



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

INVESTIGACIÓN DEL MERCADO DE RECICLAJE DE BATERÍAS DE LITIO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

JOSÉ LUIS ANTONIO CÁDIZ SEJAS

PROFESOR GUÍA:
Andres Caba Rutte

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Felipe Miranda Morales
Pablo Medina Cofre

Este trabajo ha sido en colaboración con:
SOQUIMICH

SANTIAGO DE CHILE
2022

INVESTIGACIÓN DEL MERCADO DE RECICLAJE DE BATERÍAS DE LITIO

El objetivo de esta memoria es caracterizar el mercado emergente de reciclaje de baterías de litio y estimar su impacto en el mercado de litio. Para cumplir con el objetivo se investigó la regulación de los principales mercados de electro-movilidad, agentes del mercado, procesos de reciclaje y se estimó el litio producido por reciclaje y sus costos de producción.

A continuación se resumen los capítulos de desarrollo de la memoria:

1. **Regulación reciclaje:** En esta sección se muestra el marco regulatorio del reciclaje de baterías de litio de los principales mercados que predominan en electro-movilidad, China, Europa y Estados Unidos.
2. **Procesos:** En esta sección se muestran las rutas de reciclaje que puede seguir una batería de litio para llegar a ser reciclada, impacto ambiental de rutas y las ventajas y desventajas de cada etapa que conforma una ruta particular. Es importante destacar para el entendimiento del lector, que estas etapas son “sub-procesos”, estos son procesos mecánicos, procesos pirometalúrgicos y procesos hidrometalúrgicos.
3. **Agentes del mercado:** En esta sección se hace un resumen estadístico de las plantas de reciclaje mediante su ubicación, capacidad de reciclaje (toneladas/año) y tipo de proceso.
4. **Costos de producción:** Dada la falta de información detallada sobre como calcular los costos de producción de litio, SQM sugiere mostrar en esta sección que el litio es un subproducto del proceso de reciclaje, es decir, el costo de reciclaje es totalmente pagado por el precio de mercado del Cobalto, Níquel y Cobre extraído.
5. **Modelo de reciclaje:** SQM poseía con anterioridad un modelo de reciclaje desarrollado por ellos mismos, este era un modelo simple de *forecasting*, el cual tenia por objetivo estimar la producción de litio proveniente del reciclaje de baterías de litio.

En esta sección se muestran los resultados del modelo de *forecasting* mejorado a partir del modelo base de SQM. El *output* del modelo es el litio producido por reciclaje de baterías y adicionalmente la oferta de baterías de segundo uso en su equivalencia en carbonato de litio.

6. **Evaluación del impacto en el mercado primario:** En esta sección se muestra la cuantificación del efecto del mercado emergente de reciclaje de baterías de litio en el mercado de litio en términos de la variación porcentual del equilibrio de mercado en el mediano y largo plazo.

Agradecimientos

A Carlos Yagüe Ortiz, por llegar en el momento adecuado, ponerme en el buen camino y haberme ayudado cuando más lo necesite.

A mi abuelo, Luis Mariano Sejas Sierra, de profesión Ingeniero Civil Eléctrico. Por ser siempre mi punto de referencia.

A mis profesores del Colegio Salesiano Oratorio Don Bosco, por siempre sacar lo mejor de mí.

Tabla de Contenido

1. Introducción y relevancia del estudio	1
1.1. Introducción	1
1.2. Relevancia del estudio	2
2. Objetivos	4
2.1. Objetivo general	4
2.2. Objetivos específicos	4
3. Marco teórico y estado del arte	5
3.1. Marco teórico	5
3.1.1. Baterías de litio	5
3.1.1.1. Composición de Baterías de Litio	6
3.1.1.2. Principio de funcionamiento de una batería de litio	7
3.1.2. Mercado primario: mercado del litio	8
3.1.2.1. Cadena de valor del litio	8
3.1.2.2. Demanda de litio	9
3.1.2.3. Otros escenarios de demanda de litio	12
3.1.2.4. Oferta de litio	12
3.1.2.5. Producción secundaria de litio	12
3.1.2.6. Modelo base de reciclaje	13
3.1.3. Metodologías para caracterizar mercados	14
3.2. Estado del arte	15
3.2.1. Reciclaje de baterías de litio	15
3.2.2. Logística	16
3.2.3. Recuperación de productos	17
4. Metodología	20
5. Desarrollo	21
5.1. Legislación	21
5.1.1. China	21
5.1.2. Europa	21
5.1.3. Estados Unidos	22
5.2. Procesos de reciclaje	23
5.2.1. Vista general	23
5.2.2. Etapa de tratamiento mecánico	24
5.2.3. Etapa de pirometalurgia	25
5.2.4. Etapa de hidrometalurgia	26

5.2.5.	Reciclaje directo	27
5.2.6.	Comparación impacto ambiental	28
5.2.7.	Comparación costos de reciclaje	29
5.3.	Revisión de empresas	30
5.4.	Costo de producción de litio	31
5.5.	Estimación de la oferta secundaria	33
5.5.1.	Escenarios estimados	35
5.5.2.	Análisis de sensibilidad	36
5.6.	Impacto en el mercado primario	37
6.	Conclusiones y trabajo futuro	39
	Bibliografía	40
Anexo	Curvas de costos	43

Índice de Tablas

3.1.	Densidades energeticas.	6
3.2.	Materiales valiosos contenidos en LIB.	7
3.3.	Actores principales sector minero.	8
3.4.	Actores principales sector refinera.	9
3.5.	Actores principales sector cátodos.	9
3.6.	Actores principales sector baterías.	9
3.7.	Actores principales sector vehículos eléctricos.	9
5.1.	Ventajas y desventajas proceso pirometalúrgico Fuente de elaboración propia en base a [9][30][31][32].	26
5.2.	Ventajas y desventajas proceso hidrometalúrgico - Fuente de elaboración propia en base a [9][30][31][32].	27
5.3.	Ventajas y desventajas proceso de reciclaje directo - Fuente de elaboración propia en base a [9][30][31][32][33].	28
5.4.	Resumen información declarada “ <i>Neometals</i> ” [35].	31
5.5.	Precios de mercado [35].	31
5.6.	Tasas de recuperación.	32
5.7.	kwh reciclados.	32
5.8.	Elementos reciclados en kg.	32
5.9.	Costo de producción Cobalto y Níquel.	32
5.10.	Escenarios vida útil.	34
5.11.	Escenarios tasas de recolección <i>EV</i>	34
5.12.	Escenarios tasas de segundo uso.	34
5.13.	Escenarios vida útil de segundo uso.	34
5.14.	Escenarios de variación porcentual del precio de mercado del litio en 2025. . .	37
5.15.	Escenarios de variación porcentual del precio de mercado del litio en 2030. . .	38
A.1.	Costos y volúmenes de litio a 2025 <i>Mckinsey</i>	43
A.2.	Costos y volúmenes de litio a 2025 <i>Benchmark</i>	44
A.3.	Costos y volúmenes de litio a 2025 <i>Deutsche Bank</i>	45
A.4.	Costos y volúmenes de litio a 2025 <i>CRU</i>	46
A.5.	Costos y volúmenes de litio a 2025 <i>SQM</i>	47
A.6.	Costos y volúmenes de litio a 2030 <i>SQM</i>	48

Índice de Ilustraciones

1.1.	(a) Proyección evolución de los costos de baterías de litio - (b) Proyección ventas mundiales vehículos eléctricos [3].	2
1.2.	Distribución de ingresos netos SQM [5].	3
3.1.	Esquema del funcionamiento de una LIB [7].	8
3.2.	Cadena de valor del litio [5].	8
3.3.	Curva de demanda de litio para uso en baterías a nivel global.	10
3.4.	Curva de demanda de litio segmentada.	10
3.5.	Market share segmento EV.	11
3.6.	Market share química LIB en China.	11
3.7.	Demanda agregada de litio.	12
3.8.	Equilibrio de mercado sin reciclaje.	12
3.9.	Estimaciones oferta secundaria.	13
3.10.	Estimaciones oferta secundaria con modelo base.	14
3.11.	Formatos de pack de baterías en vehículos eléctricos [14].	15
3.12.	Desafíos en el reciclaje en cada nivel de escala [14].	16
3.13.	Resumen de rutas de reciclaje de principales plantas [2].	18
3.14.	Resumen de recuperación de litio de algunas plantas de reciclaje [2].	19
3.15.	Precios promedio de materiales 2019-2020 [9].	19
4.1.	Esquema de metodología.	20
5.1.	Rutas de reciclaje - Fuente de elaboración propia en base a [30] [31].	24
5.2.	Diagrama del proceso de tratamiento mecánico de LIB: 1. Estabilización, 2. Conminución, 3. Separación física, 4. Purificación de la masa negra [1].	25
5.3.	Diagrama proceso pirometalúrgico - Fuente de elaboración propia en base a [9][30][31][32].	26
5.4.	Diagrama proceso hidrometalúrgico - Fuente de elaboración propia en base a [9][30][31][32].	27
5.5.	Proceso de reciclaje directo para baterías LMO [30].	28
5.6.	Emisiones de CO_2 por ruta de reciclaje [31].	29
5.7.	Emisiones de CO_2 por ruta de reciclaje [33].	29
5.8.	Comparación costos de reciclaje para una batería NMC111 según ruta [34].	30
5.9.	Comparación costos de reciclaje para una batería LFP según ruta [33].	30
5.10.	Resumen revisión de empresas.	31
5.11.	Esquema modelo de reciclaje - Fuente de elaboración propia.	33
5.12.	Estimación oferta secundaria y oferta de segundo de uso.	35
5.13.	Escenarios oferta secundaria.	35
5.14.	Escenarios oferta de segundo uso.	36
5.15.	Sensibilidad de variables que definen modelo de reciclaje.	36
5.16.	Equilibrio de mercado con reciclaje.	37

Capítulo 1

Introducción y relevancia del estudio

1.1. Introducción

El reciclaje de baterías de iones de litio (LIB) puede proporcionar una variedad de beneficios [1][2]:

- Reducción de riesgos de contaminación de suelos y aguas subterráneas (materiales tóxicos), y de explosiones en vertederos (materiales inflamables).
- Reducción de la huella de carbono de los vehículos eléctricos (entre el 30-50% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) están relacionadas con la fabricación de la batería y la extracción de sus materiales).
- Reducción de costos de producción de los vehículos eléctricos al usar materiales reciclados.
- Reducción de la dependencia de la extracción de minerales (Co, Ni, Li, Mn) e impacto ambiental producto de la intensiva extracción minera.
- Reducir dependencia de proveedores específicos. Ej: Zonas de conflicto como DRC y concentración de mercado en China.

Por otro lado, la creciente concientización de la sociedad en el impacto que tiene la actividad humana en el medio ambiente, ha hecho que el mundo haga esfuerzos por encontrar maneras de reducir el efecto del calentamiento global [2].

Para reducir las emisiones de GEI, en el último tiempo se han buscado sustitutos del transporte a base de combustibles fósiles. En ese sentido, el vehículo eléctrico puede proporcionar un mercado de transporte libre de CO_2 y otros contaminantes [8].

En el contexto de los vehículos eléctricos, las LIB destacan por sus ventajas comparativas respecto a otras tecnologías de almacenamiento. Por esto, las LIB son el sistema de almacenamiento idóneo para los vehículos eléctricos [2].

Las proyecciones de la disminución de los costos de producción de LIB, permiten proyectar un aumento de la demanda de vehículos eléctricos (ver figura 1.1.b). Esto se debe a

que el costo de la batería es el componente más elevado de los vehículos eléctricos, fluctuando entre el 48 % y 55 % del costo total [3].

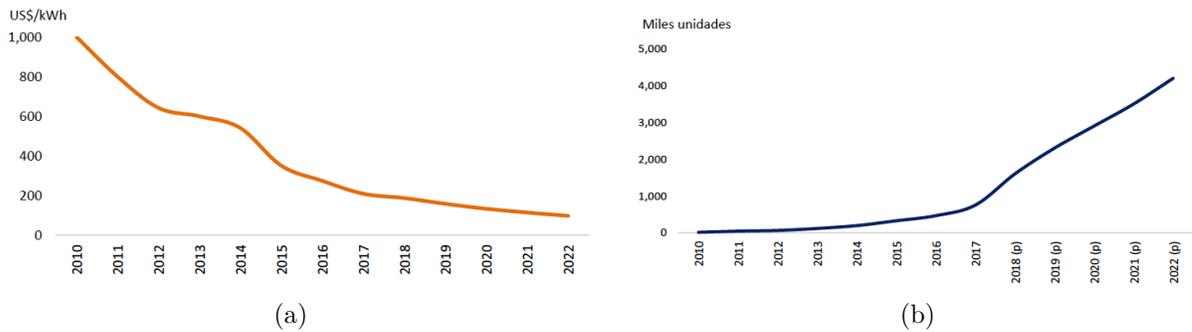


Figura 1.1: (a) Proyección evolución de los costos de baterías de litio - (b) Proyección ventas mundiales vehículos eléctricos [3].

Dicho lo anterior, el aumento de la demanda de vehículos eléctricos conlleva un aumento de la demanda en el mercado de litio, el cual será denominado como mercado primario en el contexto de la presente memoria. De esto se puede inferir que habrá un gran volumen de litio almacenado en las baterías presentes en el mercado, las cuales debiesen ser recicladas una vez que su vida útil haya terminado. De este modo, se están generando las señales económicas necesarias para impulsar un nuevo mercado emergente, es decir el “**Mercado de reciclaje de baterías de litio**”, el cual será denominado como mercado secundario, debido a que emerge a partir de los desechos de los productos generados del mercado primario.

En el contexto del área de planificación y estudio de precios de la compañía minera SQM, el reciclaje de baterías de litio se podría transformar en un agresivo competidor en el mercado primario o eventualmente en una oportunidad de negocio. Por esto, es importante entender este nuevo mercado, por lo que esta memoria tiene como objetivo caracterizar el mercado de reciclaje de baterías de litio y estimar el volumen de Carbonato de Litio Equivalente (LCE) producido por reciclaje, su costo de producción y cuantificar su efecto en el mercado primario.

1.2. Relevancia del estudio

SQM es uno de los productores más grandes de litio en el mundo, representando aproximadamente el 19 % de la venta mundial de químicos de litio [4]. En 2019 los ingresos de SQM por ventas de litio totalizaron 505,7 millones de dolares, representando más del 40 % de los ingresos brutos de SQM [5]. A partir de la figura 1.2, se desprende que el mercado del litio es la principal línea de negocio de SQM.

Por otro lado, se proyecta un aumento de la demanda de vehículos eléctricos producto del abaratamiento de las baterías de litio [3]. Una vez que la vida útil de las baterías de litio haya terminado, estas debiesen ser recicladas y debido al gran volumen de baterías de litio que habría en el mercado, el reciclaje de baterías de litio tiene el potencial de ser una fuente secundaria de litio que podría llegar a satisfacer a más de 7 % de la demanda a 2028 [6]. Dependiendo del volumen y costo de producción del LCE, el mercado primario de litio se podría ver fuertemente perturbado producto del ingreso de este nuevo productor de litio.

Dicho lo anterior, es importante comprender el mercado de reciclaje de baterías de litio para poder reaccionar oportunamente ante cualquier amenaza u oportunidad de negocio.

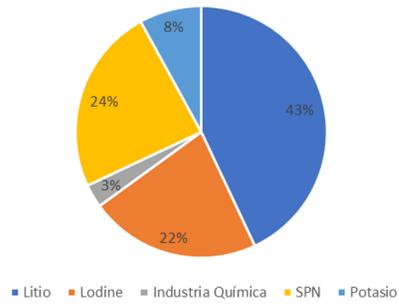


Figura 1.2: Distribución de ingresos netos SQM [5].

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo general

Caracterizar el mercado actual de reciclaje de baterías de litio y proyectar a mediano-largo plazo su impacto como oferta secundaria de litio.

2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de la presente memoria son:

- Comprender la regulación del reciclaje de baterías de litio.
- Caracterizar agentes del mercado.
- Caracterizar procesos de reciclaje.
- Proyectar en el mediano y largo plazo la oferta de LCE producido por reciclaje de baterías de litio mejorando el modelo base de SQM.
- Estimar el costo de producción de LCE.
- Evaluar el impacto en el mercado.

Capítulo 3

Marco teórico y estado del arte

3.1. Marco teórico

3.1.1. Baterías de litio

Una batería es un dispositivo que convierte energía química en energía eléctrica mediante una reacción redox. Si esta reacción es irreversible, se denominan baterías no recargables, también llamadas baterías primarias. Por otro lado, si la reacción química es reversible, se denominan baterías recargables, también llamadas baterías secundarias [7].

La unidad básica de un sistema de baterías se denomina celda, las que son agrupadas para formar módulos, los que a su vez se agrupan para formar el pack de baterías o sistema de baterías de un vehículo eléctrico. Las celdas y módulos son conectados en serie y en paralelo en función de la características eléctricas de salida y capacidad de almacenamiento deseada.

El voltaje y la capacidad de almacenamiento de las celdas que compone una batería esta definido por los materiales con los que están construidas.

Las celdas de baterías están compuestas por cuatro componentes básicos que permiten la producción de electricidad mediante reacciones químicas [7]:

- **Ánodo:** Es un electrodo en el que se produce una reacción de oxidación, mediante la cual un material pierde electrones.
- **Cátodo:** Es un electrodo que sufre una reacción de reducción, mediante la cual el material gana electrones.
- **Electrolito:** Es cualquier sustancia que actúa como conductor para transportar iones eléctricos de un electrodo a otro.
- **Separador:** Es una membrana microporosa, que evita el contacto entre los electrodos con el objetivo de evitar un corto circuito entre estos. Además, tiene una función de seguridad. Si por accidente se eleva la temperatura de la celda, el separador se funde y de esta forma, se evita la conducción de corriente entre los electrodos.

Si bien hay un gran número de configuraciones en desarrollo en la actualidad, existen tres tipos principales de baterías comerciales [8]:

1. **Ácido-plomo:** son baterías con una densidad energética de 30 Wh por kg y una densidad de potencia de 180W por kg. Sin apenas autodescarga, su bajo coste, en torno a \$150 / kWh, y su alto tiempo de vida las convierten en la opción favorita de aplicaciones de almacenamiento a largo plazo.
2. **Baterías de níquel:** son baterías basadas en níquel-cadmio (NiCd), níquel-zinc (NiZn) y níquel - hidruro metálico (NiMH). Tienen un coste mayor que las de plomo, en torno a \$700 / kWh, y una densidad energética en torno a 50-80 Wh/kg.
3. **Baterías de litio:** estas baterías presentan densidades energéticas más altas, entre 200 y 300 Wh/kg, con alta eficiencia en la carga y descarga y con densidades de potencia que pueden llegar a 2000 W/kg, y con un coste inferior a \$700 / kWh.

El vehículo eléctrico necesita un sistema de baterías que proporcionen la potencia necesaria para la tracción de dicho vehículo. Por esto, la batería preferida es la de litio, siendo las opciones que emplean cátodos que contienen cobalto las más eficientes.

3.1.1.1. Composición de Baterías de Litio

Una batería de litio se caracteriza por su material de cátodo, ánodo y electrolito [9]:

- **Material de cátodo:** Es una pasta que recubre láminas de aluminio. Este es construido con una pasta de material activo que incluye óxido de litio, un aglutinante, material de carbón y un solvente. Durante la fabricación, la pasta recubre la lámina de aluminio, se seca y se presiona hasta alcanzar el grueso apropiado.

Existen tipos de baterías de litio según el material activo que compone el cátodo:

1. **NCA** (Óxido de litio níquel cobalto aluminio - $LiNi_{0,8}Co_{0,15}Al_{0,05}O_2$)
2. **LMO** (Óxido de litio manganeso - $LiMn_2O_4$)
3. **NMC** (Óxido de litio níquel manganeso cobalto - $LiNiMnCoO_2$)
4. **LFP** (Óxido de litio hierro fosfato - $LiFePO_4$)
5. **LCO** (Óxido de litio cobalto - $LiCoO_2$)

Los datos de las tablas 3.1 y 3.2 fueron estimaciones internas del equipo de “Planificación y estudio de precios” de SQM en diciembre del 2020 y serán utilizados para estimar los costos de producción de LCE.

En la tabla 3.1 tanto se muestran las densidades energéticas de las principales químicas ricas en cobalto, las cuales son de interés para ser recicladas.

Tabla 3.1: Densidades energeticas.

	Densidad energética	
LCO	249,4	wh/kg
NCA	275	wh/kg
NMC111	195	wh/kg
NMC622	249,4	wh/kg

En el caso de las baterías NMC, estas se pueden distinguir por las proporciones de níquel, manganeso y cobalto mediante la siguiente nomenclatura, NMC111 y NMC622.

Por ejemplo, para el caso NMC111, quiere decir que la proporción Ni:Mn:Co son $33,3\% : 33,3\% : 33,3\%$ y para el caso NMC622 las proporciones Ni:Mn:Co son $60\% : 20\% : 20\%$.

En la tabla 3.2 se muestran los elementos más valiosos contenidos en las LIB.

Tabla 3.2: Materiales valiosos contenidos en LIB.

	LCE	$CoSO_4$	$NiSO_4$	
NCA	0,5304	0,6	3,0	kg/kwh
NMC111	0,6818	1,7	1,6	kg/kwh
NMC622	0,5717	0,9	2,4	kg/kwh

- **Material de ánodo:** Sus materiales activos recubren láminas de cobre. El material activo del ánodo típico es carbono (específicamente grafito), mezclado con aglutinante, un solvente y carbón.
- **Electrolito:** Es una mezcla entre sal de litio y un solvente orgánico y su función es el transporte de iones de litio entre el ánodo y el cátodo de la celda. Para aumentar la movilidad de los iones, es conveniente que el solvente sea más soluble que la sal de litio y menos viscoso. La mayor parte de los electrolitos utilizados en celdas de baterías comerciales de ion litio, son soluciones no acuosas de hexafluorurofosfato de litio ($LiPF_6$) disueltas en una mezcla de carbonato.

3.1.1.2. Principio de funcionamiento de una batería de litio

Cuando la LIB esta siendo cargada, esta es conectada a una fuente de tensión en corriente continua. El polo positivo de la fuente de energía atrae a los electrones del litio ubicados en el cátodo, los cuales terminan circulando por el circuito externo hacia el ánodo. Esto, a su vez provoca que los iones de litio circulen por el electrolito, desde el cátodo hacia el ánodo. Cuando el flujo de iones de litio haya terminado, la batería esta completamente cargada.

Por otro lado, cuando la batería es descargada alimentando una carga, los electrones almacenados en el ánodo circulan hacia el cátodo a través del circuito externo y al mismo tiempo los iones de litio fluyen a través del electrolito desde el ánodo hacia el cátodo. Cuando el flujo de iones termina, la batería ha sido completamente descargada.

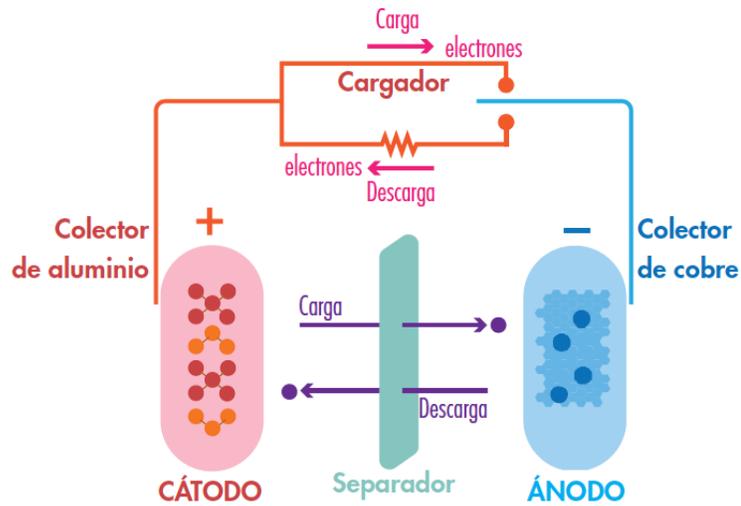


Figura 3.1: Esquema del funcionamiento de una LIB [7].

3.1.2. Mercado primario: mercado del litio

Los datos numéricos de esta subsección fueron estimaciones internas del equipo de “Planificación y estudio de precios” de SQM en diciembre del 2020 y son utilizados para el modelo de reciclaje y el estudio de impacto en el mercado primario.

3.1.2.1. Cadena de valor del litio

A continuación se muestra la cadena de valor del litio con el objetivo de identificar las principales compañías representativas de cada etapa, las cuales podrían estar interesadas en entrar en el mercado del reciclaje de baterías de litio.



Figura 3.2: Cadena de valor del litio [5].

En el sector **minero** el mercado está concentrado en Australia, Chile, China y Argentina:

Tabla 3.3: Actores principales sector minero.

Talison	Soquimich	Orocobre
Albemarle	Pilbara	Livent
Galaxy	Altura	Mineral Resources

En el sector de **refinería** el mercado está concentrado en China:

Tabla 3.4: Actores principales sector refinera.

Tianqi	Albemarle	Soquimich
Livent	Qinghai Lithium	Orocobre
Lanke Lithium	Ganfeng Lithium	

En el sector de **cátodos** el mercado concentrado en China, Japón y Corea:

Tabla 3.5: Actores principales sector cátodos.

Dynanonic	Energy	Easpring
Ronbay	Umicore	XTC new
BM	Posco	Shanshan
LF	BTR	Ecopro
Sumitomo	Basf	Johnson Matthey

En el sector de **baterías** el mercado concentrado en China, Japón y Corea:

Tabla 3.6: Actores principales sector baterías.

CATL	LG Chem	Panasonic
Samsung SDI	SKI	Envision AESC

Finalmente en el sector de **vehículos eléctricos** el mercado esta concentrado en China, Europa y Estados Unidos:

Tabla 3.7: Actores principales sector vehículos eléctricos.

Tesla	BYD	BAIC
Renault-Nissan-Mitsubishi	BMW	Hyundai-Kia
Volkswagen	General Motors	SAIC
Toyota	Geely	Volvo
Daimler	Chery	FCA-PSA
Ford		

3.1.2.2. Demanda de litio

El modelo de reciclaje que se llevará a cabo en la presente memoria tiene como principal input la curva de demanda de litio para uso en baterías recargables (electro-movilidad, artículos electrónicos y almacenamiento energético) junto con una proyección y sus principales características, que se mencionarán a continuación.

La demanda de litio a nivel global se puede visualizar en la figura 3.3.

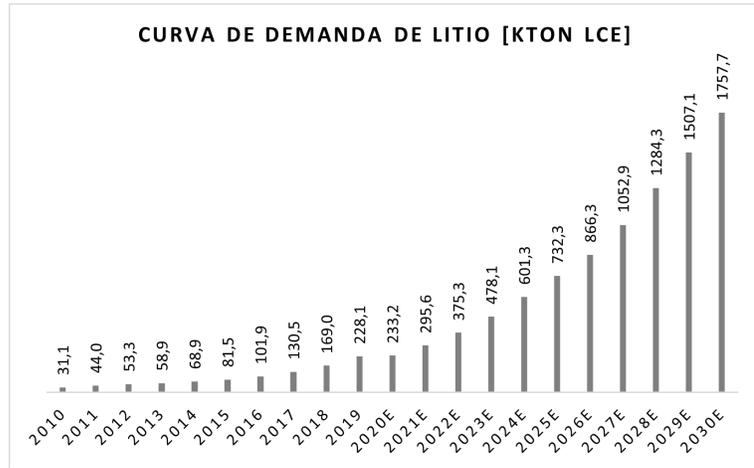


Figura 3.3: Curva de demanda de litio para uso en baterías a nivel global.

La demanda global de litio se puede dividir en los siguientes sub-segmentos, *Electric Vehicles (EV)*, *E-bike*, *Energy storage system (ESS)*, *Electronics* y *Others* (herramientas, drones etc). Siendo el mercado predominado principalmente por los vehículos eléctricos. En la figura 3.4, se observa la desagregación de la curva global de litio.

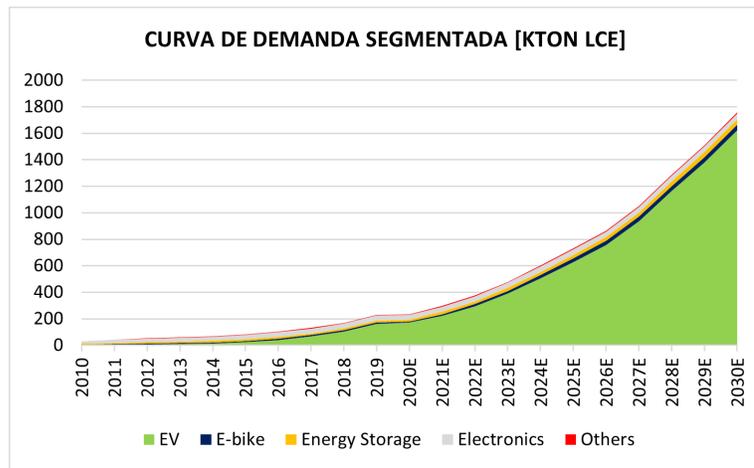


Figura 3.4: Curva de demanda de litio segmentada.

Para generar un modelo más robusto, se considera la demanda mundial segmentada en sus 3 principales mercados, China, Europa, Estados Unidos y el resto del mundo considerado como *ROW (Rest Of the World)*.

Los porcentajes de participación son conocidos como *Market Share*, en la figura 3.5 se muestra el *Market Share* de los principales mercados para el segmento *EV*.

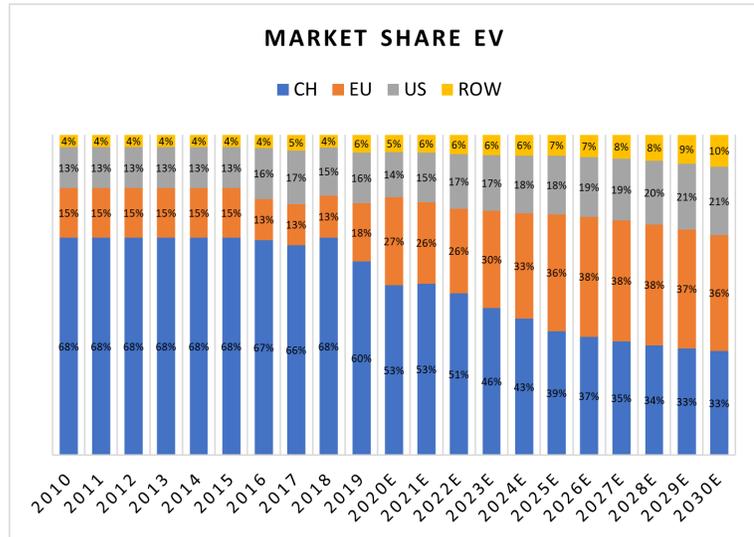


Figura 3.5: Market share segmento EV.

Se puede observar que el mercado actualmente lo domina China pero se espera que a 2030 Europa tome un papel importante en el mercado. Notar que también existe un *Market Share* para los segmentos *E-bike*, *Energy storage system (ESS)*, *Electronics*, y *Others*, detalle que se puede ver en el [modelo de reciclaje](#).

El mercado *EV* se puede seguir desagregando según el tipo de estructura química de la batería que utiliza. Esto es de vital importancia ya que según la química de la batería, existen diferentes porcentajes de litio almacenados al interior de estas y existe interés por reciclar solo algunos tipos de baterías al poseer materiales valiosos como Níquel y Cobalto. En la figura 3.6 se muestra el *Market Share* de químicas de batería de litio para el caso de China.

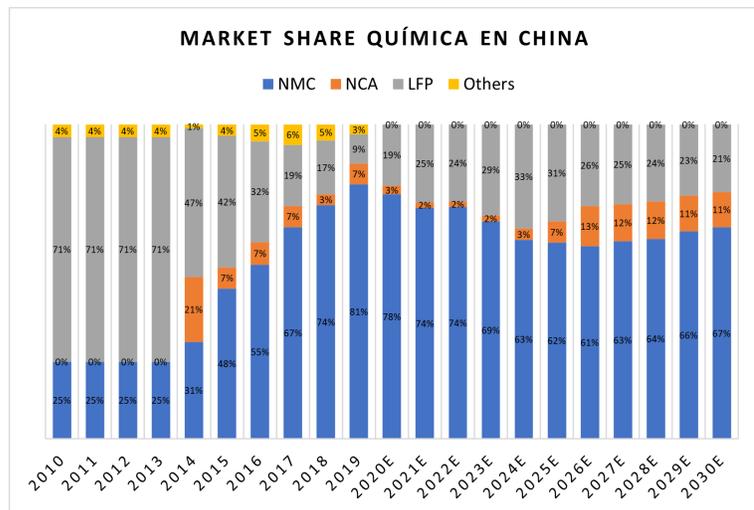


Figura 3.6: Market share química LIB en China.

Notar que también existe un *Market Share* de baterías particular para Europa, Estados Unidos y ROW, detalle que se puede ver en el [modelo de reciclaje](#).

3.1.2.3. Otros escenarios de demanda de litio

Para realizar el estudio del impacto de mercado de reciclaje sobre el mercado primario se consideran distintos escenarios de demanda estimados según ciertas consultoras y compañías interesadas en el tema, ver figura 3.7. Considerar distintos escenarios nos permitirá obtener resultados más robustos y es importante recalcar que en este caso se debe considerar la demanda agregada de litio, es decir la demanda de baterías recargables junto con la demanda en usos tradicionales como vidrio, cerámicas, grasas y lubricantes.

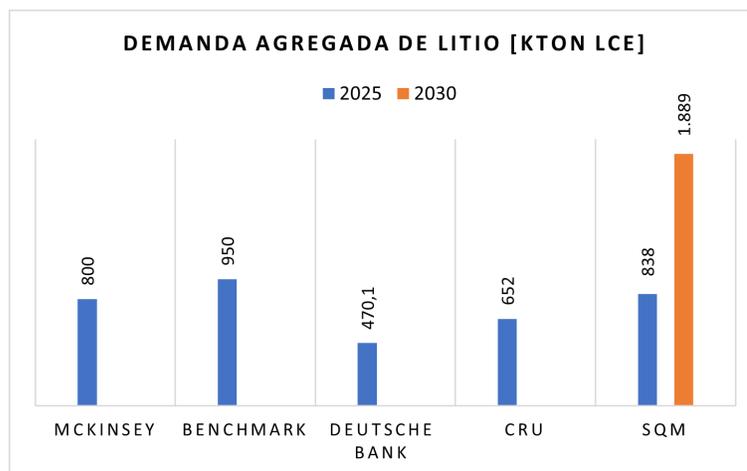


Figura 3.7: Demanda agregada de litio.

3.1.2.4. Oferta de litio

En cuanto a la oferta de litio, es importante tener una estimación de los volúmenes y costos de producción de los participantes del mercado primario de litio, esto con el objetivo de poder tener los equilibrios de mercado en el mediano y largo plazo. Con esto se podrá cuantificar el efecto del mercado de reciclaje de baterías de litio incorporándolo como un agente ficticio que oferta en el mercado primario. En la figura 3.8, se muestra la curva de costos estimada por SQM en el largo plazo.

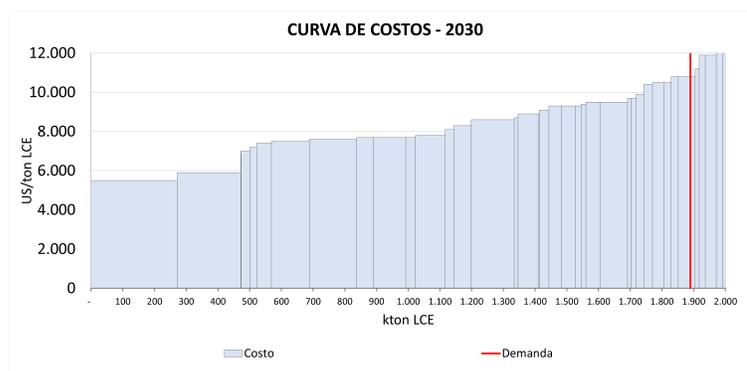


Figura 3.8: Equilibrio de mercado sin reciclaje.

3.1.2.5. Producción secundaria de litio

Respecto a la oferta secundaria de litio, en 2018 se contabilizaron 52 centros de reciclaje de baterías de ion-litio, 24 de estos en China [6]. En Europa y Estados Unidos la mayor parte

de los centros son negocios que no están integrados con las fabricas de baterías, mientras que en Asia los negocios de fabricación y reciclaje de baterías están relativamente integrados. En China en particular están conectados a fabricantes de baterías y *EV*.

Según la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO) Se espera que el uso de litio reciclado crezca desde menos de 10 kt. LCE en 2018 a sobre las 100 kt. LCE a partir de 2028. Esto implicaría que el litio secundario pasaría de representar un 3% de la demanda agregada en 2018 a más de un 7% hacia fines de la década [6].

En la figura 3.9 se muestran las estimaciones de Roskill, TQN y Benchmark respecto a la producción de litio proveniente del reciclaje de baterías de litio.

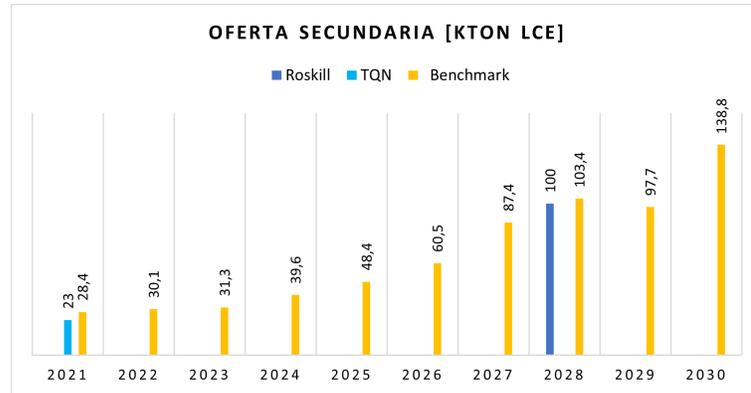


Figura 3.9: Estimaciones oferta secundaria.

3.1.2.6. Modelo base de reciclaje

El modelo base de SQM recibe como *input* la curva histórica y proyectada de demanda de baterías de litio en su equivalencia en LCE, siendo en este caso la demanda histórica y proyectada de la figura 3.3. Para simplificar la idea, se supone que el 100% de la demanda son baterías para *EV*. Dicho esto y considerando una vida útil promedio de 10 años, se puede decir que para cada año de demanda, esta estará lista para ser reciclada en 10 años más.

La estimación de la producción secundaria de litio mediante el modelo base y considerando una eficiencia del proceso de reciclaje de 90% se muestra en la figura 3.10.

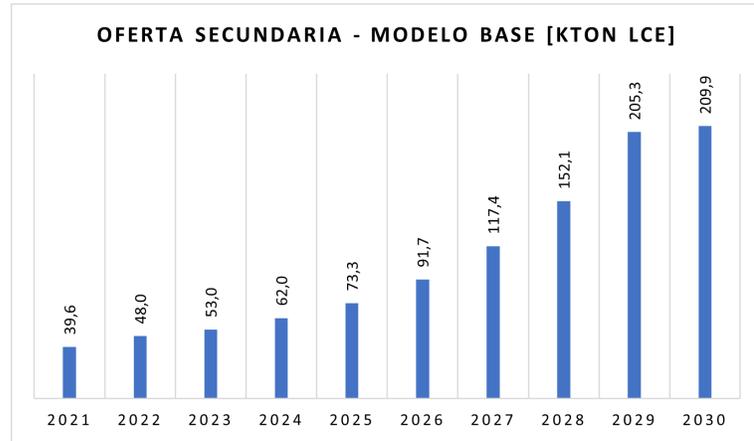


Figura 3.10: Estimaciones oferta secundaria con modelo base.

Como se puede observar en la figura 3.9 y 3.10, las estimaciones del modelo base son del mismo orden de magnitud que las estimaciones de Roskill, TQN y *Benchmark*. Esto valida el modelo pero se aprecia que se tiende a sobre estimar la producción secundaria de litio en comparación a las demás estimaciones. Esto se asocia a su exceso de simplicidad al no considerar la dinámica del mercado de reciclaje de baterías de litio ni tampoco características locales de los principales mercados.

El modelo de *forecasting* desarrollado para estimar la producción de litio proveniente del reciclaje de baterías de litio consiste en mejorar el modelo base considerando los diferentes tipos de usos y químicas e incorporando factores locales como la regulación en lo que respecta a reciclaje, que definen las tasas de recolección de baterías.

3.1.3. Metodologías para caracterizar mercados

Entre las metodologías típicas para estudiar un mercado está **análisis FODA** [10], **análisis PEST** [11], **cadena de valor** [12] y **5 fuerzas de Porter** [13].

El **análisis FODA** permite entender la situación en la cual se encuentra una empresa respecto del mercado en el cual se desarrolla. Este consiste en identificar **Fortalezas**, **Oportunidades**, **Debilidades** y **Amenazas**. Factores típicos a considerar son la tecnología, calidad de productos, preferencias del consumidor (demanda) y costos de producción.

El **análisis PEST** permite identificar factores externos a la empresa que podrían influir en su rendimiento, estos factores son **Políticos**, **Económicos**, **Sociales** y **Tecnológicos**.

La **cadena de valor** permite definir el modelo de negocio de la empresa, el cual esta directamente relacionado con las características del mercado en el cual se desarrolla. Para el modelo de negocio se necesita definir **proceso logístico**, **operaciones**, **marketing** y **ventas** etc.

Finalmente las **5 fuerzas de Porter** es una herramienta que permite analizar la rentabilidad de una empresa evaluando su valor en el mercado en cual se desarrolla mediante 5 fuerzas, estas son: **poder de negociación con clientes**, **poder de negociación de los proveedores**, **amenazas de nuevos competidores**, **amenazas de nuevos productos**

sustitutos y rivalidad entre competidores (oferta).

3.2. Estado del arte

3.2.1. Reciclaje de baterías de litio

Los fabricantes de *EV* han adoptado diferentes enfoques en la estructura de la batería que los alimenta, por esto en el mercado de baterías de *EV* existe una amplia variedad de diferentes configuraciones físicas, tipos de celdas y química celular. Esto finalmente presenta un desafío para el reciclaje de baterías debido a la falta de estandarización [14].

A menudo los objetivos de diseño para la seguridad dan como resultado diseños que no están optimizados para el reciclaje y el desmontaje manual puede llevar mucho tiempo. La figura 3.11 detalla tres tipos de estructuras distintas para el pack de baterías junto con sus respectivos módulos y celdas. Como se puede observar, los packs poseen diferentes configuraciones físicas que requieren distintas etapas para el proceso de desmontaje, dificultando el proceso de automatización del desmantelamiento. Además las diferentes químicas de las celdas dificultan el diseño de procesos de reciclaje más eficientes.

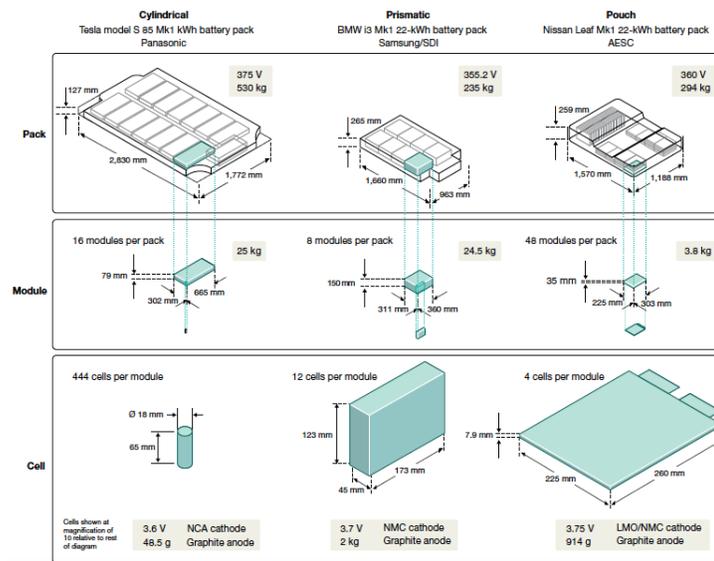


Figura 3.11: Formatos de pack de baterías en vehículos eléctricos [14].

Los altos pesos y voltajes de las baterías implica que los empleados deben estar calificados y tener herramientas especializadas para dicho desmantelamiento. Siendo esto un desafío adicional para esta industria en transición con escasez de habilidades específicas.

Un instituto de la industria del motor encontró que solo 1.000 técnicos capacitados en el Reino Unido son capaces de dar servicio a vehículos eléctricos, con otros 1.000 en formación. Dado que hay 170.000 técnicos de motores en el Reino Unido, esto representa menos del 2% del personal [14]. Con esto, existe la preocupación de que los mecánicos no capacitados puedan arriesgar su vidas reparando vehículos eléctricos.

El desmontaje de la batería automatizado podría eliminar el riesgo de daños a los traba-

jadores, y una mayor automatización reduciría los costos, lo que podría hacer que el reciclaje de batería sea menos costoso. Sin embargo, el desmantelamiento de baterías de automóviles presenta grandes desafíos debido a que la robótica y la automatización se basa en entornos altamente estructurados, en los que los robots realizan acciones repetitivas con respecto a objetos exactamente conocidos en posiciones fijas. Por el contrario, el desarrollo de sistemas robóticos que puedan generalizar a una variedad de objetos y manejar la incertidumbre, es un gran desafío en la frontera de la investigación en inteligencia artificial.

En la figura 3.12 se muestran los principales desafíos en cada etapa de desmantelamiento de la batería del vehículo eléctrico.

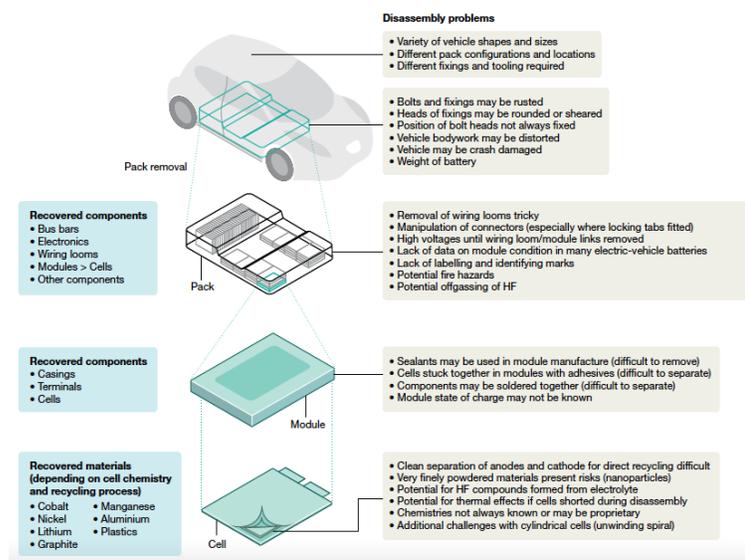


Figura 3.12: Desafíos en el reciclaje en cada nivel de escala [14].

Para corregir estos problemas, es recomendable aprender de otras industrias que han tenido éxito en cuanto a la reciclabilidad de los desechos, como lo es la industria de las baterías de plomo-ácido el cual a través de numerosas iteraciones, ha logrado estandarizar las baterías, estando diseñadas para ser recicladas. Las baterías de plomo-ácido tienen tasas de reciclaje en peso de casi el 100 % en US, Japón y la mayor parte de Europa [15]. Este éxito se debe en parte de la simplicidad de su diseño, donde el ánodo y el cátodo son Pb y PbO_2 respectivamente, siendo el proceso eficiente debido a la uniformidad de los materiales utilizados.

Además, las baterías de plomo-ácido no están ensambladas en módulos y packs, por lo que no es necesario desmontarlos antes de reciclarlos. El proceso de reciclaje de una batería de plomo-ácido es sencillo: la caja se tritura, permitiendo que el electrolito de ácido sulfúrico se libere, y los electrodos de plomo se separan de la carcasa de polipropileno por densidad. El plomo se funde y el polipropileno se puede reutilizar en carcasas nuevas.

3.2.2. Logística

En el reciclaje de baterías de litio se usa el concepto de “logística inversa” en donde una vez que la vida útil de la batería (o producto que contiene una) llega a su fin, es devuelta a los fabricantes o vendedores en puntos de recolección específicos [16]. Posteriormente puede ser necesario un desmantelamiento de la batería, proceso que se lleva a cabo no necesariamente

en los puntos de recolección. Finalmente estas baterías son vendidas a plantas de reciclaje o se les paga por el proceso de extracción de las materias primas, las cuales deben ser transportadas a la zona en donde se ubica la planta de reciclaje desde la zona de desmantelamiento.

En el artículo “Implicaciones del ciclo de vida y logística de la cadena de suministro de vehículos eléctricos reciclaje de baterías en California” [17] se habla sobre la carencia de infraestructura en la época del 2015 para administrar baterías de litio al final de su vida útil y muestra como se planifica la logística del proceso de recolección hasta las plantas de reciclaje.

En esta planificación se resuelve un problema de optimización para minimizar los costos de transporte desde los puntos de recolección y zonas de desmantelamiento hasta las plantas de reciclaje. En este caso, lo que se pretende optimizar es la ubicación y cantidad de las plantas de desmantelamiento, dado que se tiene como información la ubicación de los puntos de recolección y la ubicación de la planta de reciclaje.

Por otro lado, en el artículo “Integración de la logística offline y el sistema online para reciclar bicicletas eléctricas batería en China” [16], se habla sobre “Internet+Recycling”, método de reciclaje innovador que utiliza tecnología de la información para mejorar el acceso a la información y comunicación entre los profesionales del reciclaje y el general de la población, usando plataformas en línea donde los participantes, tanto individuos como profesionales del reciclaje, agendan citas para dejar las baterías en el lugar recolección o comercialización.

Estas actividades de “Internet + Reciclaje” se ha llevado acabo en las principales ciudades como Dalian, Shenyang, Tianjin, Chongqing y Shenzhen en 2019. Sin embargo, este nuevo método de reciclaje aun no goza de una amplia masificación.

3.2.3. Recuperación de productos

Por razones económicas y termodinámicas, los procesos de reciclaje se enfocan en la recuperación de Co, Ni y Cu, por lo que existe interés económico en reciclar baterías NCA y NMC debido a su alto contenido de Co y Ni. Sin embargo, baterías LFP y LMO no son de interés económico para ser recicladas, debido a que no contienen Co y tampoco Ni.

Por otro lado, el interés por la extracción de litio ha aumentado en el ultimo tiempo debido a los pronostico de alta demanda de este elemento. Hay menos enfoque en Al y Mn, pero el primero es en parte recuperado en procesos mecánicos y componentes no metálicos como el grafito y los disolventes del electrolito no se recuperan con algunas excepciones [9].

La pirometalúrgia incluye procesos de alta temperatura como la fundición para la refinación de metales y a hidrometalúrgia se basa en la lixiviación, normalmente a bajas temperaturas y ocurre en los pasos finales de la cadena de procesos debido a su capacidad para producir productos de alta calidad [9].

Procesos típicos de reciclaje son procesos pirometalúrgicos con posterior hidrometalúrgia y procesos mecánicos con posterior hidrometalúrgia. En general, en la literatura se refiere indistintamente como proceso pirometalúrgico a la ruta de reciclaje compuesta por procesos pirometalúrgicos con posterior hidrometalúrgia y como proceso hidrometalurgico a la ruta de reciclaje compuesta por procesos mecánicos con posterior hidrometalúrgia.

En el proceso pirometalúrgico con posterior hidrometalúrgia se logran altos rendimientos de Co, Ni y Cu ($> 95\%$). En general, el litio solo se recuperará en procesos dedicados, en los que se logra una concentración de litio en los residuos del proceso pirometalúrgico, conocidos como *slag*. Los componentes de aluminio y no metálicos (electrolito y grafito) se utilizan como combustible, sustituyendo fuentes de energía primaria. El Mn se reporta principalmente en el *slag*, que se puede utilizar como material de construcción o desecho.

Los procesos mecánicos con posterior hidrometalúrgia permiten la recuperación de más elementos y materiales, ya que ofrecen la posibilidad de recuperar grafito, Mn y litio fácilmente [9]. La etapa de procesamiento mecánico entrega como principal output el *black mass*, que contiene los materiales catódicos de interés. Luego estos materiales son separados en el proceso hidrometalúrgico. La bibliografía indica posibles tasas de recuperación del litio de alrededor del 90% [9].

En la figura 3.13, se muestran las principales plantas de reciclaje de baterías de litio, sus rutas de reciclaje y los materiales que recuperan.

Process	Feed	Pre-Processing	Mechanical Processing	Pyro	Hydro	Main Recoveries	Secondary Recoveries	Use of Main Recoveries	Use of Secondary Recoveries	Losses
Umicore ValEas™	LIB, NiMH	Dismantling	-	Shaft furnace	Leaching solvent extraction	Co, Ni, Cu, Fe CoCl ₂	Slag: Al, Si, Ca, Fe, Li, Mn, REE	Metal industry, cathode production	Construction industry	Electrolyte, plastics, graphite
Sumitomo-Sory	LIB	Sorting Dismantling	-	Calcination	Hydro	CoO	Co-Ni-Fe alloy Cu, Al, Fe	Battery industry	Metal industry	Electrolyte, plastics, Li, Ni, graphite
Retriev Technologies	LIB Primary Li	Dismantling	Wet comminution, screening, shaking table, filtration,	-	Precipitation	Li ₂ CO ₃ MeO	Steel Cu, Co, Al	Cathode production, metal industry	Metal industry	Plastic
Recupyl Valibat	LIB Primary Li	-	crushing, vibrating screen, secondary screen, magnetic separator, densimetric table,	-	Hydrolysis leaching	Li ₂ CO ₃ , Li ₂ CO ₃ , Li ₃ PO ₄	Steel Cu, Al Cu, MeO, C	Cathode Production.	Metal industry	Cu, graphite
Akkuser	LIB	Sorting	1st cutting, air filtration, cutting, magnetic separator	-	-	Co, Cu powder Fe	Non-ferrous metals	Various including metal industry	Metal industry	Plastic
Accurec	LIB	Sorting Dismantling	Milling, separation, agglomeration, filtration, ambient	Vacuum thermal treatment, reduction	H ₂ SO ₄	Li ₂ CO ₃ Co-Alloy	Metallic alloy	Production of cathode material	Metal recovery	Electrolyte, polymers, graphite
Battery Resources	LIB	Discharge	Shredding, magnetic separation, sieving, dense media, ambient	Sintering	Leaching by: NaOH, H ₂ O ₂ , H ₂ SO ₄ , and Na ₂ CO ₃	Li ₂ CO ₃ NMC(OH) ₂	Ferrous metals	Battery cell production	Metal industry	Electrolyte
LithoRec	LIB	Discharge Manual disassembly	Two-stage crushing, two-stage air classification; inert	Drying, calcination	Undisclosed leaching agent	Li ₂ CO ₃ metal oxides	Al-Cu, plastic fractions	Battery cell production	Metal industry	Electrolyte
OnTo	LIB Primary Li	Discharge Dismantling	Shredding, sieving, dense media separation; supercritical CO ₂	Present (undisclosed).	Leaching purification, dissolution	Refurbished cell cathode powder	Ferrous and non-ferrous metals	Battery cell production	Metal industry	Binder, graphite

Figura 3.13: Resumen de rutas de reciclaje de principales plantas [2].

En cuanto a la recuperación del litio, en la figura 3.14 se muestran algunas plantas que recuperan litio junto con sus principales características.

Process	Li Product	Recovery Method	Efficiency	Recovery Quality	Target Use of Recovery
Umicore	Not recovered	-	-	-	-
Sumitomo-Sony	Not recovered	-	-	-	-
Retriev Technologies	Li ₂ CO ₃	Precipitation with Na ₂ CO ₃ /CO ₂	90%	No data	Metal manufacture
Recupyl	Li ₂ CO ₃ /Li ₃ PO ₄	Precipitation with CO ₂	No Data	No data	Not discussed
Akkuser	Not recovered	-	-	-	-
Accurec	Li ₂ CO ₃	Precipitation	76-90%	>99%	Glass production/cathode synthesis
Battery Resources	Li ₂ CO ₃	Precipitation with Na ₂ CO ₃	67-80%	"High Purity"	Cathode powder synthesis
LithoRec	Li ₂ CO ₃ /LiOH	Precipitation	85-95%	No Data	Cathode powder synthesis
OnTo	Li ₂ CO ₃ /cathode	Undisclosed	Undisclosed	99%	Battery production

Figura 3.14: Resumen de recuperación de litio de algunas plantas de reciclaje [2].

Los ingresos del reciclaje provienen principalmente de Co y Ni, debido a sus precios de mercado, mientras que otros materiales son de menor importancia. En la figura 3.15 se muestran los precios promedio en 2019-2020.

Material	Price Average [US\$/t]	Quality
Al	1773	high grade primary
graphite (industrial use)	300-500	amorphous (<106 μm), 94-97%
graphite (battery applications)	2500-3000	large flakes (150-300 μm), >99%
Co	38,034	electrolytic, 99.8%
Cu	5965	grade A
Li ₂ CO ₃	11,900	min. 99-99.5%
Mn	1776	electrolytic, 99.7%
Ni	14,085	primary 99.8%

Figura 3.15: Precios promedio de materiales 2019-2020 [9].

Capítulo 4

Metodología

Como primera etapa se recopilará toda la información respecto a la regulación del reciclaje de LIB en los países donde están presentes los principales mercados de electro-movilidad, China, Europa y Estados Unidos.

En la segunda etapa se investigarán todos los procesos de reciclaje actuales y en estudios avanzados, resumiendo sus ventajas y desventajas.

En la tercera etapa se procederá a investigar sobre los principales agentes del mercado de reciclaje. Caracterizándolos según su ubicación geográfica, su capacidad de reciclaje (toneladas/año), tipo de proceso utilizado y material recuperado.

En la cuarta etapa se procederá a estimar el costo de producción y el volumen de LCE producido por reciclaje haciendo uso del modelo de reciclaje desarrollado (ver [modelo de reciclaje](#)).

Como quinta y última etapa, se procederá a estimar el impacto en el mercado primario en el mediano y largo plazo. Con esto dando por concluido el objetivo general de la memoria.

En la figura 4.1 se muestra un esquema de la metodología a seguir para caracterizar el mercado de reciclaje de baterías de litio y estimar su impacto en el mercado primario de litio.

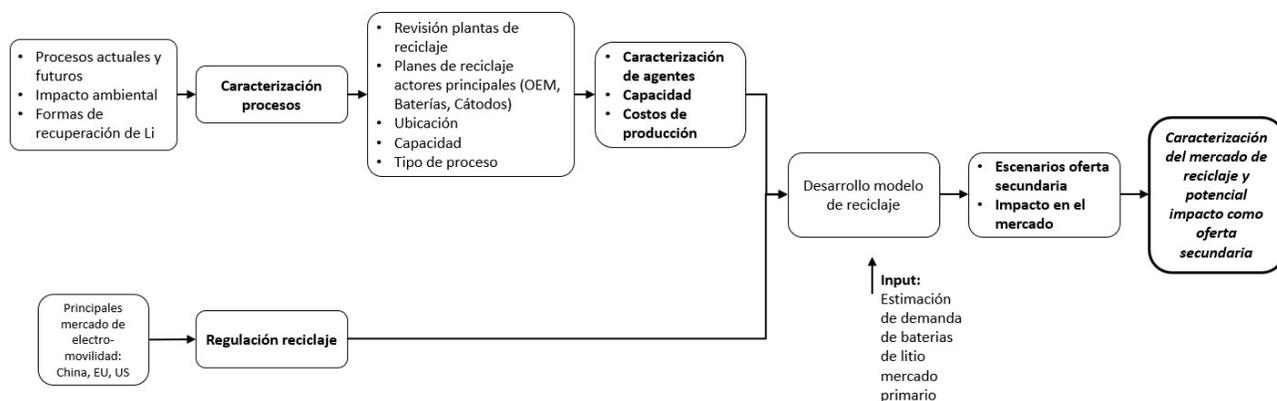


Figura 4.1: Esquema de metodología.

Capítulo 5

Desarrollo

5.1. Legislación

En esta sección se muestra la información recopilada respecto a la legislación del reciclaje de LIB en los principales mercado de electro-movilidad.

5.1.1. China

En los documentos “Aviso multidepartamental sobre la organización y realización del trabajo piloto para el reciclaje y utilización de baterías de potencia para vehículos de nueva energía” [18] y “Aviso de siete departamentos sobre cómo hacer un buen trabajo en el trabajo piloto de reciclaje y uso de baterías eléctricas de vehículos de nueva energía” [19] se establece que se deberá desarrollar un sistema completo de reciclaje de baterías mediante un modelo de cooperación empresarial promoviendo que las compañías de producción de EV tengan responsabilidad extendida de la batería, estableciendo puntos de recolección.

Finalmente en el documento “Normas y condiciones de la industria para la utilización integral de baterías de energía residual para vehículos de nueva energía (edición de 2019)” [20] se imponen tasas mínimas de recuperación para los elementos contenidos en las LIB; para el níquel, cobalto y manganeso no debe ser inferior al 98 %, para el litio debe ser mayor al 85 % y para otros metales valiosos no debe ser inferior al 97 %.

5.1.2. Europa

En Europa, la actual directiva de baterías de la Unión Europea se remonta a 2006 [21] en donde se impuso como meta tener una tasa de recolección del 45 % al 26 de septiembre de 2016, la cual fue parcialmente cumplida, sin embargo en la actualidad es cumplida por la mayoría de los países que conforman la Unión Europea [22].

Por otro lado, debido a la antigüedad de la normativa fue necesario implementar una nueva actualización. Por esto, la comisión propuso un nuevo Reglamento sobre baterías el 10 de diciembre de 2020 [22]. Este reglamento tiene como objetivo garantizar que las baterías comercializadas en la UE sean sostenibles y seguras durante todo su ciclo de vida.

La Comisión propone responsabilidad extendida de la batería para el fabricante de la batería y para el caso del fabricante del vehículo eléctrico, este sería el responsable de su correcta

gestión. Además se establece un marco para la reutilización de baterías de vehículos industriales y eléctricos para una segunda vida, por ejemplo, facilitando que la batería usada del EV pueda seguir utilizándose para el almacenamiento de energía estacionaria.

En cuanto a metas específicas se propone lo siguiente:

1. **Eficiencias de reciclaje:**

A más tardar el 1 de enero de 2025, los procesos de reciclaje deberán lograr una eficiencia mínima del 65 % en peso de la LIB [23].

A más tardar el 1 de enero de 2030, los procesos de reciclado deberán alcanzar una eficiencia mínima del 70 % en peso de la LIB [23].

2. **Tasa de recuperación de materiales:**

A más tardar el 1 de enero de 2026, todos los procesos de reciclaje deberán alcanzar los siguientes niveles de recuperación de materiales [23]:

- 90 % para cobalto.
- 90 % para cobre.
- 35 % para litio.
- 90 % para níquel.

A más tardar el 1 de enero de 2030, todos los procesos de reciclado alcanzarán los siguientes niveles de recuperación de materiales [23]:

- 95 % para cobalto.
- 95 % para cobre.
- 70 % para litio.

3. **Tasas de recolección:** Se propone incrementar el objetivo de tasa recolección para baterías portátiles de la tasa actual del 45 % al 65 % en 2025 y al 70 % en 2030. Para baterías de EV e industriales el 100 % deberá ser recolectado en 2030 [22].

4. **Contenido de material reciclado:** A partir del 1 de enero de 2027, las baterías de EV deberán declarar el contenido de cobalto, litio y níquel reciclado que contienen. A partir del 1 de enero de 2030, estas baterías deberán contener niveles mínimos de contenido reciclado, 12 % de cobalto, 4 % de litio y 4 % de níquel. A partir del 1 de enero de 2035, estos niveles se incrementarían aún más, 20 % de cobalto, 10 % de litio y 12 % de níquel [22].

5.1.3. Estados Unidos

Dentro de la legislación vigente de US se encuentra la “Ley de gestión de baterías recargables que contienen mercurio” de 1996 [24], esta ley facilita el aumento de la recolección y el reciclaje de baterías níquel-cadmio y de ciertas pequeñas baterías recargables selladas de plomo-ácido. La ley de baterías aborda los fabricantes de baterías y los manipuladores

de desechos de baterías, pero no a los consumidores. Los consumidores no están obligados a gestionar sus baterías como residuos universales, pero se les recomienda encarecidamente que las lleven a zonas de recolección.

Otras legislaciones identificadas fueron la Ley HB 1364 [25], Ley SB 5457 [26], Legislación de Minnesota [27] y Legislación de California [28], las cuales hablan básicamente sobre la responsabilidad extendida del fabricante, refiriéndose a que deben participar en programas de gestión de baterías.

La propuesta más actual en los que respecta a reciclaje de baterías es la propuesta de ley, **Ley de reciclaje de baterías y minerales críticos de 2020** [29], esta ley propone lo siguiente:

- Desarrollar métodos para promocionar el diseño y la producción de baterías que tengan en cuenta y faciliten el desmantelamiento, reutilización, recuperación y reciclaje de componentes y materiales de la batería.
- Generar estrategias para aumentar la aceptación y la participación de los consumidores en el reciclado de baterías.
- La integración de cantidades mayores de minerales críticos reciclados en baterías y otros productos para desarrollar mercados para materiales de baterías recicladas y minerales críticos.
- Promoverá la colaboración entre los fabricantes de baterías de vehículos, otros fabricantes de baterías, los recicladores de baterías, los recolectores, refinadores y los minoristas.
- **Premio de reciclaje de baterías de litio:** Se llevaran a cabo concursos para procesos de reciclaje de baterías de litio. Habrá una financiación de 10.000.000 de dólares para proyectos piloto.

5.2. Procesos de reciclaje

5.2.1. Vista general

El proceso de reciclaje de baterías de litio generalmente necesita dos procesos: **procesos físicos** y **procesos químicos**. Esto debido al complejo montaje de las baterías de litio y a la diversidad de los materiales del cátodo [30].

Los **procesos físicos** o **tratamientos mecánicos** incluyen desmantelamiento, descarga, trituración, cribado, separación magnética, lavado, pre-tratamiento térmico, etc.

La etapa de tratamiento mecánico tiene como objetivo separar componentes y materiales de acuerdo con diferentes propiedades físicas, como forma, densidad, conductividad, propiedad magnética, etc. Con la ayuda de esta etapa, los componentes, materiales y desechos metálicos con propiedades físicas similares se pueden separar con lo que resulta en una mejor tasa de recuperación y una reducción del consumo de energía de los siguientes procesos, ya sea pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos. Adicionalmente, dentro de los procesos físicos, existe un proceso en particular que permite la recuperación de los materiales de los electrodos sin

productos químicos de por medio, denominado **reciclaje directo**, el cual aun esta en estado de desarrollo a nivel de laboratorio [30] [31].

Los **procesos químicos** están compuestos por **procesos pirometalúrgicos** caracterizados por el uso de fundición a altas temperaturas y **procesos hidrometalúrgicos**, en los que la lixiviación, separación, extracción y precipitación química/electroquímica suelen estar implicados [30].

En la figura 5.1 se muestra un esquema general de las rutas de reciclaje que puede seguir una batería de litio.

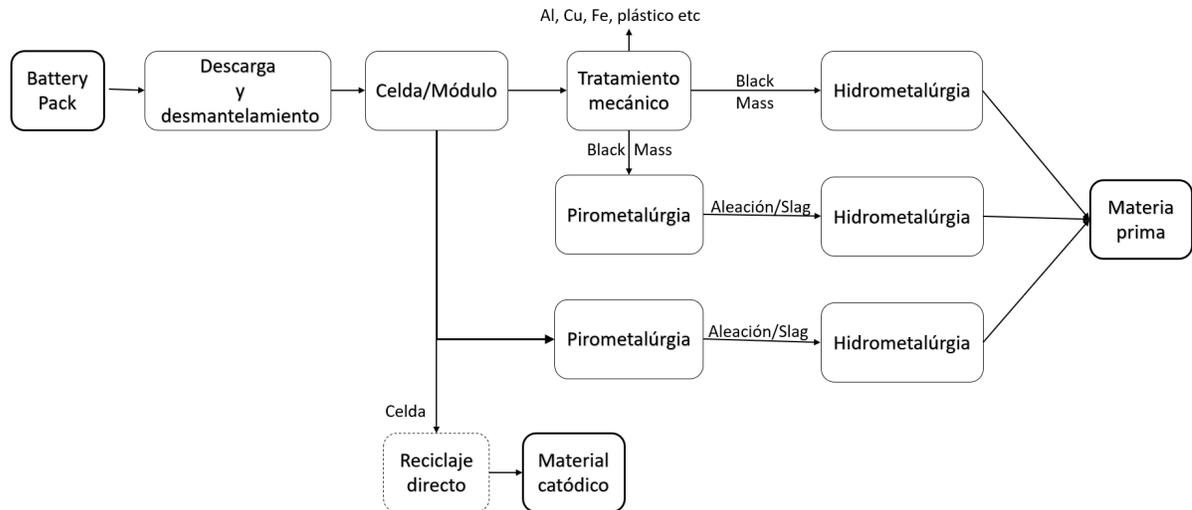


Figura 5.1: Rutas de reciclaje - Fuente de elaboración propia en base a [30] [31].

A continuación se explica cada etapa de la ruta de reciclaje.

5.2.2. Etapa de tratamiento mecánico

Los tratamientos mecánicos se utilizan generalmente en las primeras etapas del ciclo de reciclaje. Estos procesos son una parte extremadamente importante del circuito de reciclaje, ya que los beneficios son menores costos de operación, materias primas de mayor pureza y mayor seguridad para los trabajadores [1].

Este proceso puede ahorrar consumo de energía, la necesidad de equipo adicional, y por tanto reducir las emisiones de CO₂.

Primero se estabiliza el pack de baterías para que sea seguro, luego se desmontan a nivel de modulo/celda y posteriormente se trituran (estrictamente necesario para hidrometalúrgia). En el proceso físico de separación los productos obtenidos son el material del separador, carcasa de acero, colector de corriente de Al y Cu, y el *Black Mass*.

El *Black Mass* esta compuesto principalmente por los materiales de los revestimientos de los electrodos, Li, Ni, Mn, Co y grafito. Los colectores de corriente, Cu y Al, también se pueden encontrar dentro de esta masa, y su concentración variará dependiendo de las condi-

ciones de conminución. Los colectores de corriente deben ser retirados del *Black Mass* antes de la extracción hidrometalúrgica, a fin de maximizar la eficiencia.

En la figura 5.2 se muestra un esquema del tratamiento mecánico.

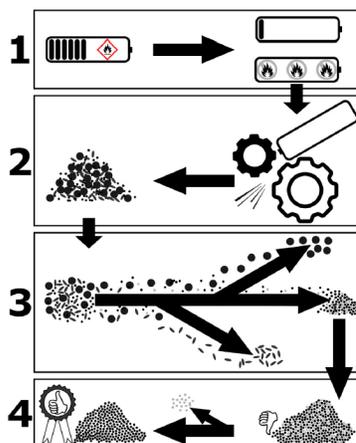


Figura 5.2: Diagrama del proceso de tratamiento mecánico de LIB: 1. Estabilización, 2. Conminución, 3. Separación física, 4. Purificación de la masa negra [1].

5.2.3. Etapa de pirometalurgia

La pirometalurgia incluye procesos de alta temperatura como la fundición para la refinación de metales [9].

En este proceso, el único pre-tratamiento es un simple desmantelamiento de grandes packs de baterías a módulos/celdas individuales. Luego, los módulos/celdas de la batería se introducen en un horno con tres zonas de temperaturas distintas, llamada zona de precalentamiento, zona de pirolización de plásticos y zona de fundición y reducción [32].

En la zona de precalentamiento, los baterías se calientan a una temperatura inferior a 300 °C para liberar el vapor de electrolito sin explosión. En la zona de pirolización de plásticos es operada a 700 °C, con el objetivo de incinerar los componentes plásticos de la batería para mantener la temperatura y reducir el consumo de energía en la etapa de fundición. En la última zona se funden los materiales a 1450 °C y se obtienen aleaciones de cobre, cobalto, níquel y hierro, junto con la formación de *slag* que contiene litio, aluminio, silicio, calcio y una parte de hierro [32].

En la figura 5.3 se muestra un diagrama del proceso metalúrgico y en la tabla 5.1 se muestran sus ventajas y desventajas.

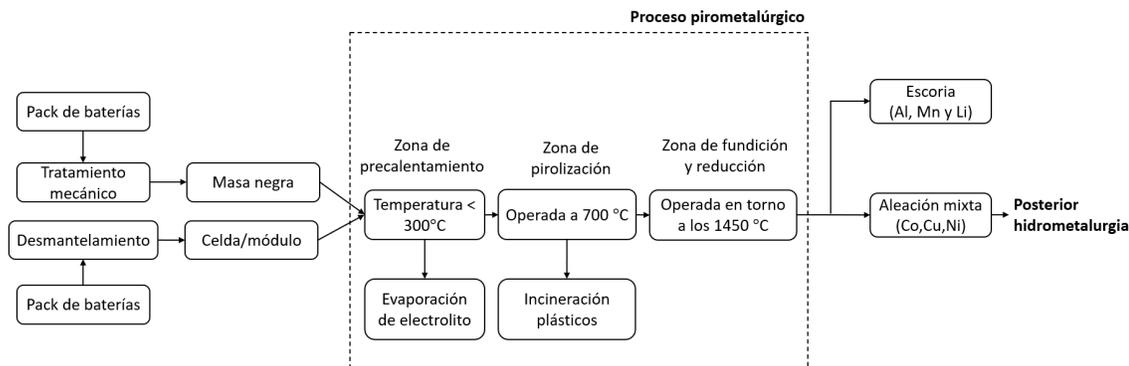


Figura 5.3: Diagrama proceso pirometalúrgico - Fuente de elaboración propia en base a [9][30][31][32].

Tabla 5.1: Ventajas y desventajas proceso pirometalúrgico Fuente de elaboración propia en base a [9][30][31][32].

Ventajas	Desventajas
Proceso altamente efectivo para recuperar níquel, cobalto y cobre (rendimiento >95 %).	Proceso de fundición deja en la escoria el litio, manganeso y aluminio.
El proceso puede admitir más de una química simultáneamente, lo que genera economías de escala y una logística simplificada.	Baja tasa de recuperación, se pierden muchos productos químicos de la batería (Tasa de reciclaje del 50 % del módulo/celda).
Puede no necesitar descarga ni trituración de las celdas/módulos.	Solo es rentable para baterías con alta concentración de Co y Ni.
Proceso maduro que existe a escala industrial y ya es usado actualmente.	Intensivo en el uso de energía.
	Se debe reprocesar la aleación mixta de salida.
	Limpieza de gas es necesario para evitar la liberación de sustancias tóxicas.

5.2.4. Etapa de hidrometalúrgia

La hidrometalúrgia se basa en la lixiviación, normalmente a bajas temperaturas y ocurre en los pasos finales de la cadena de procesos debido a su capacidad para producir productos de alta calidad [9].

Los procesos hidrometalúrgicos incluyen tres pasos principales. El primero es la lixiviación, que describe la disolución de los metales, en la mayoría de los casos con la ayuda de un ácido, base o sal.

El segundo paso es la purificación, que separa los metales mediante reacciones químicas selectivas. Por ejemplo, intercambio iónico, precipitación y reacciones líquido-líquido.

En el último paso, los metales de interés deben recuperarse de la solución como un producto sólido, es decir, un metal, una sal metálica o un compuesto, por cristalización, precipitación iónica, reducción con gas reducción electroquímica o reducción electrolítica [9].

En la figura 5.5 se muestra un diagrama del proceso hidrometalúrgico y en la tabla 5.2 se muestran sus ventajas y desventajas.

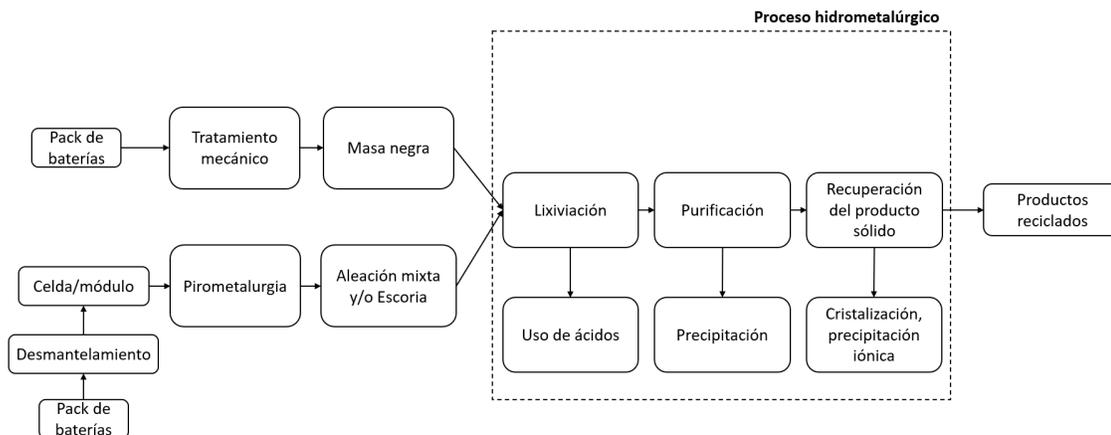


Figura 5.4: Diagrama proceso hidrometalúrgico - Fuente de elaboración propia en base a [9][30][31][32].

Tabla 5.2: Ventajas y desventajas proceso hidrometalúrgico - Fuente de elaboración propia en base a [9][30][31][32].

Ventajas	Desventajas
Alta variedad de productos recuperados con alta eficiencia (>95%) para Li, Ni, Co, Mn.	Ventajas ambientales se ven mermadas por el uso de agua caliente, ácidos y solventes.
Alta pureza de productos, litio puede alcanzar purezas del 99,9%.	Las celdas/módulos deben ser trituradas.
Recupera más del 80% del material contenido en la celda/módulo.	Solo es rentable para baterías que contienen alta concentración de Co y Ni.
Eficiencia energética en comparación a pirometalurgia.	Proceso es específico para una química en particular las baterías deben ser clasificadas.
No tiene emisiones atmosféricas directas.	
El proceso químico maduro por uso en industria minera.	

5.2.5. Reciclaje directo

El proceso de reciclaje directo consiste en recuperar componentes de baterías sin procesos que impliquen tratamientos químicos complicados manteniendo en todo momento la estructura química del material catódico [30] [33]. Las baterías se descargan y son desmontadas a nivel de celda. Posteriormente, las celdas se tratan con CO_2 supercrítico (condiciones tales que el CO_2 se encuentra con propiedades intermedias entre líquido y gas) para extraer el electrolito.

Luego el CO_2 puede ser separado del electrolito después de que la temperatura y la presión son reducidos. Con esto el electrolito se puede reutilizar nuevamente en la fabricación de baterías [30].

Las celdas que ya carecen de electrolito, son trituradas. Después de eso, los componentes de la celda son separados mediante procesos mecánicos. Posteriormente, los materiales del cátodo se aíslan y se introducen a un proceso de “Relitiación” (inserción de litio en el material de cátodo bajo ciertas condiciones de presión y temperatura), para posteriormente ser reutilizados [30].

Un proceso típico de reciclaje directo puede ilustrarse mediante la figura 5.5 y en la tabla 5.3 se muestran sus ventajas y desventajas.

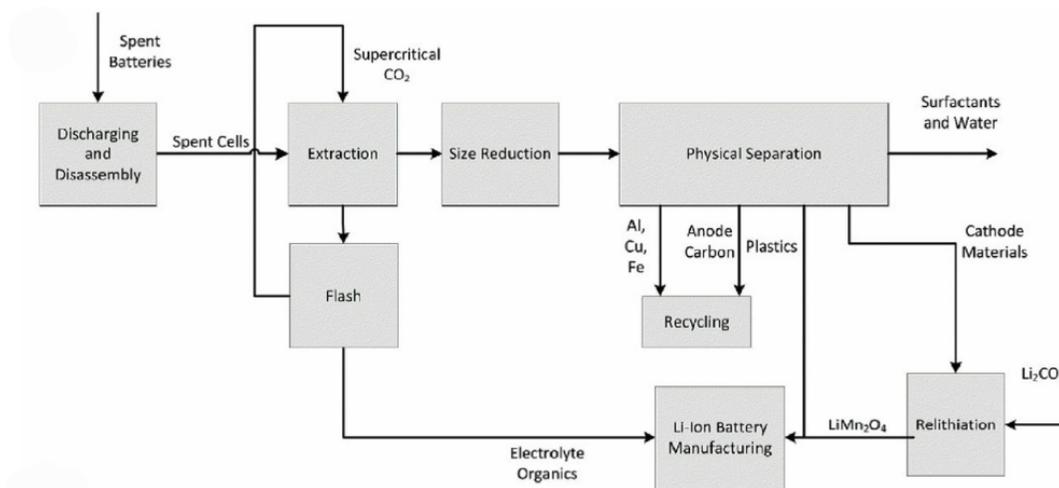


Figura 5.5: Proceso de reciclaje directo para baterías LMO [30].

Tabla 5.3: Ventajas y desventajas proceso de reciclaje directo - Fuente de elaboración propia en base a [9][30][31][32][33].

Ventajas	Desventajas
Rentabilidad para baterías con baja concentración en Co y Ni, como LFP y LMO.	El material recuperado puede no funcionar como un material virgen.
Reciclaje directo es equivalente a una reutilización, implicando menores costos e impactos ambientales.	No admite químicas distintas simultáneamente. Se necesita clasificación.
Proceso no depende del volumen como en hidrometalurgia o pirometalurgia, pudiendo ser posible tener plantas de este tipo en ciudades.	El proceso puede ser difícil de escalar en cuanto al desmontaje a nivel de celda.
	Es necesaria trituración de la celda.
	Proceso aun en estado de desarrollo.

5.2.6. Comparación impacto ambiental

Con respecto a la evaluación de impacto ambiental, los estudios disponibles indican resultados positivos del reciclaje de LIB en comparación con la producción primaria en la mayoría de las químicas, siendo la batería LFP la excepción, esto se puede apreciar en la figura 5.6.

Adicionalmente se puede observar de la figura 5.6 que procesos pirometalúrgicos son los que poseen mayores impactos ambientales, seguido de procesos hidrometalúrgicos. Respecto al proceso de reciclaje directo, se puede observar en la figura 5.7 que el reciclaje directo posee

posee grandes ventajas ambientales para el caso particular de una batería LFP. Sin embargo, los resultados se basan en datos de procesos a escala piloto o de laboratorio y necesitan verificación a escala industrial.

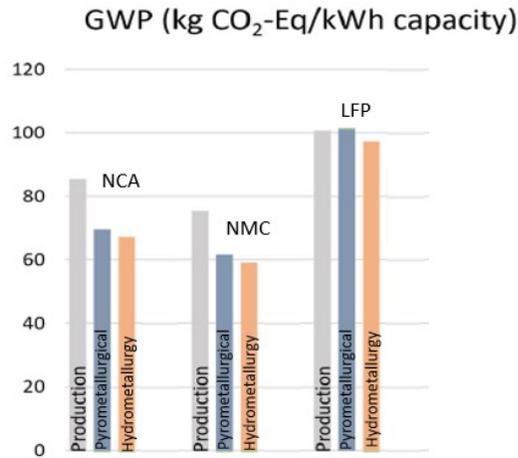


Figura 5.6: Emisiones de CO_2 por ruta de reciclaje [31].

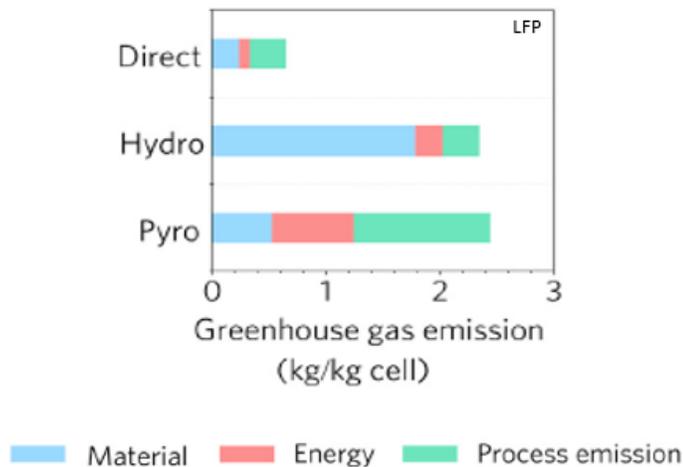


Figura 5.7: Emisiones de CO_2 por ruta de reciclaje [33].

Finalmente para las rutas comerciales se puede mencionar que durante el procesamiento mecánico, el control del polvo es de suma importancia para manejar polvos cancerígenos. En la etapa pirometalúrgica, al ser procesos de alta temperatura se debe tener especial cuidado en los gases emitidos en esta etapa. Y en la etapa hidrometalúrgica, se debe tener en cuenta el alto riesgo de agua con residuos de Ni y Co [9].

5.2.7. Comparación costos de reciclaje

En lo que respecta a costos de reciclaje, para el caso de una batería NMC111, en la figura 5.8 se observa que el proceso pirometalúrgico es el más costoso, seguido del reciclaje directo, siendo el proceso hidrometalúrgico el más económico. Por otro lado, para el caso particular

de una batería LFP, en términos de rentabilidad, se observa de la figura 5.9 que solamente el reciclaje directo es rentable debido a que recuperará prácticamente todo el material catódico de la batería.

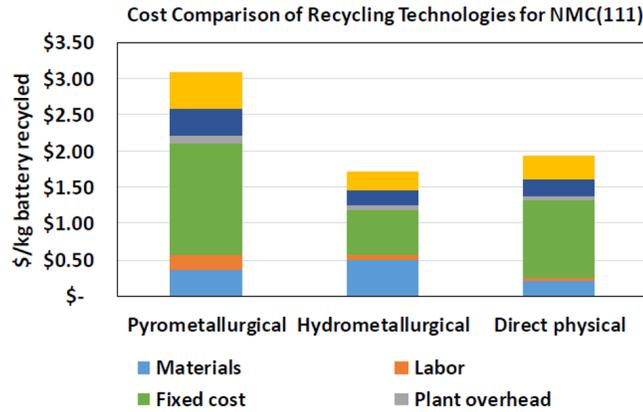


Figura 5.8: Comparación costos de reciclaje para una batería NMC111 según ruta [34].

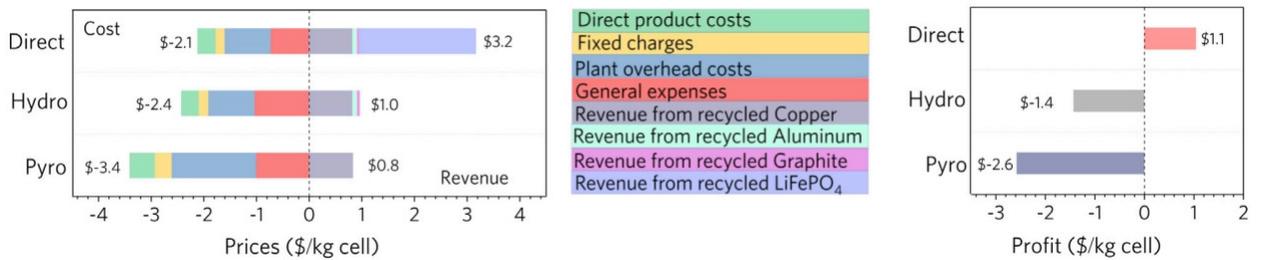


Figura 5.9: Comparación costos de reciclaje para una batería LFP según ruta [33].

5.3. Revisión de empresas

De acuerdo a “*Circular Energy Storage*” consultora con sede en Londres centrada en la gestión del ciclo de vida LIB, se estima que hay alrededor de 100 empresas o proyectos de reciclaje en el mundo. En la revisión de empresas, se lograron encontrar 62, de las cuales 54 tenían cierto grado de información pública. En la figura 5.10 se muestran un resumen estadístico de las principales características de una planta de reciclaje.

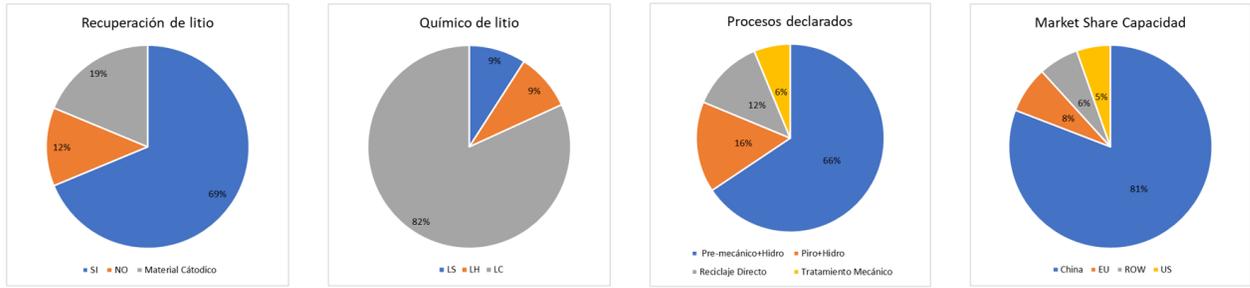


Figura 5.10: Resumen revisión de empresas.

De la revisión se concluye que existe una tendencia a recuperar litio en su forma de Carbonato de litio y a utilizar proceso hidrometalúrgicos. Además se observa que prácticamente toda la capacidad de reciclaje de baterías esta concentrada en China.

5.4. Costo de producción de litio

Para estimar el costo de producción de litio a partir de reciclaje se usa como base la estructura de costos declarada por “*Neometals*” [35], compañía reconocida en el rubro de extracción de minerales. En la tabla 5.4 se muestra el resumen de su estructura de costos.

Tabla 5.4: Resumen información declarada “*Neometals*” [35].

Capacidad [Toneladas/año]	CAPEX [MUSD]	OPEX [MUSD/año]
18.263	66	53,6

Lo que se pretende corroborar es que solamente distribuyendo los costos de reciclaje entre Cobalto, Níquel y Cobre se alcanzan a cubrir los costos de reciclaje, siendo el litio un subproducto del proceso de reciclaje. Los precios de mercado considerados se muestran en la tabla 5.5:

Tabla 5.5: Precios de mercado [35].

Químico	US/kg
$CoSO_4$	11
$NiSO_4$	4,2
$CuSO_4$	2,0

Para la estimación se considera que el OPEX declarado esta asociado al reciclaje de baterías NMC622, las que tienen y tendrán mayor concentración de mercado según la figura 3.6.

Los elementos recuperados son Li_2SO_4 , $CoSO_4$, $NiSO_4$ y $CuSO_4$ y para considerar la cantidad de elementos recuperados de litio, cobalto y Níquel se consideran las densidades energéticas y de materia de las tablas 3.1 y 3.2 respectivamente. Para el cobre se considera directamente la cantidad de material que se esperada extraer según “*Neometals*”, debido a que no se cuenta con la información para este caso, siendo 5.635 toneladas de $CuSO_4$ [35].

En la tabla 5.6 se muestran las tasas de recuperación del cobalto, níquel y litio:

Tabla 5.6: Tasas de recuperación.

Elemento químico	Tasas de recuperación
Cobalto	88 %
Níquel	88 %
Litio	70 %

El primer paso, es determinar la cantidad de kwh reciclados. Para esto se multiplican la densidad energética de NMC622 de la tabla 3.1 por la capacidad de reciclaje anual de la tabla 5.4. Este resultado se muestra en la tabla 5.7.

Tabla 5.7: kwh reciclados.

	kwh reciclados
NMC622	4554792,2

Posteriormente usamos las densidades en kg/kwh de la tabla 3.2, multiplicando dichos valores por los kwh reciclados de la tabla 5.7 y las eficiencias de la tabla 5.6, obteniéndose la masa en kg de los materiales extraídos. Esto se puede apreciar en la tabla 5.8:

Tabla 5.8: Elementos reciclados en kg.

	Li [kg]	Co [kg]	Ni [kg]
NMC622	1.822.782,3	3.495.916,5	9.806.666,8

Ahora se procede a descontar del OPEX los ingresos anuales por venta de cobre, siendo el costo de la tonelada de sulfato de cobre de 2000 US según la tabla 5.5, obteniéndose 11,27 MUSD, luego el OPEX descontando ingresos por cobre es de 42,33 MUSD.

Finalmente para corroborar la rentabilidad, se obtienen los costos de Cobalto y Níquel por kg, distribuyendo de forma equitativa el OPEX restante. Esto quiere decir que el costo total de kg reciclados para cobalto o Níquel corresponde a la mitad de 42,33 MUSD. Los resultados del costo por kg se muestran en la tabla 5.9.

Tabla 5.9: Costo de producción Cobalto y Níquel.

Co [US/kg]	Ni [US/kg]
6,05	2,16

Como se puede apreciar en la tabla 5.9, los costos de producción son menores a los precios de mercado de la tabla 5.5, por lo que se concluye que el negocio de reciclaje es rentable y además se puede considerar que el costo de producción de sulfato de litio es 0. Sin embargo,

en general el litio se transa en su forma de carbonato de litio (LCE), por lo que se considera el costo de transformación de sulfato a carbonato, el cual es de 1,2 US/kg. Finalmente, el costo de producción de LCE es de 1,2 US/kg.

5.5. Estimación de la oferta secundaria

El **modelo de reciclaje** que se utilizó para estimar la producción secundaria de litio se puede esquematizar en la figura 5.11.

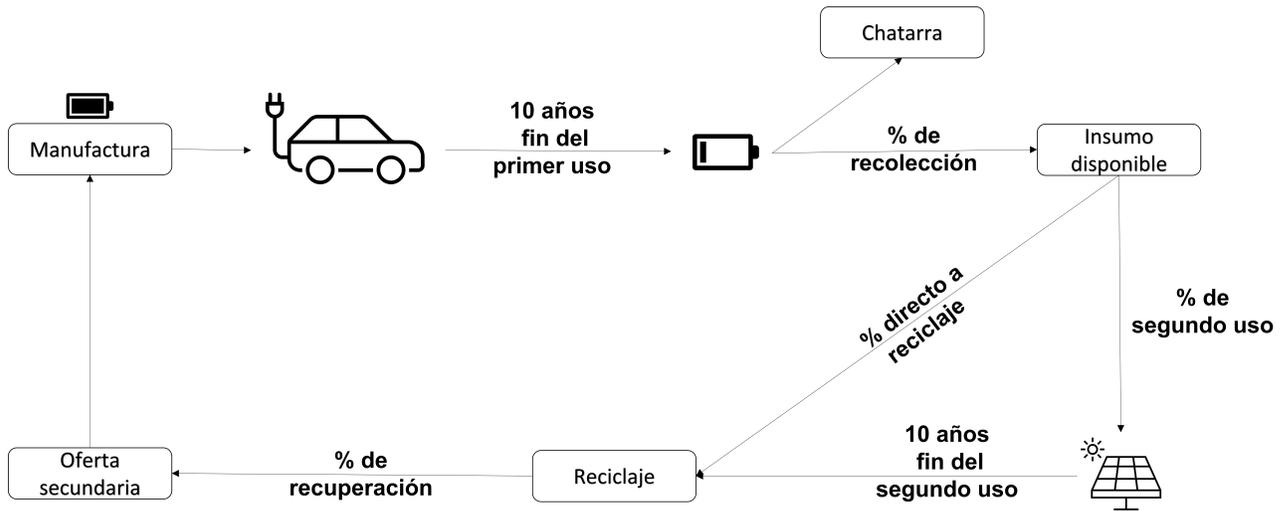


Figura 5.11: Esquema modelo de reciclaje - Fuente de elaboración propia.

La dinámica consiste en que luego de 10 años como valor esperado, para el caso de un *EV*, la vida útil de la batería concluye, esto debido a que no es capaz de rendir la misma cantidad de kilómetros recorridos en comparación a una batería nueva, entre otros motivos. Estas baterías son retiradas del vehículo eléctrico, donde algunas de ellas no serán debidamente tratadas por lo que irían directamente a los vertederos de las ciudades (lamentablemente). Por otro lado, habrá otra porción de baterías que si serían debidamente recolectadas.

De las baterías recolectadas, habrá una porción que no estará lo suficientemente deteriorada como para ser directamente desmantelada y reciclada, por lo que se les dará una vida de segundo uso. Un ejemplo típico son sistemas de almacenamiento de energía eléctrica generada por energía solar en sectores rurales.

Por otro lado, la porción restante de las baterías recolectadas estarán deterioradas, por lo que pasarían directamente al proceso de reciclaje. Finalmente, considerando una tasa de recuperación del 90 % de litio, este producto recuperado se reinsertaría en el mercado de litio para uso de baterías LIB.

Por lo mencionado anteriormente, el modelo estará determinado por la vida útil y tasas de recolección de *EV*, *E-bike*, *ESS*, *Electronics* y *Others*, y además por las tasas de segundo y vida útil de segundo de *EV*. Es importante destacar que para las tasas de recolección y de segundo uso, los supuestos son las tasas de 2020 y 2030, suponiendo un crecimiento lineal durante dicho periodo.

Es importante generar escenarios de la proyección para poder entregar intervalos de confianza que capturen la incertidumbre de la estimación. Para esto se consideran los escenarios, esperado, optimista y pesimista de la estimación de reciclaje, los cuales están compuestos a su vez por diferentes escenarios de cada variable que determina el modelo de reciclaje. Estos escenarios fueron determinados a partir del la regulación de los mercados principales de Electro-movilidad (capítulo 5.1), *Webinars Online* e información del equipo SQM.

Tabla 5.10: Escenarios vida útil.

Años vida útil	Esperado	Optimista	Pesimista
EV	10	15	8
E-bike	4	4	4
Energy Storage	10	10	10
Electronics	4	4	4
Others	4	4	4

Tabla 5.11: Escenarios tasas de recolección *EV*.

Tasas de recolección	2020 Esperado	2030 Esperado	2020 Optimista	2030 Optimista	2020 Pesimista	2030 Pesimista
CH	60 %	90 %	70 %	99 %	25 %	70 %
EU	55 %	80 %	65 %	95 %	45 %	60 %
USA	45 %	65 %	55 %	80 %	5 %	45 %
ROW	40 %	50 %	50 %	60 %	5 %	30 %

Tabla 5.12: Escenarios tasas de segundo uso.

	2020 Esperado	2030 Esperado	2020 Optimista	2030 Optimista	2020 Pesimista	2030 Pesimista
Tasas de segundo uso	20 %	20 %	50 %	60 %	10 %	10 %

Tabla 5.13: Escenarios vida útil de segundo uso.

	Esperado	Optimista	Pesimista
Vida útil segundo uso	8	10	5

En la figura 5.12 se muestra el escenario esperado para la oferta secundaria de litio y la oferta de segundo uso de baterías en su equivalencia en litio. Esto último es relevante para la definición de precios de mercado, debido a que una porción de la demanda de baterías de litio termina siendo abastecida por este segundo uso.

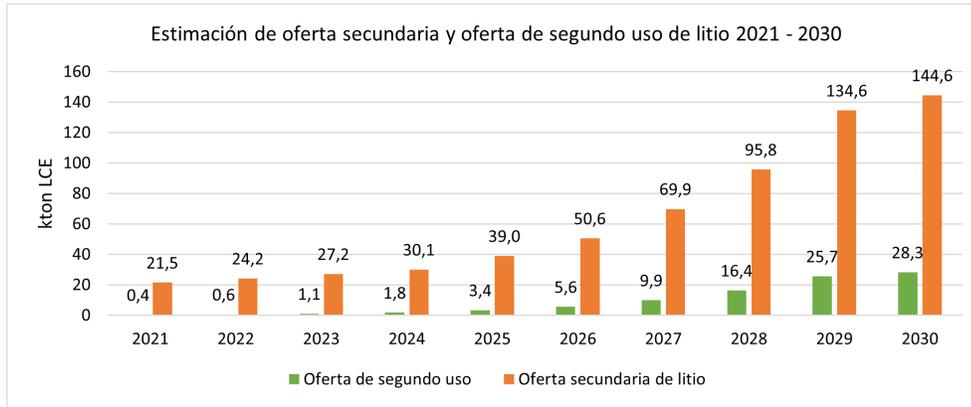


Figura 5.12: Estimación oferta secundaria y oferta de segundo de uso.

De la figura 5.12 y la tabla 3.7 se concluye que a 2025 y 2030 el 5% y 9% de la demanda será abastecida por reciclaje, considerando sus dos efectos en el mercado, oferta secundaria y oferta de segundo uso.

5.5.1. Escenarios estimados

Para dar una estimación más robusta se considera adicionalmente un escenario optimista y otro pesimista en términos de la oferta secundaria. El escenario optimista de reciclaje está conformado por el escenario optimista de tasas de recolección y los escenarios pesimistas de vida útil de la batería, vida de segundo uso y tasas de segundo uso. Por otro lado, el escenario pesimista de reciclaje está dado por el escenario pesimista de tasas de recolección y los escenarios optimistas de vida útil de la batería, vida de segundo uso y tasas de segundo uso. A continuación en la figura 5.13 y 5.14 se muestran los escenarios para la oferta secundaria y oferta de segundo uso.

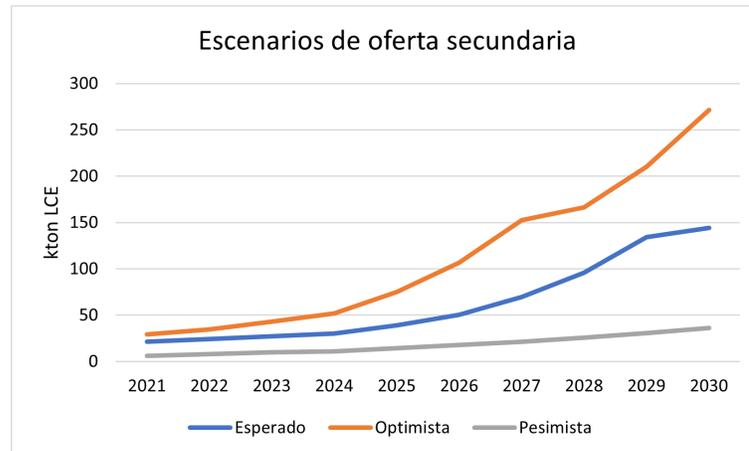


Figura 5.13: Escenarios oferta secundaria.

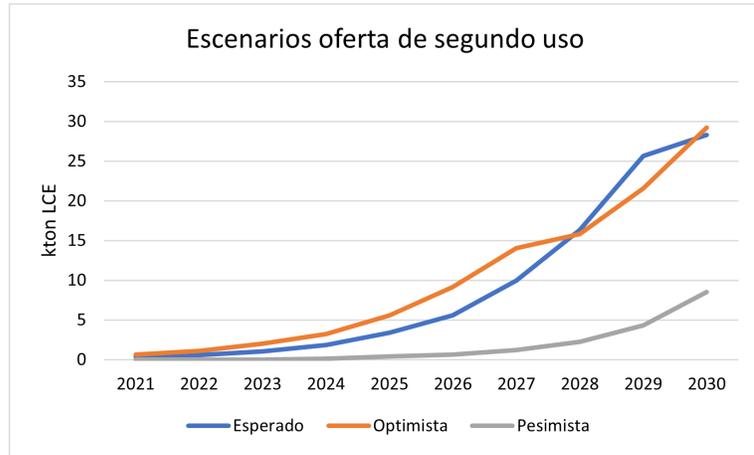


Figura 5.14: Escenarios oferta de segundo uso.

5.5.2. Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad se variaron los escenarios de una variable en particular, considerando el caso optimista y pesimista, comparándolo con el escenario esperado para ver el efecto que tiene cada variable en la variación de la estimación. A continuación se muestran las variaciones de cada variable en comparación al escenario esperado.

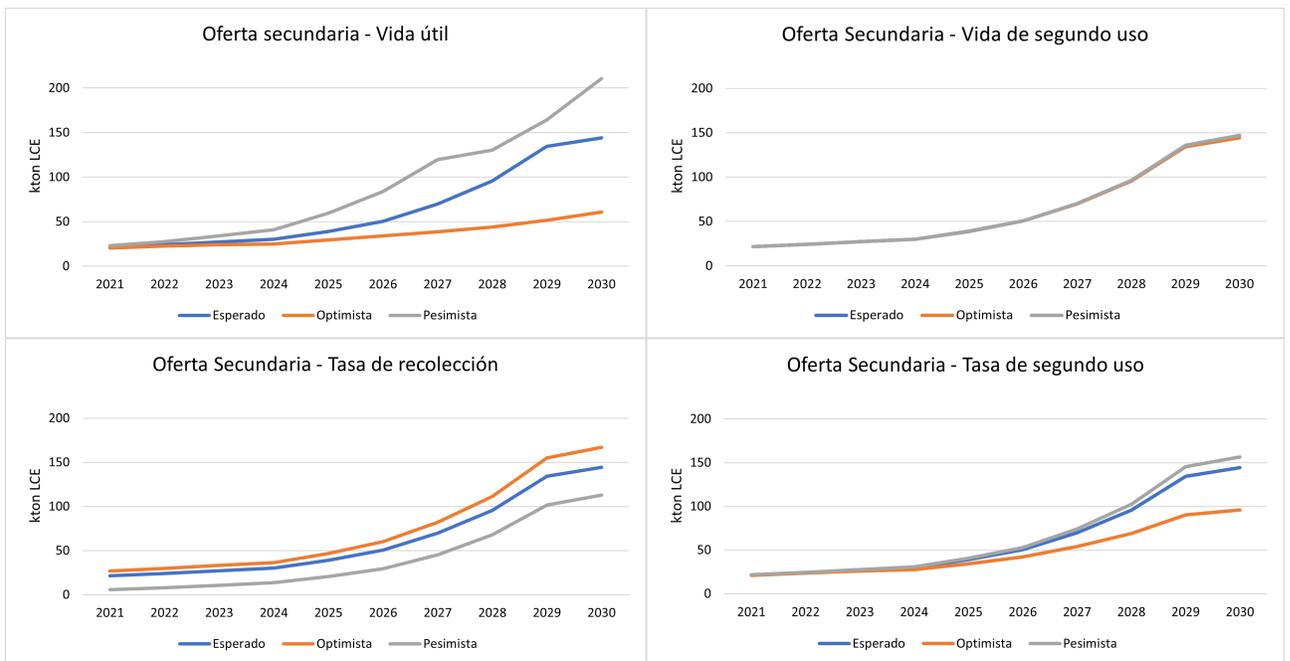


Figura 5.15: Sensibilidad de variables que definen modelo de reciclaje.

A partir de la figura 5.15 se observa que el modelo es altamente sensible a la vida útil de la batería, moderadamente sensible a las tasas de recolección y tasas de segundo uso. Además se observa que el modelo es prácticamente insensible a la vida útil de segundo uso para el horizonte temporal en estudio.

5.6. Impacto en el mercado primario

Para estimar los efectos del reciclaje en el mercado primario, se consideran los equilibrios de mercado en el mediano y largo plazo, definidos en este caso como 2025 y 2030 respectivamente. En la figura 5.16 se observa a modo de esquematización el equilibrio de mercado estimado con reciclaje en 2030.

Como se ha mencionado anteriormente, el impacto del reciclaje afecta de dos formas al mercado primario, la principal es por la oferta secundaria generada directamente por el reciclaje, oferta que es agregada a la curva de costos como se puede apreciar en la figura 5.16. Por otro lado, el efecto de la oferta de segundo uso es considerada al restarle a la demanda la oferta de segundo uso. Finalmente ambos efectos conjuntos terminan por disminuir los precios de equilibrio de mercado.



Figura 5.16: Equilibrio de mercado con reciclaje.

Para estimar los efectos de una manera más robusta, se consideran distintos escenarios de curvas de costos y demandas de litio estimadas por diferentes entidades. Para estimar el efecto en el mediano plazo, se cuenta con las estimaciones realizadas por *Mckinsey*, *Benchmark*, *Deutsche Bank*, *CRU* y *SQM*. Sin embargo, para estimar el efecto en el largo plazo solo se cuenta con las estimaciones de *SQM*. Las estimaciones de demanda se pueden observar en la figura 3.7 y las curvas de costos estimadas por *Mckinsey*, *Benchmark*, *Deutsche Bank*, *CRU* y *SQM* se pueden encontrar en el Anexo.

En la tabla 5.14 y 5.15 se muestran los escenarios de las variaciones porcentuales del equilibrio de mercado en el mediano y largo. Para efectos de entrega de resultados se consideran los impactos promedio de los escenarios esperados.

Tabla 5.14: Escenarios de variación porcentual del precio de mercado del litio en 2025.

2025	SQM	Benchmark	CRU	Deutsche Bank	Mckinsey	Promedio
Esperado	0 %	-22 %	-3 %	-5 %	0 %	-6 %
Optimista	-1 %	-30 %	-3 %	-8 %	-3 %	-9 %
Pesimista	0 %	-4 %	-3 %	-1 %	0 %	-2 %
Promedio	0 %	-19 %	-3 %	-5 %	-1 %	

Tabla 5.15: Escenarios de variación porcentual del precio de mercado del litio en 2030.

2030	SQM
Esperado	-10 %
Optimista	-12 %
Pesimista	0 %
Promedio	-7 %

A partir de la tabla 5.14 y 5.15 se observa que el impacto en el mediano plazo podría estar entre un 2 % y un 9 %, mientras que en el largo plazo este impacto podría llegar a ser hasta de un 12 %.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajo futuro

En temas regulatorios Europa lleva la delantera, siendo muy claro en las metas que se quieren lograr en términos de tasas de recolección y tasas de recuperación entre el 2025 y 2030. Sin embargo, China supera a Europa en términos de exigencias de tasas de recuperación, pero no existen actualmente metas regulatorias en cuanto a tasas de recolección. Por otro lado Estados Unidos, se encuentra atrasado en regulación, pero hay propuestas de ley que pretenden generar estrategias para abordar el tema. Finalmente para *ROW* no se encontró una fuente lo suficientemente confiable como para hacer afirmaciones al respecto.

La tendencia del mercado en lo que respecta a procesos, es usar procesos hidrometalúrgicos debido a sus mayores tasas de reciclaje, en términos de la variabilidad de materiales que se pueden recuperar. Sin embargo, el reciclaje directo también es prometedor debido a sus bajos costos y viene a solucionar el problema de que los procesos hidrometalúrgicos no son rentables para baterías bajas en Cobalto y Níquel, como lo son las baterías LFP y LMO.

En cuanto a capacidad de reciclaje, está altamente concentrada en China, por lo que podría ser necesario desarrollar infraestructura de reciclaje en el resto del mundo o una red logística internacional en la medida de que la electro-movilidad se vaya desarrollando.

Por otro lado, se estima que el costo de producción de LCE esta en torno a los 1,2 US/kg LCE y con el modelo de reciclaje se estima que en el 2025 y 2030 habrá una producción secundaria de 39 y 144 k ton LCE respectivamente. Y considerando el efecto completo del reciclaje, es decir, oferta secundaria y oferta de segundo uso, el 5% y 9% de la demanda sera abastecida por reciclaje en 2025 y 2030 respectivamente. Adicionalmente, es importante destacar que la vida útil de la batería y las tasas de recolección serán determinantes en la oferta secundaria.

Finalmente, se espera que el reciclaje de baterías de litio pueda llegar a desviar el precio de equilibrio de mercado en un 6% y 10% en 2025 y 2030 respectivamente. SQM llegaría a ver reducidos sus ingresos en estos mismos porcentajes en comparación al escenario en donde no existe un producto de bajo costo de litio, es decir, el reciclaje de baterías.

Como trabajo futuro se propone desarrollar modelos de *forecasting* más complejos, sin embargo, para esto es crucial recolectar datos históricos de litio producido por reciclaje de una fuente confiable. Además, se propone hacer una análisis de sensibilidad del costo de producción de litio según los precios de mercado de los metales valiosos extraídos de la batería.

Bibliografía

- [1] R. Sommerville, J. Shaw-Stewart, V. Goodship, N. Rowson, and E. Kendrick, “A review of physical processes used in the safe recycling of lithium ion batteries,” *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 25, pp. 1–12, 2020, doi: 10.1016/j.susmat.2020.e00197.
- [2] O. Velázquez-Martínez, J. Valio, A. Santasalo-Aarnio, M. Reuter, and R. Serna-Guerrero, “A critical review of lithium-ion battery recycling processes from a circular economy perspective,” *Batteries*, vol. 5, pp. 1–33, 2019, doi: 10.3390/batteries5040068.
- [3] F. Donoso, V. Garay, and J. Cantallopis, “Mercado Internacional del Litio,” *Com. Chil. del Cobre*, pp. 1–35, 2018.
- [4] SQM, “Memoria Anual 2019,” pp. 1–409, 2019.
- [5] SQM, “Corporate presentation SQM,” pp. 1–24, 2019.
- [6] COCHILCO, “Oferta y demanda de litio hacia el 2030,” pp. 1–46, 2020.
- [7] M. L. Valenzuela, R. Rojas, M. Segovia, and S. Quintana, “Reciclaje de baterías de litio,” 2019.
- [8] J. L. Gálvez Martos, L. R. Istrate, and D. Garcia, “Estudio de perspectiva de economía circular en la gestión de baterías de coche eléctrico en su fin de vida,” *CONAMA Congr. Nac. del medio Ambient.*, pp. 1–15, 2018.
- [9] L. Brückner, J. Frank, and T. Elwert, “Industrial recycling of lithium-ion batteries—A critical review of metallurgical process routes,” *Metals*, vol. 10, pp. 1–29, 2020, doi: 10.3390/met10081107.
- [10] C. Barragán, J. N. González G, and E. Aimée, “Análisis FODA como elemento de la planeación estratégica,” *Daena Int. J. Good Conscienc.*, vol. 15, pp. 222–229, 2020.
- [11] A. Chapman, “Análisis DOFA y análisis PEST,” *Www.Eduardoleyton.Com*, p. 11, 2004.
- [12] J. Vergiú Canto, “La cadena de valor como herramienta de gestión para una empresa de servicios,” *Ind. Data*, vol. 16, no. 1, p. 017, 2014.
- [13] J. A. Juan Carlos, “Marco Teorico 5 Fuerzas De Porter,” *Profr. Fac. Ciencias Económicas y Adm. Univ. Auton. Occident. Cali –Colombia*, p. 6, 2006.
- [14] G. Harper et al., “Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles,” *Nature*, vol. 575, pp. 75–86, 2019, doi: 10.1038/s41586-019-1682-5.
- [15] D. L. Thompson et al., “The importance of design in lithium ion battery recycling—a critical review,” *Green Chem.*, vol. 22, pp. 7585–7603, 2020, doi: 10.1039/d0gc02745f.
- [16] J. Wang, H. Li, H. Lu, H. Yang, and C. Wang, “Integrating offline logistics and online system to recycle e-bicycle battery in China,” *J. Clean. Prod.*, vol. 247, p. 1-14, 2020, doi:

10.1016/j.jclepro.2019.119095.

- [17] T. P. Hendrickson, O. Kavvada, N. Shah, R. Sathre, and C. D. Scown, “Life-cycle implications and supply chain logistics of electric vehicle battery recycling in California,” *Environ. Res. Lett.*, vol. 10, pp. 1–11, 2015, doi: 10.1088/1748-9326/10/1/014011.
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/1/014011/pdf>
- [18] Gobierno Chino, 2018, Aviso multidepartamental sobre la organización y realización del trabajo piloto para el reciclaje y utilización de baterías de potencia para vehículos de nueva energía [Online]. Available:
http://www.gov.cn/xinwen/2018-03/05/content_5270958.htm
- [19] Gobierno Chino, 2018, Aviso de siete departamentos sobre cómo hacer un buen trabajo en el trabajo piloto de reciclaje y uso de baterías eléctricas de vehículos de nueva energía [Online]. Available:
http://www.gov.cn/xinwen/2018-07/26/content_5309433.htm
- [20] Gobierno Chino, 2019, Normas y condiciones de la industria para la utilización integral de baterías de energía residual para vehículos de nueva energía (edición de 2019) [Online]. Available:
<http://gxt.shaanxi.gov.cn/jjnjb/53077.jhtml>
- [21] “Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council,” pp. 1–28, 2013.
<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2006/66/oj>
- [22] EU COMMISSION, “Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020,” pp. 1–129, 2020.
https://ec.europa.eu/environment/waste/batteries/pdf/Proposal_for_a_Regulation_on_batteries_and_waste_batteries.pdf
- [23] EU COMMISSION, “Annexes to the proposal for a regulation of the European Parliament and of the concerning batteries and waste batteries,” pp. 1-28, 2020.
- [24] U. S. Government, “Public Law 104–142 104th Congress,” pp. 1–9, 1996.
<https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-03/documents/p1104.pdf>
- [25] E. Committee, “Analysis HB 1364,” pp. 1–4, 2013.
<http://lawfilesexternal.wa.gov/biennium/2013-14/Pdf/Bill%20Reports/House/1364%20HBA%20ENVI%2013.pdf?q=20210114055756>
- [26] E. T. SENATE COMMITTEE ON ENERGY, “Senate Bill Report SB 5457,” pp. 1–4, 2013.
<http://lawfilesexternal.wa.gov/biennium/2013-14/Pdf/Bill%20Reports/Senate/5457%20SBA%20EET%2013.pdf?q=20210114061827>
- [27] U. S. Government, 2013, Minnesota House Bill 865 [Online]. Available:
<https://legiscan.com/MN/text/HF865/2013>
- [28] U. S. Government, 2014, California Assembly Bill 488 [Online]. Available:
<https://legiscan.com/CA/text/AB488/2013>
- [29] U. S. Government, “S. 3356,” pp. 1–9, 2020.
<https://www.congress.gov/116/bills/s3356/BILLS-116s3356is.pdf>

- [30] B. Huang, Z. Pan, X. Su, and L. An, “Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives,” *J. Power Sources*, vol. 399, pp. 274–286, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.07.116.
- [31] M. Mohr, J. F. Peters, M. Baumann, and M. Weil, “Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes,” *J. Ind. Ecol.*, vol. 24, pp. 1310–1322, 2020, doi: 10.1111/jiec.13021.
- [32] B. Huang, Z. Pan, X. Su, and L. An, “Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives,” *J. Power Sources*, vol. 399, pp. 274–286, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.07.116.
- [33] P. Xu et al., “Efficient Direct Recycling of Lithium-Ion Battery Cathodes by Targeted Healing,” *Joule*, pp. 1–18, 2020, doi: 10.1016/j.joule.2020.10.008.
- [34] Spangenberg, “Comparison of lithium-ion battery recycling processes using the ReCell model,” *International battery seminar*, 2018.
- [35] Neometals, “Neometals Completes Lithium Battery Recycling Scoping Study,”, 2019.

ANEXO

Curvas de costos

Tabla A.1: Costos y volúmenes de litio a 2025 *Mckinsey*.

	Volumen k ton LCE	Costo US/ton
Productor 1	23,3	3397
Productor 2	35	3755
Productor 3	62,9	3954
Productor 4	23,3	4033
Productor 5	44,3	4113
Productor 6	51,3	4172
Productor 7	125,9	4192
Productor 8	55,9	4252
Productor 9	86,2	4331
Productor 10	18,6	4411
Productor 11	32,6	4430
Productor 12	16,3	4530
Productor 13	14	4649
Productor 14	7	5166
Productor 15	42	5483
Productor 16	93,2	5623
Productor 17	83,9	5781
Productor 18	16,3	5841
Productor 19	23,3	5881
Productor 20	9,3	6000
Productor 21	69,9	6139
Productor 22	30,3	6397
Productor 23	7	6556
Productor 24	7	7113
Productor 25	16,3	7510
Productor 26	7	7748
Productor 27	4,7	9934

Tabla A.2: Costos y volúmenes de litio a 2025 *Benchmark*.

	Volumen k ton LCE	Costo US/ton
Productor 1	144,1	4561
Productor 2	9,6	4649
Productor 3	2,4	4737
Productor 4	12,0	4825
Productor 5	25,3	4912
Productor 6	4,8	5000
Productor 7	25,3	5088
Productor 8	3,6	5263
Productor 9	20,5	5263
Productor 10	12,1	5263
Productor 11	19,3	5263
Productor 12	9,6	5351
Productor 13	80,8	5439
Productor 14	7,2	5439
Productor 15	1,2	5526
Productor 16	16,9	5526
Productor 17	1,2	5614
Productor 18	19,3	5614
Productor 19	4,8	5702
Productor 20	30,1	5789
Productor 21	4,8	5789
Productor 20	2,4	5789
Productor 21	130,2	5877
Productor 24	6,0	5877
Productor 25	4,8	5877
Productor 26	39,8	5965
Productor 27	36,2	5965
Productor 28	27,7	6053
Productor 29	14,5	6053
Productor 30	8,4	6053
Productor 31	61,5	6140
Productor 32	6,0	6228
Productor 33	14,5	6228
Productor 34	10,9	6228
Productor 35	8,4	6316
Productor 36	25,3	6491
Productor 37	4,8	6491
Productor 38	8,4	6667
Productor 39	18,1	6842
Productor 40	2,4	7018
Productor 41	4,8	7018
Productor 42	3,6	7105
Productor 43	3,6	7193
Productor 44	4,8	7456
Productor 45	2,4	7544
Productor 46	3,6	7632
Productor 47	6,0	7719
Productor 48	9,6	7719
Productor 49	4,8	7807
Productor 50	3,6	7982
Productor 51	2,3	9123
Productor 52	12,0	9386
Productor 53	3,6	9825

Tabla A.3: Costos y volúmenes de litio a 2025 *Deutsche Bank*.

	Volumen k ton LCE	Costo US/ton
Productor 1	71,8	3927
Productor 2	73,1	4364
Productor 3	68,1	4625
Productor 4	39,6	4931
Productor 5	34,7	5411
Productor 6	16,1	6065
Productor 7	18,6	6589
Productor 8	21,1	6676
Productor 9	13,6	6720
Productor 10	35,9	6807
Productor 11	42,1	6982
Productor 12	21,1	7287
Productor 13	23,5	7375
Productor 14	21,1	7549
Productor 15	12,4	7593
Productor 16	21,1	7724
Productor 17	18,6	7811
Productor 18	31,0	8073
Productor 19	21,1	8204
Productor 20	9,9	8815
Productor 21	50,8	10560
Productor 22	16,1	10604

Tabla A.4: Costos y volúmenes de litio a 2025 *CRU*.

	Volumen k ton LCE	Costo US/ton
Productor 1	47,3	3299
Productor 2	44,0	3625
Productor 3	18,3	5039
Productor 4	18,3	5221
Productor 5	5,4	5257
Productor 6	49,4	5366
Productor 7	26,8	5511
Productor 8	23,6	5547
Productor 9	5,4	5692
Productor 10	10,7	5728
Productor 11	117,1	5764
Productor 12	4,3	6091
Productor 13	74,1	6308
Productor 14	12,9	6453
Productor 15	44,0	6526
Productor 16	65,5	6598
Productor 17	44,0	6961
Productor 18	40,8	6961
Productor 19	9,7	7178
Productor 20	23,6	7215
Productor 21	10,7	7396
Productor 22	20,4	7468
Productor 23	17,2	7903
Productor 24	22,6	8048
Productor 25	21,5	8157
Productor 26	43,0	8302
Productor 27	24,7	8411
Productor 28	15,0	8520
Productor 29	16,1	8592
Productor 30	4,3	8773
Productor 31	12,9	8918
Productor 32	3,2	9136
Productor 33	1,1	9426
Productor 34	2,1	11710

Tabla A.5: Costos y volúmenes de litio a 2025 SQM.

	Volumen k ton LCE	Costo US/ton
Productor 1	180	3.800
Productor 2	37	4.700
Productor 3	35	4.700
Productor 4	50	5.200
Productor 5	70	5.200
Productor 6	25	5.800
Productor 7	75	5.900
Productor 8	4	6.100
Productor 9	21	6.600
Productor 10	10	6.600
Productor 11	2	6.800
Productor 12	2	6.800
Productor 13	1	6.900
Productor 14	10	6.900
Productor 15	22	7.000
Productor 16	42	7.400
Productor 17	48	7.500
Productor 18	60	7.500
Productor 19	30	7.700
Productor 20	30	7.700
Productor 21	30	7.700
Productor 22	33	7.800
Productor 23	23	7.800
Productor 24	14	7.800
Productor 25	15	8.100
Productor 26	48	8.300
Productor 27	22	9.100
Productor 28	20	9.500

Tabla A.6: Costos y volúmenes de litio a 2030 SQM.

	Volumen k ton LCE	Costo US/ton
Productor 1	271	5.500
Productor 2	200	5.900
Productor 3	2	6.900
Productor 4	28	7.000
Productor 5	22	7.200
Productor 6	46	7.400
Productor 7	120	7.500
Productor 8	149	7.600
Productor 9	52	7.700
Productor 10	103	7.700
Productor 11	30	7.700
Productor 12	94	7.800
Productor 13	28	8.100
Productor 14	55	8.300
Productor 15	136	8.600
Productor 16	12	8.700
Productor 17	63	8.900
Productor 18	4	8.900
Productor 19	30	9.100
Productor 20	40	9.300
Productor 21	44	9.300
Productor 22	19	9.300
Productor 23	14	9.400
Productor 24	44	9.500
Productor 25	88	9.500
Productor 26	12	9.700
Productor 27	15	9.700
Productor 28	24	9.900
Productor 29	28	10.400
Productor 30	35	10.500
Productor 31	24	10.500
Productor 32	22	10.800
Productor 33	53	10.800
Productor 34	13	11.200
Productor 35	19	11.900
Productor 36	35	11.900
Productor 37	20	12.200