambientales unitarios promedios [UF/ton] por disposición evitada en destino desconocido

Aproximación	Detalle Aproximación	Costo promedio [UF/ton]
Costo Reparación	Rango Inferior	-5.15
	Rango Superior	-27.67
DAP	Reciclaje	-80.70
	Relleno Seguridad	-106.42

Nota: los valores presentados son negativos, puesto que evitar la disposición en destino desconocido significan un ahorro (costos de reparación) o un beneficio (DAP)

Fuente: Elaboración propia

Tal como se mencionó anteriormente, el presente informe es acompañado por un modelo desarrollado en el software *Analytica* que tiene implementado el método descrito. Ante la falta de un escenario de evaluación de ley REP, se considera un enfoque unitario, donde se estiman

los costos unitarios de gestionar en cada comuna y para cada tipo de pila y acumulador, 2 toneladas de PFU, una mediante una cadena de reciclaje y otra con una disposición en relleno de seguridad. De esta forma dichos resultados pueden entenderse como los resultados unitarios para cada combinación de cadena de gestión adecuada, comuna y tipo de pilas y acumuladores. Dichos resultados son sistematizados en los anexos digitales del presente estudio³⁹.

A modo de ejemplo, en las siguientes Figuras, se presentan diferentes visualizaciones de los resultados, en particular se presentan los resultados para una comuna en específico (Villarrica), destacando que se cuenta con los resultados para todas las comunas. En la Figura 4-3 se presenta una comparación por categoría de pila, para ambas cadenas de gestión adecuada, dando el detalle por etapa de los costos para la gestión por medio de reciclaje. En la Figura 4-4 se presentan los resultados para la categoría de pila más común, comparando ambas cadenas de gestión según etapa. Por último, en la Figura 4-5 se presentan los resultados según tipo de impacto (económico o socioambientales), para cada una de las etapas, considerando la misma categoría de pilas y una gestión mediante reciclaje.

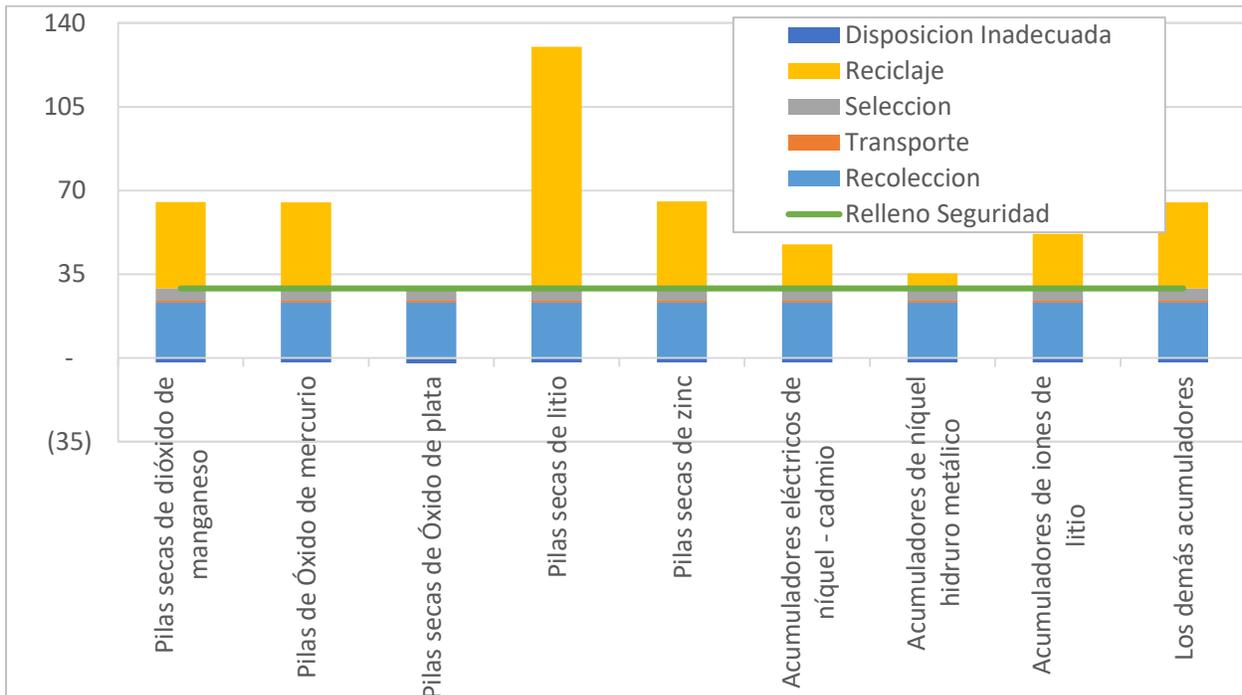


Figura 4-3 Ejemplo de costos netos [UF/año] para comuna Villarrica, gestión mediante reciclaje según etapa de gestión comparada con costos de gestión mediante relleno de seguridad

Fuente: Elaboración propia

³⁹ Puntualmente en el archivo AnexoDigital-ResultadosCostosNetos.csv

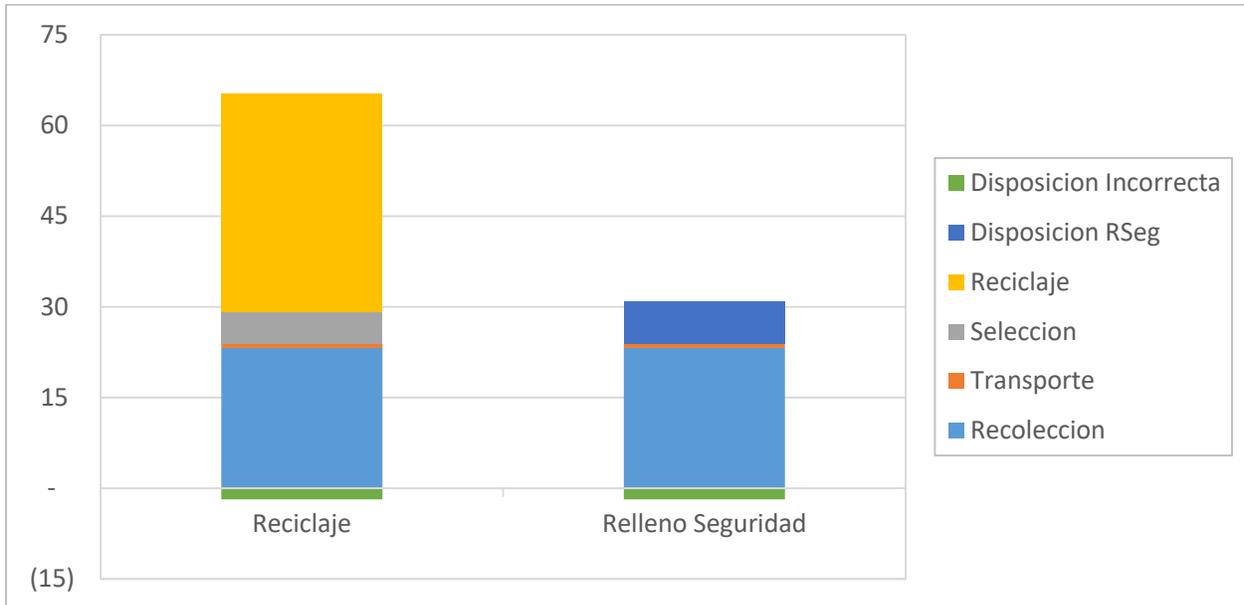


Figura 4-4 Ejemplo de costos netos [UF/año] para comuna Villarrica, por etapa, según cadena de gestión adecuada, para pilas de dióxido de manganeso

Fuente: Elaboración propia

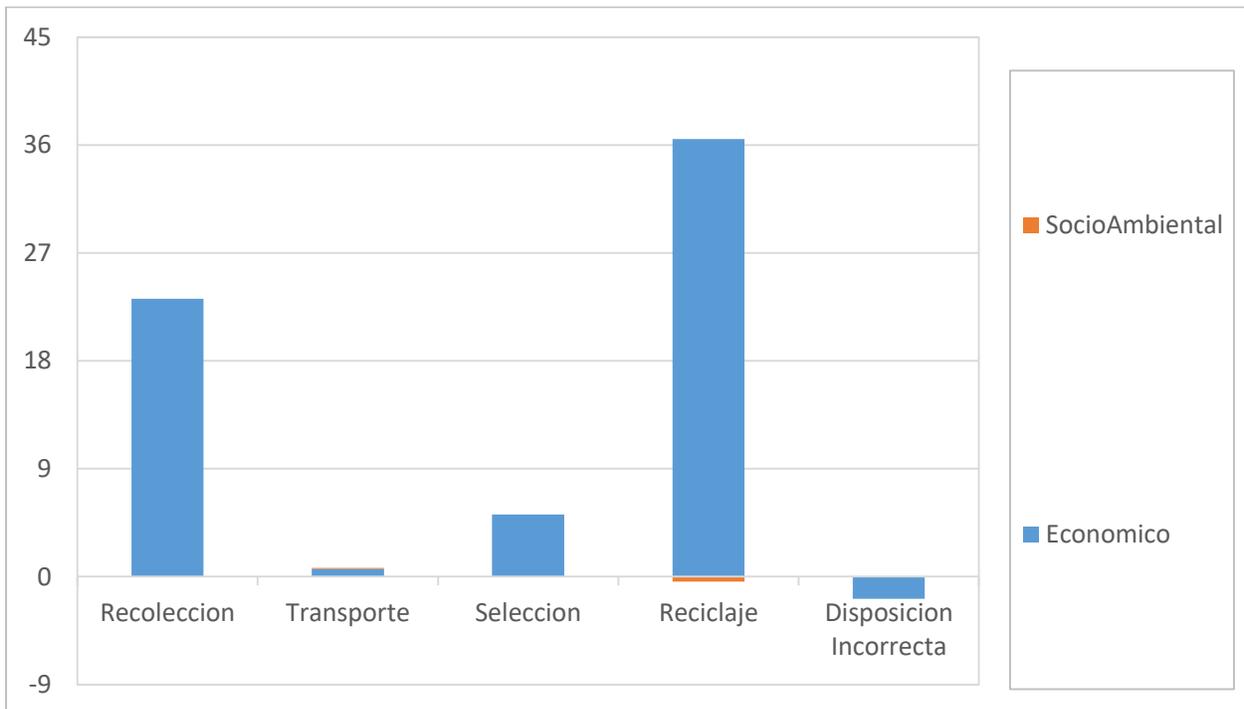


Figura 4-5 Ejemplo de costos netos [UF/año] para comuna Villarrica, por etapa, según tipo de costo, para pilas de dióxido de manganeso y cadena de reciclaje

Fuente: Elaboración propia

5. Conclusiones

El presente estudio tiene como objetivo general caracterizar el proceso de manejo del residuo prioritario pilas, identificando y estimando los costos y beneficios (impactos) económicos, ambientales y/o sociales asociados al establecimiento de metas de recolección y valorización, en el marco de los contenidos en la Ley 20.920. Con este objetivo en vista, en el presente estudio se revisaron y sistematizaron los principales antecedentes identificados tanto a nivel nacional como internacional. De esta forma, las metodologías propuestas consideran esta limitación de información intentando mantener un enfoque *Bottom-up*, que permita obtener resultados con el mayor nivel de detalle.

Bajo esta lógica se logró desarrollar una metodología, no sólo para la cuantificación de las PFU generadas, sino que su desagregación según comuna de generación, categoría de pilas y destino final. Estos resultados quedan determinados por los supuestos realizados y la información base. Consciente de dicha limitación, la metodología propuesta desarrolla una serie de serie de escenarios basado en diferentes supuestos que, en lugar de determinar un valor único, determina un rango de resultados que dependen del escenario considerado. Los resultados de las PFU con destino desconocido de esta combinación de escenarios se presenta en la Tabla 5-1, donde se observa que, dependiendo del escenario de supuestos y enfoques utilizados los resultados pueden variar entre 1.5 y 2.8 miles de toneladas. La amplitud de este rango, lejos de ser una debilidad de la modelación, debe ser considerada como una fortaleza pues da cuenta de la magnitud de la incertidumbre asociada a los supuestos realizados frente a la falta de información perfecta.

Tabla 5-1 Estimación de PFU [kg] con destino desconocido según tipo de SDF, año 2019

Residuos SIDREP considerados	Enfoque de generación PFU	Basural	Vertedero	Relleno Manual	Relleno Sanitario	Total PFU destino desconocido
Conservador Sólo Pilas	Por Pila	44,382 (2.5%)	333,108 (18.9%)	18,637 (1.1%)	1,369,865 (77.6%)	1,765,992
	Pilas de Reemplazo	67,848 (2.4%)	520,779 (18.8%)	28,329 (1.0%)	2,159,489 (77.8%)	2,776,445
Optimista Pilas y Otros	Por Pila	36,583 (2.5%)	274,930 (18.9%)	15,368 (1.1%)	1,129,264 (77.6%)	1,456,145
	Pilas de Reemplazo	60,267 (2.4%)	462,829 (18.8%)	25,167 (1.0%)	1,918,335 (77.8%)	2,466,598

Fuente: Elaboración propia

Aun así, los resultados obtenidos de la modelación, especialmente al ser observados con un detalle mayor (por categoría de pila y comuna), presenta una incertidumbre mayor asociado a supuestos realizados ante la falta de información perfecta. Entre ellos se destaca el supuesto de que las pilas se distribuyen de forma uniforme entre la población, lo que resulta en que el consumo de pilas a nivel comunal, y la consecuente generación de PFU, sea proporcional a la población comunal. Este supuesto en particular, que afecta la distribución del consumo de pilas

dado por Aduanas en las comunas del país es utilizado ante la falta de evidencia de que otros factores pudieran afectar el consumo unitario, a pesar de que podría haber otros factores que afecten la distribución del consumo de pilas.

Si bien resultados con menor grado de incertidumbre son preferibles, especialmente para la evaluación de políticas públicas, el presente escenario entrega los insumos necesarios para que al momento de evaluar se tomen los escenarios y enfoques que se consideren lo más adecuados. Ante esto, se destaca que criterios como tomar supuestos conservadores y realizar sensibilidades sobre ciertos supuestos claves, suelen resultar en políticas más robustas.

Respecto a los resultados de la implementación del método propuesto para la estimación de los costos netos de la gestión adecuada de las PFU, este se implementó en Analytica de forma unitaria, permitiendo tener resultados con detalle comunal, por tipo de pila y según cadena de gestión adecuada (reciclaje o disposición en relleno de seguridad). Al ser implementado de forma unitaria, estos resultados son fácilmente escalables una vez que se cuente con escenarios normativos de la ley REP, permitiendo estimar resultados de forma rápida facilitando el estudio del impacto de las posibles normativas.

A partir de los resultados unitarios, se observan ciertas conclusiones que se espera se mantengan una vez que se escalen los resultados:

- Los costos valorizados son superiores a los beneficios valorizados. Tal como se ha mencionado, se han identificado una serie de beneficios, que no han podido ser valorizados, y luego es posible que de contar con información más completa los resultados podrían variar de forma relevante.
- Respecto a la comparación entre las alternativas de gestión adecuada, en general se observa que, salvo para las pilas con contenido de plata, la opción de relleno de seguridad presenta menores costos.
- Respecto a los beneficios ambientales, aun cuando no ha sido posible cuantificar algunos que podrían ser relevantes, como la reducción del riesgo de contaminación con metales pasados de suelos, napas subterráneas, o efectos indeseados sobre la salud humana, flora o fauna, sí se incluyen las emisiones de GEI como un efecto valorizable. En este caso se destaca, que aun considerando las emisiones del transporte y del mismo proceso de reciclaje, las emisiones evitadas por desplazamiento de extracción de material virgen desplazado por material reciclado superan largamente las emisiones adicionales producto del transporte y proceso de reciclaje.
- En la cadena de gestión de reciclaje, la recolección y reciclaje son las etapas que explican la mayor parte de los costos, aportando en conjunto más del 90% del costo neto total. Por su parte, en el caso de la disposición en relleno de seguridad, la recolección por si sola representaría más del 70% de los costos netos.
- Por lo anterior, se observa una escasa variación en los costos netos unitarios en el caso de la gestión de en rellenos de seguridad observándose que los costos netos se mueven en el rango de las 28-32 [UF/ton], dependiendo de la comuna.

- Esta situación no se repite en el caso del reciclaje, en donde el principal factor corresponde al tipo de pila que puede multiplicar en hasta 5 veces el costo neto unitario desde el rango de 27-30 [UF/ton] para las pilas de plata, hasta el rango de 128-132 [UF/ton] para las pilas secas de litio.

Los resultados respecto al costo por tonelada por la gestión de las PFU por medio del reciclaje se encuentran dentro del rango reportado por la literatura revisada. Existe un amplio rango de valores reportados por la literatura, explicados por los diferentes alcances que presenta cada estudio, como también la consideración de las diferentes tipologías de pilas recicladas. Estos valores se sitúan entre las 6.34 y 279.4⁴⁰ [UF/ton], en donde en particular DEFRA (2008) reporta un costo de 54 [UF/ton], valor que se encuentra alineado con los resultados unitarios obtenidos en el presente estudio.

Desde el presente análisis se desprende que una gestión adecuada de las pilas fuera de uso presenta costos cuantificables y monetizables considerablemente altos en comparación a los beneficios cuantificables y monetizables que fueron posibles de incorporar, sin embargo, se debe tener en consideración que estos beneficios representan solo una aproximación base, al solo incorporar una ganancia ambiental asociada a la reducción de emisiones GEI producto de la no extracción de materia prima virgen en el caso de que la PFU sean recicladas recuperando los metales que las componen. Es importante reconocer que se reconocen los beneficios asociados a la reducción del impacto que tiene la disposición de pilas en rellenos sanitarios y/o disposición desconocida respecto a la salud de los ecosistemas y la salud de la población producto del riesgo de lixiviación y emisión de metales pesados, pero no existe suficiente información para medir y monetizar este impacto (DEFRA, 2008, 2015) como tampoco evidencia que permita incorporar aquellos beneficios no transables en el mercado por medio de estudios de disposición a pago, en particular aquellos asociados a reducir el riesgo hacia el ecosistema y salud de la población de una disposición inadecuada de este tipo de residuos. En este sentido, los resultados del presente análisis son coincidentes con las evaluaciones del tipo costo beneficio encontradas en la experiencia internacional. En las evaluaciones realizadas por DEFRA asociada a la Ley REP de este tipo de residuos para el Reino Unido se concluye una razón costo:beneficio entre 7.6:1 y 11.6:1 respecto a distintos escenarios evaluados (DEFRA, 2008).

Respecto a los beneficios cuya valorización no es posible realizar con un grado de certeza suficiente con los antecedentes disponibles, se estimó un rango con el objetivo de contar con un orden de magnitud de los beneficios. Este es amplio y está en el mismo orden de los demás costos estimados, aun así, es posible que variables como la alta concentración de metales con impactos comprobados en la PFU o su menor vida corta en comparación con los AEE pudiera resultar en beneficios mayores. Aun así, se observa que en la parte alta del rango (aproximación por DAP de AEE) los costos netos unitarios pasarían a ser negativos, implicando que la valorización de los costos y beneficios resulta en mayores beneficios que costos. Esta conclusión no se mantiene al utilizar el rango bajo (aproximación por costo de tratamiento) en donde los costos netos son

⁴⁰ Detalle de los valores reportados por cada referencia se presenta en el Anexo 7.3

positivos. Se recomienda un estudio más particular como la estimación de la disposición a pago por la disposición en rellenos de seguridad o reciclaje de las PFU, que permita reducir la incertidumbre respecto de este valor.

6. Bibliografía

- Almeida, M. F., Xará, S. M., Delgado, J., & Costa, C. A. (2009). Laboratory study on the behaviour of spent AA household alkaline batteries in incineration. *Waste Management*, 29(1), 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.03.011>
- Amphos 21. (2014). *Evaluación de los Impactos Ambientales, Sociales y Económicos de la Implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor en Chile aplicada a Pilas y Acumuladores*.
- Argonne National Laboratory. (2019). EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model, 1–88. Retrieved from <https://publications.anl.gov/anlpubs/2019/07/153050.pdf>
- ATSDR. (1990). Toxicological Profile for Silver.
- ATSDR. (2005). Toxicology Profile for Nickel. *Toxicological Profile for Nickel*, (August), 1–397.
- ATSDR. (2012). Toxicological Profile for Manganese. *ATSDR's Toxicological Profiles*, (September). https://doi.org/10.1201/9781420061888_ch4
- BIO Intelligence Service. (2003). Impact Assessment on Selected Policy Options for Revision of the Battery Directive. Retrieved from https://ec.europa.eu/environment/waste/batteries/pdf/eia_batteries_final.pdf
- BIO Intelligence Service. (2010). Study on “Elements for an impact assessment on proposed options for labelling of portable primary batteries in the context of the Batteries Directive 2006/66/EC,” (June), 1–113.
- Boyden, A., Soo, V. K., & Doolan, M. (2016). The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries. *Procedia CIRP*, 48, 188–193. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.100>
- C y V Medioambiente. (2011). *Diagnóstico Producción, Importación Y Distribución De Envases Y Embalajes Y El Manejo De Los Residuos de Pilas*.
- CalRecovery Inc. (2007). Critical Review of the Literature Regarding Disposal of Household Batteries, (December).
- Cerda, C., & Melo, O. (2014). Valoración económica de servicios ecosistémicos y biodiversidad en Chile: Marcos conceptuales y experiencias en investigación.
- Commission of the European Communities. (2003). Directive of the European Parliament and of the Council on Batteries and Accumulators and Spent Batteries and Accumulators Extended, 78.
- Dai, Q., Spangenberg, J., Ahmed, S., Gaines, L., Kelly, J. C., & Wang, M. (2019). EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model. *Argonne National Laboratory*, 1–88.
- DEFRA. (2008). *Impact assessment of implementation of European Batteries and Accumulators Directive (2006/66/EC) in the UK*. Retrieved from https://www.legislation.gov.uk/ukia/2008/343/pdfs/ukia_20080343_en.pdf%0A
- DEFRA. (2011). Defra / DECC's 2011 Guidelines to GHG Conversion Factors for Company Reporting, p.40. Retrieved from <http://archive.defra.gov.uk/environment/business/reporting/pdf/110707-guidelines-ghg->

conversion-factors.pdf

- DEFRA. (2015). Final Impact Assessment on amendments to the Government Guidance Notes on the Waste Batteries and Accumulators Regulations 2009 (definition of a “portable” battery). Retrieved from https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/470497/portable-battery-consult-ia.pdf%0A
- Dolker, T., & Pant, D. (2020). *Metals extraction from waste button cell battery. Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Resource Recovery from Wastes*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64321-6.00017-3>
- EMEP/EEA. (2019). *1.A.3.b Road Transport. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2019* (Vol. 53).
- ERM. (2006). Battery Waste Management Life Cycle Assessment, (October). Retrieved from https://www.epbaeurope.net/wp-content/uploads/2016/12/090607_2006_Oct.pdf%0A
- Espeleta Ríos, A. M., Rocha García, A. M., & Santos Milachay, M. del P. (2012). Análisis de Factibilidad en la Recolección y Recuperación de Pilas de Zinc-Aire para Audífonos Cubiertos por el POS ZINC-AIRE PARA AUDÍFONOS CUBIERTOS POR EL POS, *66*(3), 37–39.
- EUCOBAT, & Mobius. (2017). *How battery life cycle influences the collection rate of battery collection schemes. 22nd ICBR - International Congress on Battery Recycling*.
- European Portable Battery Association. (2006). Battery Waste Management Life Cycle Assessment - Final Report for Publication. Retrieved from http://www.epbaeurope.net/090607_2006_Oct.pdf
- GreenLab. (2019). Estimación de Beneficios Ambientales Asociados a la Implementación de la Ley REP para los Residuos de Productos Prioritarios (Aparatos Eléctricos y Electrónicos), a través de Experimentos de Elección.
- GreenLab. (2021). *Actualización de información base e impactos ambientales específicos del producto prioritario baterías, contenido en la Ley 20.920*.
- INE. (2019). Estimaciones y Proyecciones de la Población de Chile 2002-2035 a Nivel Comunal. Documento Metodológico.
- IPCC. (2013). AR5. Physical Science Basis. Ch. 8 - Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, *7*(2), 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
- Järup, L., Berglund, M., Elinder, C. G., Nordberg, G., & Vahter, M. (1998). Health effects of cadmium exposure - A review of the literature and a risk estimate. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, *24*(SUPPL. 1), 1–51.
- Javed, M., & Usmani, N. (2019). An Overview of the Adverse Effects of Heavy Metal Contamination on Fish Health. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences*, *89*(2), 389–403. <https://doi.org/10.1007/s40011-017-0875-7>
- Karnchanawong, S., & Limpiteeprakan, P. (2009). Evaluation of heavy metal leaching from spent household batteries disposed in municipal solid waste. *Waste Management*, *29*(2), 550–558. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.03.018>

- Lankey, R. L., & Mcmichael, F. C. (2000). Life-cycle methods for comparing primary and rechargeable batteries. *Environmental Science and Technology*, 34(11), 2299–2304. <https://doi.org/10.1021/es990526n>
- Lisbona, D., & Snee, T. (2011). A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries. *Process Safety and Environmental Protection*, 89(6), 434–442. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2011.06.022>
- London Metal Exchange. (2021). Metals. Retrieved February 24, 2021, from <https://www.lme.com/Metals>
- Menet, J., & Gruescu, I. (2014). COMPARATIVE LIFE CYCLE ASSESSMENT OF ALCALINE CELLS AND NI-MH RECHARGEABLE BATTERIES To cite this version : HAL Id : hal-00949673.
- Ministerio de Desarrollo Social. (2020). Precios Sociales 2020.
- Ministerio de Salud. (2004). Decreto 148/2004: Aprueba reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos. Santiago, Chile.
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2002). Decreto 46 - ESTABLECE NORMA DE EMISION PARA LA REGULACION DE CONTAMINANTES ASOCIADOS A LAS DESCARGAS DE RESIDUOS LIQUIDOS A AGUAS MARINAS Y CONTINENTALES SUPERFICIALES.
- MINSAL. (2004). Decreto 148 - Aprueba Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos. Retrieved from <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=226458>
- MINSAL. (2008). Decreto 189 Aprueba Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y de Seguridad Básicas en los Rellenos Sanitarios.
- MMA. (2017). Manual para el Desarrollo de Inventarios de Emisiones Atmosféricas.
- Moguel, G. J. R. (2008). Determinación de peligrosidad de pilas usadas complementada con análisis de ciclo de vida.
- Morrow, H. (2001). Environmental and Human Health Impact Assessments of Battery Systems. *Industrial Applications of Batteries*, 691–736.
- Moura Bernardes, A., Espinosa, D. C. R., & Tenório, J. A. S. (2003). Collection and recycling of portable batteries: A worldwide overview compared to the Brazilian situation. *Journal of Power Sources*, 124(2), 586–592. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00810-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00810-3)
- MS2. (2013). Business and Public Policy Case for Battery Stewardship (handheld batteries). Background Paper and Report prepared for Sustainability Victoria, (June). Retrieved from https://www.sustainability.vic.gov.au/~media/resources/documents/services_and_advice/households/a_to_z_of_household_waste_disposal/batteryback/battery_stewardship_background_paper_june_2013_pdf.pdf%0A
- Nixon, H., & Saphores, J. D. M. (2007). Financing electronic waste recycling Californian households' willingness to pay advanced recycling fees. *Journal of Environmental Management*, 84(4), 547–559. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.07.003>
- Nixon, H., Saphores, J. D. M., Ogunseitán, O. A., & Shapiro, A. A. (2009). Understanding preferences for recycling electronic waste in California: The influence of environmental attitudes and beliefs on willingness to pay. *Environment and Behavior*, 41(1), 101–124. <https://doi.org/10.1177/0013916507310053>
- Norouzi, A., Adeli, M., & Zakeri, A. (2020). An innovative hydrometallurgical process for the production of silver nanoparticles from spent silver oxide button cells. *Separation and Purification Technology*, 248(May), 117015. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117015>

- NZIER. (2013). Willingness to pay for six end-of-life products, (October).
- Panero, S., Romoli, C., Achilli, M., Cardarelli, E., & Scrosati, B. (1995). Impact of household batteries in landfills. *Journal of Power Sources*, 57(1–2), 9–12. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(95\)02230-9](https://doi.org/10.1016/0378-7753(95)02230-9)
- Parlamento Europeo & Consejo de la Unión Europea. (2006). Directiva 2006/66/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. *Diario Oficial de La Unión Europea*: 26/09/2006.
- Parsons, D. (2007). The environmental impact of disposable versus re-chargeable batteries for consumer use. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(3), 197–203. <https://doi.org/10.1065/lca2006.08.270>
- Peter J. Marks, Walter J. Wujcik, A. F. L. (1994). *Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide*.
- Ratte, H. T. (1999). Bioaccumulation and toxicity of silver compounds: A review. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18(1), 89–108. [https://doi.org/10.1897/1551-5028\(1999\)018<0089:BATOSC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1897/1551-5028(1999)018<0089:BATOSC>2.3.CO;2)
- Ren, F., Cox, T., & Wang, H. (2014). Thermal runaway risk evaluation of Li-ion cells using a pinch-torsion test. *Journal of Power Sources*, 249, 156–162. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.10.058>
- Rolls, S., Jeffery, R., & Bennett, J. (2009). Willingness To Pay for E-Waste Recycling. *Environment*, (June).
- Saphores, J. D. M., Ogunseitan, O. A., & Shapiro, A. A. (2012). Willingness to engage in a pro-environmental behavior: An analysis of e-waste recycling based on a national survey of U.S. households. *Resources, Conservation and Recycling*, 60, 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.12.003>
- Scott, K. (2009). Recycling | Nickel-Metal Hydride Batteries. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 199–208. <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00401-9>
- Servicio de Impuestos Internos. (2020). UF. Retrieved from https://www.sii.cl/valores_y_fechas/uf/uf2020.htm
- Shapek, R. A. (1995). Local government household battery collection programs: Costs and benefits. *Resources, Conservation and Recycling*, 15(1), 1–19. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(95\)00025-E](https://doi.org/10.1016/0921-3449(95)00025-E)
- Song, Q., Wang, Z., & Li, J. (2012). Residents' behaviors, attitudes, and willingness to pay for recycling e-waste in Macau. *Journal of Environmental Management*, 106, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.03.036>
- Stahl, H., Baron, Y., Hay, D., Hermann, A., Mehlhart, G., Baroni, L., ... Pahal, S. (2018). Study in support of evaluation of the Directive 2006 / 66 / EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators Final Report, 233. Retrieved from http://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/Published_Supporting_Study_Evaluation.pdf
- SUBDERE. (2018). Diagnóstico de la situación por comuna y por región en materia de RSD y asimilables (Informe 1).
- SUBDERE, SGS, & SIGA. (2018). *Diagnóstico de la situación por comuna y por región en materia de RSD y asimilables*.
- UN-HABITAT. (2010). *Collection of municipal solid waste in developing countries*. <https://doi.org/10.1080/00207233.2013.853407>

- UNIROSS. (2007). UNIROSS Study on the Environmental Impact of Batteries.
- Wang, X. (2014). Managing End-of-Life Lithium-ion Batteries: An Environmental and Economic Assessment. *Rochester Institute of Technology*, 171. Retrieved from https://search.proquest.com/docview/1612423030?accountid=12763%0Ahttp://primoa.library.unsw.edu.au/openurl/61UNSW_INST/UNSW_SERVICES_PAGE?url_ver=Z39.88-2004&rft_val_fmt=info:ofi/fmt:kev:mtx:dissertation&genre=dissertations+%26+theses&sid=ProQ:ProQuest+Di
- Wang, X., Gaustad, G., Babbitt, C. W., & Richa, K. (2014). Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.009>
- WHO. (2010). Exposure to cadmium: a major public health concern. *Preventing Disease Through Healthy Environments*, 3–6. Retrieved from <http://www.who.int/ipcs/features/cadmium.pdf>
- WHO. (2017a). *Guidelines for drinking-water quality* (Fourth Edi).
- WHO. (2017b). Mercury and health.
- WHO. (2018). Arsenic.
- WHO. (2019). Lead poisoning and health.
- Wisconsin DNR. (2012). Wisconsin residents and electronics recycling: survey results, (September), 1–12.
- World Bank. (2018). GDP per capita, PPP (current international \$).
- World Bank. (2019). Official exchange rate.
- WSP. (2020). *Asesoría para la implementación de la Responsabilidad Extendida del Productor en Chile - Producto Prioritario Pilas*.
- Wu, F., Harper, B. J., & Harper, S. L. (2019). Comparative dissolution, uptake, and toxicity of zinc oxide particles in individual aquatic species and mixed populations. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(3), 591–602. <https://doi.org/10.1002/etc.4349>
- Yanase, R., Hirano, F., Matsufuji, Y., & Hanashima, M. (2004). Behavior of Mercury in Disposed Dry Batteries after 10 Years in Landfill Site. *Journal of the Japan Society of Waste Management Experts*, 15(2), 96–104. <https://doi.org/10.3985/jswme.15.96>

7. Anexos

7.1 Pilas según componentes

Tabla 7-1 Ejemplo de pilas según forma física y subcategoría

Cód. Arancelario	Nombre Cód. Arancelario	Ejemplo de imagen
8506.1010	Pilas secas de dióxido de manganeso, de tensión nominal de 1.5 volt (alcalinas)	
8506.1090	Las demás pilas secas de dióxido de manganeso (alcalinas)	
8506.3000	Pilas de óxido de mercurio	
8506.4010	Pilas secas de óxido de plata, de tensión nominal de 1.5 volts	
8506.4090	Las demás pilas secas de óxido de plata	
8506.5010	Pilas secas de litio, de tensión nominal de 1.5 volts	
8506.5090	Las demás pilas secas de litio	
8506.6010	Pilas secas de aire-zinc, de tensión nominal de 1.5 volts	
8506.6090	Las demás pilas secas de aire zinc	
8506.8010	Las demás pilas secas y baterías de pilas de tensión nominal de 1.5 volts (Zn carbón u otras)	
8506.8090	Las demás pilas (Zn carbón u otras)	
8507.3000	Acumuladores eléctricos de níquel - cadmio	
8507.5000	Acumuladores de níquel hidruro metálico	
8507.6000	Acumuladores de iones de litio	
8507.8000	Los demás acumuladores	

Fuente: Elaboración propia

7.2 Etapas involucradas en la gestión adecuada de PFU

En los estudios revisados (Amphos 21, 2014; Argonne National Laboratory, 2019; BIO Intelligence Service, 2003; DEFRA, 2008; ERM, 2006; Espeleta Ríos et al., 2012; MS2, 2013; Shapek, 1995; Stahl et al., 2018; Wang et al., 2014; WSP, 2020) se observa que no todos consideran las mismas etapas en el proceso de gestión adecuada de PFU. A continuación se describen todas las etapas identificadas en esta revisión:

Recolección: Existen dos sistemas utilizados para recolectar las PFU, que se pueden implementar de manera independiente o en conjunto:

- Puntos de recolección: El primero implica establecer puntos de recolección con contenedores donde los usuarios puedan llevar sus residuos, los cuales son recogidos periódicamente para ser propiamente tratados. En general estos puntos de recolección se ubican en espacios públicos propuestos por municipalidades, instituciones educacionales o las tiendas de los mismos productores.
- Recolección en vereda: El segundo corresponde a recoger directamente las pilas y otros residuos reciclables en las viviendas de las personas, los cuales deben estar propiamente separados de los residuos domiciliarios (al igual que en los puntos de recolección). En este caso no se utilizan contenedores para almacenar temporalmente los residuos, sino que estos son directamente transportados para que sean propiamente tratados.

Transporte: El transporte de los residuos ocurre múltiples veces entre cada una de las etapas de su proceso de reciclaje o disposición. Existen dos grandes categorías de transporte con este propósito:

- Transporte nacional: Luego de ser recolectados, los residuos pueden ser trasladados a tres lugares distintos: un área de almacenamiento, desde la cual son posteriormente transportados para continuar con su tratamiento; un establecimiento de reciclaje y valorización de los residuos; o directamente a sitios de disposición final.
- Exportación: También existe la posibilidad de exportar los residuos a establecimientos extranjeros, lo cual implica viajes de distancias considerablemente mayores, y el uso de otros vehículos, como barcos de carga. Esta alternativa no será estudiada en el presente estudio.

Almacenamiento: Si bien no es una etapa fundamental ni necesaria en el tratamiento de pilas, se puede considerar almacenar los residuos en un sitio donde no representen un peligro hasta que estos puedan ser tratados, o bien hasta que alcancen un volumen razonable que justifique la operación de una planta de reciclaje.

Selección: Dado que existen múltiples composiciones metálicas para las pilas, previo a ser recicladas estas son seleccionadas, de tal modo que se les pueda entregar el tratamiento adecuado a cada una de ellas y tener una mejor eficiencia de recuperación de los metales. Esta etapa es crucial para comenzar el tratamiento de los residuos.

Trituración: Antes de ser valorizadas, primero se remueven las etiquetas plásticas y material aislante ligados a las pilas, para posteriormente triturarlas y comenzar su proceso de reciclaje.

Reciclaje: El proceso de reciclaje aplicado a los residuos depende del tipo de pilas en cuestión, pero generalmente se lleva a cabo un proceso de lixiviación, hidrometalúrgico o pirometalúrgico.

Disposición adecuada: Los residuos de pilas pueden ser dispuestos de manera adecuada en dos instancias:

- Directa: Las PFU son dispuestas inmediatamente luego de ser recolectadas, en cuyo caso es necesario enviarlas a rellenos de seguridad
- Post valorización: Luego de ser valorizadas y una vez que se han extraído todos sus compuestos útiles de las PFU, los residuos no valorizables restantes se deben enviar a un sitio de disposición final.

Disposición inadecuada: Las pilas también son muchas veces manejadas de manera inadecuada, siendo dispuestas junto a la basura domiciliaria en basurales, vertederos o rellenos sanitarios, en lugar de recibir una gestión adecuada a través de las etapas mencionadas previamente.

Incineración: Existen situaciones en las que las PFU pueden ser gestionadas a través de su incineración. Cabe destacar que su poder calorífico no es suficiente como para justificar la incineración como medio de obtención de energía, además de que a través de este método su volumen no se ve reducido de manera significativa. Más aún, su incineración implica emisiones de material particulado y gases contaminantes, los cuales pueden ser dañinos para el medioambiente si no se tienen las medidas de control necesarias. A pesar de esto, esta vía de gestión puede ser la única viable en países con poca capacidad para disponer residuos, como en Japón y algunas naciones europeas (Morrow, 2001). Por este motivo, la incineración no será considerada dentro de las posibles vías de gestión de las PFU.

Debido a que no todos los estudios revisados consideran las mismas etapas en el proceso de gestión adecuada de PFU, se realizó un análisis en mayor profundidad para poder establecer las etapas a considerar en el presente estudio, según la frecuencia con que las distintas etapas son mencionadas, así como la frecuencia con que son incluidos los costos asociados a cada una de ellas. Así, a partir de los once estudios revisados que se relacionan directamente con el proceso de gestión de pilas, se construyó la Tabla 7-2 siguiente, que muestra las frecuencias ya mencionadas.

Tabla 7-2 Frecuencia de mención y costeo de diferentes etapas de gestión de las PFU

Etapa de gestión	Frecuencia con que se menciona la etapa dentro del proceso de gestión	Frecuencia con que se presentan los costos de cada etapa
Recolección	100%	36%
Transporte	73%	0%
Almacenamiento	36%	0%
Selección	64%	27%
Trituración	27%	9%
Reciclaje	100%	36%
Disposición	55%	36%
Otros*	82%	27%

* Pueden incluir opciones como publicidad y campañas informativas, salarios, uniformes, instalación de planta, áreas de procesamiento, máquinas, energía, oficinas, administración, costos ambientales, exportación de PFU, entre otros.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Amphos 21, 2014; Argonne National Laboratory, 2019; BIO Intelligence Service, 2003; DEFRA, 2008; ERM, 2006; Espeleta Ríos et al., 2012; MS2, 2013; Shapek, 1995; Stahl et al., 2018; Wang et al., 2014; WSP, 2020)

Como se observa en la Tabla 7-2, las etapas de recolección y reciclaje aparecen en todos los estudios, y junto con la selección son de las etapas más valorizadas en estos. El transporte también es una de las etapas más mencionadas, sin embargo, esta no se valoriza por separado, lo cual se puede interpretar como que los costos de transporte se incorporan dentro de la recolección (BIO Intelligence Service, 2003; MS2, 2013), aunque la mayoría de los estudios no son explícitos en este aspecto (Amphos 21, 2014; ERM, 2006; Espeleta Ríos et al., 2012; Shapek, 1995; Wang et al., 2014; WSP, 2020). Mientras que las etapas menos identificadas y valorizadas son las de almacenamiento, trituración y disposición. En particular, el almacenamiento posiblemente se considera dentro de la etapa de recolección, dado que se puede interpretar tanto como los puntos limpios o centros de acopio específicos, y la trituración probablemente se considera dentro de los costos de reciclaje, al ser un proceso necesario para el correcto tratamiento. En el caso de la disposición, por una parte, al ser estudios de reciclaje de PFU, no valorizan la disposición de estos residuos previo al tratamiento, y es probable que los costos de disposición de los residuos no valorizables que quedan luego del reciclaje se incluyan en la valorización de este proceso. Finalmente, hay múltiples otras etapas identificadas y en ocasiones costeadas, pero que se abordan de forma agrupada. A partir de este análisis, se decide para este estudio diferenciar y valorizar los impactos negativos y beneficios de acuerdo con las etapas presentadas en la Tabla 4-2.

7.3 Costos totales de reciclaje

A continuación, en la Tabla 7-3 Costos [UF/ton] totales por reciclaje para distintos tipos de pilas, países y años Tabla 7-3 se presentan los costos totales asociados al proceso completo de reciclaje (es decir, considerando las etapas de recolección, transporte, selección, reciclaje y otros) reportados por distintas compañías recicladoras en varios países para distintos años. Se destaca que los costos reportados pueden considerar costos adicionales a los relativos a las etapas de

reciclaje consideradas por el presente estudio, los cuales pueden corresponder a costos administrativos o bien a costos por campañas de información.

Tabla 7-3 Costos [UF/ton] totales por reciclaje para distintos tipos de pilas, países y años

Referencia	Otros costos	Tipo de pila	País	Costos totales (UF/ton)	Año
(Shapek, 1995)	-	Todos	Florida	92.49	1993
(Shapek, 1995)	-	Todos	Florida	99.37	1994
(Shapek, 1995)	-	Todos	Florida	78.76	1995
(Shapek, 1995)	-	Todos	Florida	78.22	1996
(Shapek, 1995)	-	Todos	Florida	77.23	1997
(Wang et al., 2014)	Administración y comunicación	Todos	Austria	51.49	2003
(Wang et al., 2014)	Administración y comunicación	Todos	Alemania	51.57	2003
(Moura Bernardes, Espinosa, & Tenório, 2003)	Comunicación	Todos	Austria	60.13	2003
(Wang et al., 2014)	Administración y comunicación	Todos	Francia	111.00	2003
(Wang et al., 2014)	Administración y comunicación	Ni-Cd	Dinamarca	130.89	2003
(Wang et al., 2014)	Administración y comunicación	Todos	Países Bajos	162.70	2003
(Moura Bernardes et al., 2003)	Comunicación	Todos	Países Bajos	171.13	2003
(Wang et al., 2014)	Administración y comunicación	Todos	Bélgica	172.64	2003
(Moura Bernardes et al., 2003)	Comunicación	Todos	Bélgica	231.25	2003
(DEFRA, 2008)	-	Todos	Inglaterra	54.07	2008
(Stahl et al., 2018)	No menciona	Todos	Francia	20.03	2011
(Stahl et al., 2018)	No menciona	Todos	Austria	35.22	2011
(Stahl et al., 2018)	No menciona	Todos	Países Bajos	49.15	2011
(Stahl et al., 2018)	No menciona	Todos	Suiza	156.37	2011
(Stahl et al., 2018)	Comunicación	Todos	Bélgica	279.36	2011
(Amphos 21, 2014)	-	Li-ion	Portugal	6.34	2014
(Amphos 21, 2014)	-	Ni-Cd	Portugal	9.19	2014
(Amphos 21, 2014)	-	Ni-MH	Portugal	9.19	2014
(Amphos 21, 2014)	-	Alcalina	Portugal	11.41	2014
(Amphos 21, 2014)	-	Zn-C	Portugal	12.35	2014
(Amphos 21, 2014)	-	Botón	Portugal	22.17	2014
(Amphos 21, 2014)	-	Litio	Portugal	22.17	2014
(Stahl et al., 2018)	No menciona	Todos	Francia	23.78	2016
(Stahl et al., 2018)	No menciona	Todos	Países Bajos	39.39	2016
(Stahl et al., 2018)	No menciona	Todos	Suiza	123.73	2016
(Stahl et al., 2018)	Comunicación	Todos	Bélgica	199.18	2016

Fuente: Elaboración propia

7.4 Encuesta municipios sobre recolección y gestión de PFU

A continuación se presentan las preguntas incluidas en la encuesta enviada a los municipios y sus posibles respuestas.

Tabla 7-4 Preguntas contenidas en la encuesta enviada a los municipios

Código pregunta	Pregunta completa	Respuestas
1.Existe Recolección	¿En su comuna existe, o ha existido en los últimos 3 años (desde 2017), alguna iniciativa municipal (puntos de recolección, campaña o similar), para la recolección de pilas fuera de uso? Esto incluye tanto iniciativas gestionadas directamente por la municipalidad, como las que hayan podido realizar por medio de un tercero.	- Sí - No - No sabe
1.1 Existe Permanentes	En su municipio se desarrolla, o ha desarrollado, la instalación de puntos de recolección PERMANENTES para pilas fuera de uso:	- Sí - No - No sabe
1.2 Existe Temporales	En su municipio se desarrolla, o ha desarrollado, campañas de recolección TEMPORALES para pilas fuera de uso:	- Sí - No - No sabe
1.1.1 Lugar Recoleccion Permanente	¿Dónde se ha realizado la instalación de puntos de recolección?	--Instalación de contenedor de recolección en puntos verdes - Instalación de contenedor de recolección en sitios públicos como municipalidad, recintos educacionales, consultorio, CESFAM, u otros. - Instalación de contenedores de recolección en sitios privados, como centros comerciales, supermercados, almacenes, u otros. - Otros: _____
1.1.2 Responsable Gestion Permanente	¿La gestión de los contenedores de recolección de pilas fuera de uso es realizada por el Municipio o por un tercero?	- Por el Municipio - Por un tercero
1.1.2.1 Tercero Responsable	Si en la pregunta anterior respondió por un tercero, ¿quién?	(Respuesta abierta)
1.3 Destino Pilas	¿Qué se realiza con las pilas fuera de uso recolectadas?	- Son entregados a un gestor especial - Son llevados a otros puntos verdes - Son dispuestos con el resto de los residuos comunales - Son acumulados Otros _____
1.3.1 Gestor Especial	Si respondió que son entregados a un gestor especial, ¿quién?	(Respuesta abierta)
1.3.2 Punto Verde	Si respondió que son llevados a otros puntos verdes, ¿a dónde?	(Respuesta abierta)

1.4 Cantidad Pilas	Aproximadamente, ¿Cuántas pilas fuera de uso son recolectadas anualmente?	<ul style="list-style-type: none"> - De 0 a 10 - De 10 a 50 - De 50 a 100 - Más de 100 - No sabe
1.4.1 Unidad Cantidad Pilas	¿En qué unidad de medida considera que se recolectan las pilas anualmente	<ul style="list-style-type: none"> - Contenedores / TEU - Kilogramos - Camiones - Sacos - No sabe
1.4.2 Ultimo año recolección	Indicar cual año fue el último año de este tipo de recolección	(Respuesta abierta)
1.2.1 Lugar Recolección Temporal	¿Dónde se ha realizado las campañas de recolección de pilas fuera de uso?	<ul style="list-style-type: none"> - En lugares fijos (públicos o privados), tales como recintos educacionales, recintos de salud, sitios de compra y abastecimiento, espacios municipales, entre otros - En lugares no permanentes, tales como ferias, actividades de la municipalidad, otros - Campañas puerta a puerta o en barrios - Otro: _____
1.2.2 Periodicidad Recolección	¿Cada cuánto tiempo se han llevado las campañas de recolección puntuales de pilas fuera de uso? Ejemplo: 1 vez al año, una vez al semestre, meses de verano, para eventos específicos.	(Respuesta abierta)
1.2.2 Responsable Gestion Temporal	¿La gestión de los contenedores de recolección de pilas fuera de uso es realizada por el Municipio o por un tercero?	<ul style="list-style-type: none"> - Por el Municipio - Por un tercero
2. Razones para no recolectar pilas	¿Cuáles son las principales razones para no realizar iniciativas para la recolección de pilas fuera de uso?	<ul style="list-style-type: none"> - Falta de financiamiento y/o altos costos de disposición adecuada - Falta de conocimiento respecto a la disposición adecuada de las pilas fuera de uso - Falta de conocimiento respecto a los impactos de la disposición inadecuada de las pilas - Falta de interés por parte de los vecinos - Se han priorizado la recolección de otros residuos - No hay quien retire u otros problemas logísticos - Otra razón: _____
1.5 Otros Municipios	De acuerdo a su conocimiento, en su comuna ¿existe disposición de pilas fuera de uso desde otros MUNICIPIOS de la zona?	<ul style="list-style-type: none"> - Sí - No
1.5.1 Otros Municipios _describa	De acuerdo a la pregunta anterior: en su comuna, ¿existe disposición de pilas fuera de uso desde otros MUNICIPIOS de la zona? Si respondió que sí, describa brevemente la situación.	(Respuesta abierta)

Fuente: Elaboración propia