

NOTA TÉCNICA N° IDB-TN-02893

Reciclaje y Reúso de Baterías de Litio en América Latina y el Caribe

Revisión analítica de prácticas
globales y regionales

Viviana López Hernández
Inga Hilbert
Lucía Gascón Castillero
Andreas Manhart
Diego García
Bertrand Nkongdem
Raluca Dumitrescu
Carlos G. Sucre
Carolina Ferreira Herrera

Banco Interamericano de Desarrollo
Departamento de Infraestructura y Energía
División de Energía

Febrero 2024



Reciclaje y Reúso de Baterías de Litio en América Latina y el Caribe

Revisión analítica de prácticas globales y regionales

Viviana López Hernández*

Inga Hilbert*

Lucía Gascón Castellero*

Andreas Manhart*

Diego García^

Bertrand Nkongdem^

Raluca Dumitrescu^

Carlos G. Sucre#

Carolina Ferreira Herrera#

* Öko-Institut e.V.

^ MicroEnergy International GmbH

Banco-Interamericano de Desarrollo

Banco Interamericano de Desarrollo
Departamento de Infraestructura y Energía
División de Energía

Febrero 2024

Catalogación en la fuente proporcionada por la Biblioteca Felipe Herrera del Banco Interamericano de Desarrollo

Reciclaje y reúso de baterías de litio en América Latina y el Caribe: revisión analítica de prácticas globales y regionales / Viviana López Hernández, Inga Hilbert, Lucía Gascón Castellero, Andreas Manhart, Diego García, Bertrand Nkongdem, Raluca Dumitrescu, Carlos Sucre, Carolina Ferreira Herrera. p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2893)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Lithium industry-Latin America. 2. Lithium industry-Caribbean Area. 3. Lithium cells-Recycling. 4. Carbon dioxide mitigation-Latin America. 5. Carbon dioxide mitigation-Caribbean Area. 6. Energy transition-Latin America. 7. Energy transition-Caribbean Area. I. López Hernández, Viviana. II. Hilbert, Inga. III. Gascón, Lucía. IV. Manhart, Andreas. V. García, Diego. VI. Nkongdem, Bertrand. VII. Dumitrescu, Raluca. VIII. Sucre, Carlos. IX. Ferreira, Carolina. X. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Energía. XI. Serie. IDB-TN-2893

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2024 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

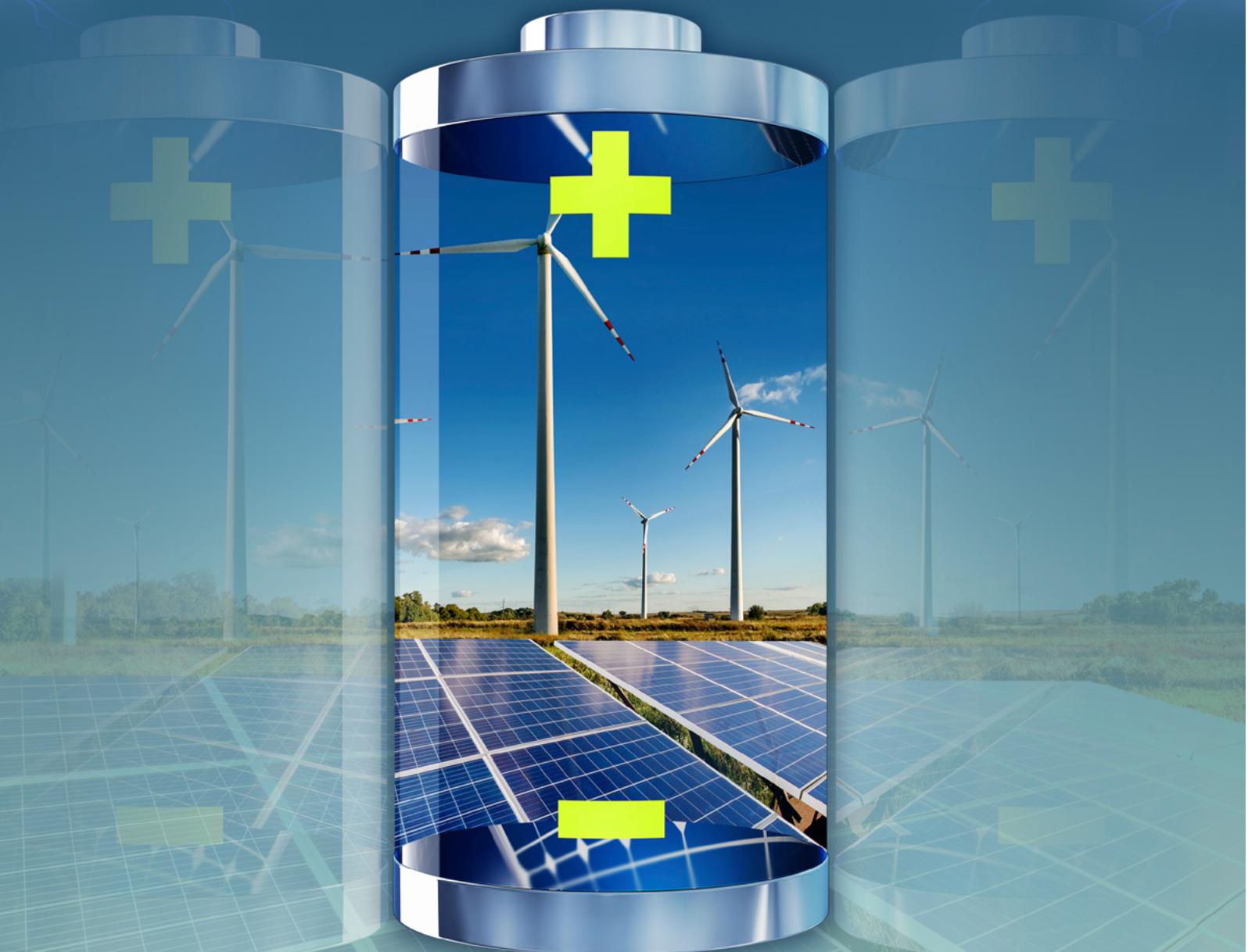
Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



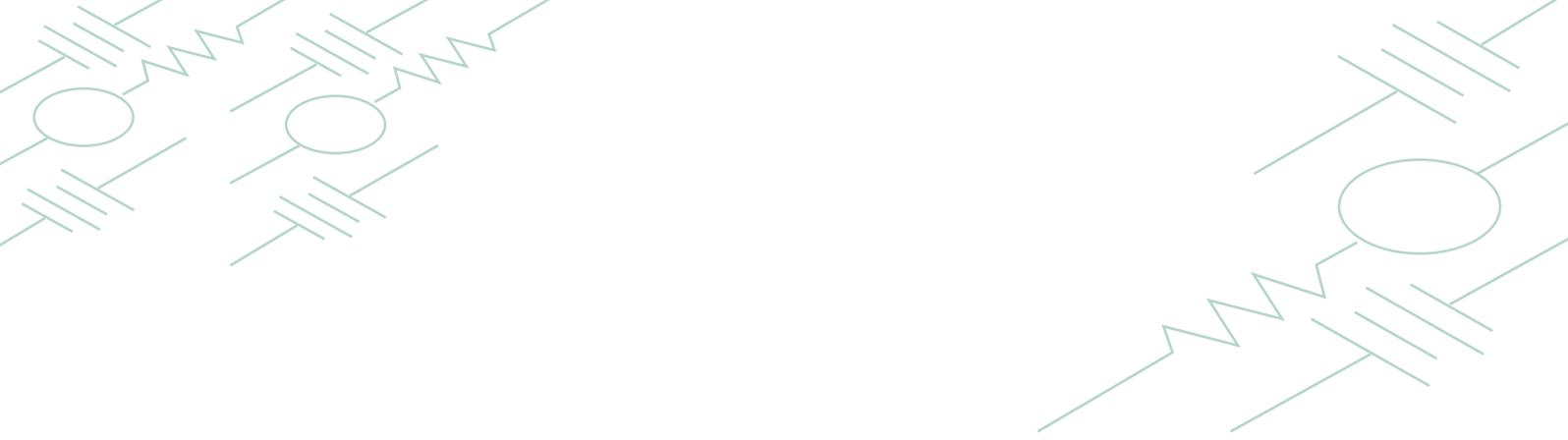
Reciclaje y Reúso de Baterías de Litio en América Latina y el Caribe

► Revisión analítica de prácticas globales y regionales



Viviana López Hernández, Inga Hilbert,
Lucía Gascón Castellero, Andreas Manhart,
Diego García, Bertrand Nkongdem, Raluca Dumitrescu,
Carlos G. Sucre y Carolina Ferreira Herrera.





Agradecimientos

Este informe es parte de la agenda de conocimiento desarrollada por la División de Energía del Banco Interamericano de Desarrollo que tiene por objetivo desarrollar nuevos productos de conocimiento y programas de asistencia técnica para los países de América Latina y el Caribe. Los productos de conocimiento generados tienen la intención de informar, guiar y ofrecer un menú de recomendaciones a los hacedores de políticas y participantes activos en los mercados energéticos, incluidos los consumidores, las empresas de servicios públicos y los reguladores. El informe fue elaborado bajo la dirección general de Marcelino Madrigal (Jefe de la División de Energía). El líder del equipo de trabajo es Carlos G. Sucre y los miembros del equipo son Carolina Ferreira Herrera, Martin Walter y Lenin Balza. Los autores del informe son Viviana López Hernández, Inga Hilbert, Lucía Gascón Castillero y Andreas Manhart del Öko-Institut e.V; Diego García, Bertrand Nkongdem, y Raluca Dumitrescu de MicroEnergy International GmbH; Carolina Ferreira Herrera y Carlos G. Sucre del Banco Interamericano de Desarrollo.

El equipo valora los comentarios y revisión de Daniel Jiménez y Alejandro Echeverría de ILiMarkets y de Lenin Balza del Banco Interamericano de Desarrollo. El equipo agradece el apoyo financiero de los Fondos de Inversión en el Clima (CIF) a través de la cooperación técnica regional “Litio Circular: Soluciones Sostenibles en la Cadena de Valor de las Baterías” (ATN/TC-18924-RG – RG-T3787).

Índice

| | |
|---|-----------|
| Resumen ejecutivo..... | 14 |
| 1 Contextualización | 19 |
| 1.1 ▶ Consideraciones sobre la economía circular | 22 |
| 1.2 ▶ Tipos de baterías de iones de litio (LIB) | 24 |
| 1.3 ▶ Buenas prácticas en la gestión del final de la vida útil de las LIB..... | 26 |
| 2 Metodología..... | 29 |
| 3 Panorama del estado del arte global y de las prácticas existentes en materia de EoL de baterías de iones de litio..... | 31 |
| 3.1 ▶ Recolección y transporte..... | 31 |
| 3.2 ▶ Reúso y reutilización..... | 34 |
| 3.3 ▶ Reciclaje | 37 |
| Pirometalurgia con tratamiento hidrometalúrgico posterior..... | 38 |
| Procesado mecánico con posterior tratamiento metalúrgico de la masa negra..... | 39 |
| Reciclaje directo | 40 |
| 3.4 ▶ Marcos normativos que permiten el reúso y reciclaje de las ULIB | 42 |
| Marco normativo chino para el reúso y el reciclaje de baterías..... | 42 |
| La Ley Alemana de Baterías..... | 45 |
| Proyecto de Reglamento de la UE sobre baterías..... | 48 |
| El papel de los sistemas de responsabilidad extendida del productor..... | 53 |
| 4 Evaluación de la reutilización, reúso y reciclaje de ULIB en América Latina y el Caribe..... | 56 |
| 4.1 ▶ Panorama regional..... | 56 |
| 4.2 ▶ Prácticas y políticas actuales en los países seleccionados..... | 60 |
| Colombia..... | 60 |
| Costa Rica..... | 70 |
| Chile..... | 75 |
| México..... | 81 |
| 4.3 ▶ Panorama de los actores activos en el reúso, reutilización y reciclaje de las ULIB en ALC | 84 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5 | Hallazgos sobre el marco regulatorio y capacidades en ALC..... | 87 |
| 6 | Perspectivas regionales..... | 90 |
| 6.1 | ▶ Estimación de los volúmenes de ULIB..... | 91 |
| | Escenario base..... | 91 |
| | Escenario 1..... | 94 |
| | Escenario 2..... | 95 |
| | Escenario 3..... | 99 |
| | Comparación de escenarios..... | 103 |
| 6.2 | ▶ Estimación de las necesidades de inversión en ULIB..... | 107 |
| | Requisitos de inversión para el reciclaje de ULIB..... | 107 |
| | Requisitos de inversión para el reúso de ULIB..... | 108 |
| 6.3 | ▶ Evaluación de los posibles beneficios económicos de la adopción de una gestión segura y responsable con el medio ambiente de las ULIB al final de su vida..... | 110 |
| | Beneficios económicos potenciales del reciclaje de ULIB..... | 110 |
| | Posibles beneficios económicos del reúso de las ULIB..... | 112 |
| 6.4 | ▶ Posibles beneficios medioambientales y sociales de una buena gestión medioambiental y ambiental de las ULIB al final de su vida..... | 115 |
| | Mitigación de los costes sociales y medioambientales derivados de la contaminación y los riesgos de incendio..... | 116 |
| | Desarrollo de cadenas de valor asociadas y generación de empleo..... | 117 |
| 7 | Recomendaciones y capacidades necesarias..... | 119 |
| 7.1 | ▶ Política y normativa..... | 119 |
| 7.2 | ▶ Sensibilización..... | 121 |
| 7.3 | ▶ Infraestructura de reciclaje y capacidades de reutilización locales..... | 123 |
| 7.4 | ▶ Desarrollo de capacidades..... | 124 |
| | Lista de Referencias..... | 126 |
| | Anexos..... | 137 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Anexo I. | ▶ Lista de entrevistas y contactos con actores regionales..... | 137 |
| Anexo II. | ▶ Mapeo de actores - Lista completa de todos los actores identificados en cuatro países seleccionados | 138 |
| Anexo III. | ▶ Cuestionario de entrevista (original - español; adaptado para los interlocutores individuales)..... | 155 |
| Anexo IV. | ▶ Metodología y enfoque para la elaboración de las perspectivas regionales de ULIB..... | 157 |

Lista de figuras

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 1-1 | ▶ De la economía lineal (izquierda) a la economía circular (derecha)..... | 23 |
| Figura 1-2 | ▶ Diferentes tipos y diseños de baterías de iones de litio..... | 25 |
| Figura 1-3 | ▶ Composición de las baterías de los vehículos eléctricos (simplificada)..... | 26 |
| Figura 1-4 | ▶ Cadena de suministro inversa optimizada para baterías de vehículos eléctricos | 27 |
| Figura 3-1 | ▶ Barriles utilizados habitualmente para almacenar y transportar baterías de iones de litio (izquierda) y concepto de incrustación de baterías en arena o vermiculita (derecha)..... | 31 |
| Figura 3-2 | ▶ Codificación y adhesivos necesarias para el transporte de baterías de iones de litio al final de su vida útil..... | 31 |
| Figura 3-3 | ▶ Diagrama de flujo general de las principales vías de reciclaje de las ULIB | 37 |
| Figura 3-4 | ▶ Aleación/material como producto intermedio del reciclaje pirometalúrgico de ULIB..... | 38 |
| Figura 3-5 | ▶ El concepto de Responsabilidad Extendida del Productor | 53 |
| Figura 3-6 | ▶ Cumplimiento individual de la responsabilidad física para baterías usadas..... | 54 |
| Figura 3-7 | ▶ Cumplimiento colectivo de la responsabilidad física en materia de baterías usadas con la participación de una Organización de Responsabilidad del Productor..... | 55 |
| Figura 4-1 | ▶ Modelos de negocio integrados de reutilización y reciclaje de ULIB en Colombia..... | 67 |
| Figura 4-2 | ▶ Instalación modular de reciclaje de ULIB en Colombia | 68 |
| Figura 4-3 | ▶ Estación de carga para vehículos eléctricos en Uvita, Costa Rica..... | 73 |
| Figura 4-4 | ▶ Modelo de negocio para aplicaciones de segunda vida de ULIB en Chile .. | 79 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figura 4-5 | ▶ Mapeo de los actores en los cuatro estudios de caso seleccionados en ALC | 86 |
| Figura 6-1 | ▶ Resumen de la metodología para la estimación de ULIB | 90 |
| Figura 6-2 | ▶ Masa anual de ULIB que llega al final de su vida útil (EoL) – Escenario base | 91 |
| Figura 6-3 | ▶ Masa acumulada de ULIB que alcanza el EoL - Escenario base | 93 |
| Figura 6-4 | ▶ Masa anual de ULIB que alcanza el EoL - Escenario 2..... | 96 |
| Figura 6-5 | ▶ Masa acumulada de ULIB que alcanza el EoL - Escenario 2..... | 97 |
| Figura 6-6 | ▶ Masa anual de ULIB disponible para reuso - Escenario 2..... | 99 |
| Figura 6-7 | ▶ Masa anual de ULIB que alcanza el EoL - Escenario 3..... | 100 |
| Figura 6-8 | ▶ Masa acumulada que llega a la EoL - Escenario 3..... | 102 |
| Figura 6-9 | ▶ Masa ULIB disponible para reuso cada año - Escenario 3..... | 103 |
| Figura 6-10 | ▶ Comparación de escenarios | 106 |
| Figura 6-11 | ▶ Resumen de los beneficios económicos potenciales de la reutilización de la ULIB en 2050..... | 115 |

Lista de tablas

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabla 1-1 | ▶ Principales subtipos actuales de químicas de baterías de iones de litio..... | 24 |
| Tabla 3-1 | ▶ Resumen de las diferentes opciones de reciclaje de ULIB | 41 |
| Tabla 3-2 | ▶ Tasas obligatorias de recuperación de materiales para el reciclaje de baterías de vehículos eléctricos en China..... | 43 |
| Tabla 3-3 | ▶ Evolución de los índices de recolección solicitados y reales de baterías portátiles usadas en Alemania | 47 |
| Tabla 3-4 | ▶ Contenido mínimo provisional de materias primas recicladas para las baterías nuevas comercializadas en el mercado europeo de acuerdo a (UE) 2023/1542 | 49 |
| Tabla 3-5 | ▶ Tasas de recolección exigidas para las baterías portátiles usadas en (UE) 2023/1542..... | 51 |
| Tabla 3-6 | ▶ Eficacia de reciclaje solicitada por peso medio de las baterías de iones de litio en (UE) 2023/1542 | 51 |
| Tabla 3-7 | ▶ Porcentajes de recuperación de material solicitados en (UE) 2023/1542 | 52 |
| Tabla 4-1 | ▶ Matriz general de América Latina | 58 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Tabla 4-2 | ▶ Tasas de recolección de baterías y acumuladores y baterías de iones de litio provenientes de vehículos eléctricos en Colombia | 62 |
| Tabla 4-3 | ▶ Evolución de los índices de recolección solicitados y reales de Pilas con el Ambiente | 64 |
| Tabla 4-4 | ▶ Objetivos de recolección y valorización de aparatos eléctricos y electrónicos según la Resolución 207 | 76 |
| Tabla 4-5 | ▶ Actores con iniciativas y capacidades existentes para la gestión del fin de la vida de LIB en los países seleccionados | 85 |
| Tabla 6-1 | ▶ Masa de ULIB que llega al EoL al año (toneladas) – Escenario base | 92 |
| Tabla 6-2 | ▶ Masa de ULIB disponible para reciclaje por año (toneladas) - Escenario 1 .. | 94 |
| Tabla 6-3 | ▶ Masa de ULIB acumulada disponible para reciclaje (toneladas) - Escenario 1 | 94 |
| Tabla 6-4 | ▶ Contenido acumulado de metal de las UULIB disponible para reciclaje (toneladas) - Escenario 1 | 95 |
| Tabla 6-5 | ▶ Contenido acumulado de metal de las ULIB disponibles para reciclaje (toneladas) - Escenario 2 | 97 |
| Tabla 6-6 | ▶ Masa anual de ULIB disponible para reutilización (toneladas) - Escenario 2 | 98 |
| Tabla 6-7 | ▶ Masa ULIB acumulada disponible para reutilización (toneladas) - Escenario 2 | 98 |
| Tabla 6-8 | ▶ Contenido acumulado de metal de las ULIB disponibles para reciclaje (toneladas) - Escenario 3 | 100 |
| Tabla 6-9 | ▶ Masa anual de ULIB disponible para reuso (toneladas) - Escenario 3 | 101 |
| Tabla 6-10 | ▶ Masa ULIB acumulada disponible para reuso (toneladas) - Escenario 3 | 101 |
| Tabla 6-11 | ▶ Comparación de la masa de la ULIB que alcanza el EoL en los distintos escenarios (toneladas) | 104 |
| Tabla 6-12 | ▶ Comparación de la masa de ULIB potencialmente disponible para recolección en los distintos escenarios (toneladas) | 104 |
| Tabla 6-13 | ▶ Comparación de la masa de ULIB disponible para el reciclaje en los distintos escenarios (toneladas) | 105 |
| Tabla 6-14 | ▶ Comparación de la masa de ULIB disponible para reuso en los distintos escenarios (toneladas) | 105 |
| Tabla 6-15 | ▶ CAPEX necesario para alcanzar la capacidad potencial de reciclaje de ULIB (USD) | 107 |
| Tabla 6-16 | ▶ OPEX anuales necesarios para alcanzar la capacidad potencial de reciclaje de ULIB (USD) | 108 |
| Tabla 6-17 | ▶ Valores de referencia para los requerimientos de inversión en reuso de ULIB (USD) | 108 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Tabla 6-18 | ▶ Costes de inversión necesarios para gestionar las ULIB disponibles para reuso (USD)..... | 109 |
| Tabla 6-19 | ▶ Precio de mercado de los metales presentes en el ULIB (USD)..... | 110 |
| Tabla 6-20 | ▶ Valor acumulado de los metales en las ULIB disponibles para reciclaje (USD) - Escenario 1..... | 111 |
| Tabla 6-21 | ▶ Valor acumulado de los metales en las ULIB disponibles para reciclaje (USD) - Escenario 2..... | 111 |
| Tabla 6-22 | ▶ Valor acumulado de los metales en las ULIB disponibles para reciclaje (USD) - Escenario 3..... | 112 |
| Tabla 6-23 | ▶ Valores de referencia para estimar los beneficios económicos de la reutilización de ULIB (USD)..... | 113 |
| Tabla 6-24 | ▶ Evaluación de los beneficios económicos acumulados producto del reuso de ULIB en la región de ALC (USD)..... | 114 |

Lista de ejemplos prácticos

| | |
|--|----|
| Ejemplo práctico 1: Pilas con el Ambiente | 63 |
| Ejemplo práctico 2: Innova Ambiental & Recobatt..... | 66 |
| Ejemplo práctico 3: Altero..... | 68 |
| Ejemplo práctico 4: Fortech..... | 72 |
| Ejemplo práctico 5: Ecominería | 77 |
| Ejemplo práctico 6: Relitia..... | 78 |
| Ejemplo práctico 7: Andes Electronics..... | 79 |
| Ejemplo práctico 8: REMSA..... | 83 |

Lista de abreviaturas

| | |
|--------------|---|
| ADR | Acuerdo relativo al transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera |
| AEE | Aparatos Eléctricos y Electrónicos |
| Al | Aluminio |
| BEV | Vehículo eléctrico de batería |
| BMS | Sistema de gestión de la batería |
| CAGR | Tasa compuesta de crecimiento anual |
| CAPEX | Gastos de capital |
| Co | Cobalto |
| Cu | Cobre |
| EoL | Final de la vida útil |
| GEI | Gases de efecto invernadero |
| REP | Responsabilidad Extendida del Productor |
| EU | Unión Europea |
| EV | Vehículo eléctrico |
| kg | Kilogramo |
| kWh | Kilovatio-hora |
| ALC | América Latina y el Caribe |
| LCO | Óxido de litio-cobalto |
| LFP | Litio ferrofosfato |
| Li | Litio |
| LIB | Batería de iones de litio |

Lista de abreviaturas

| | |
|--------------------|---|
| LMO | Óxido de litio-manganeso |
| LMT | Medios de transporte ligeros |
| NCA | Óxido de aluminio de litio-níquel-cobalto |
| NMC | Óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto |
| OCDE | Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico |
| OPEX | Gastos operativos |
| PHEV | Vehículo eléctrico híbrido enchufable |
| PRO | Organización de Responsabilidad del Productor |
| PV | Fotovoltaica |
| RE | Energías renovables |
| Batería SLI | Batería de automoción utilizada únicamente para el arranque, el alumbrado o el encendido del automóvil. |
| SNA | Análisis de redes sociales |
| ULAB | Batería de plomo-ácido usada |
| ULIB | Batería de Iones de litio usada |
| USD | Dólar estadounidense |
| RAEE | Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos |
| Wh | Vatios-hora |
| ZEV | Vehículo de emisiones cero |

Glosario

| | |
|--|--|
| Masa negra | Polvo negro obtenido tras el pretratamiento mecánico de baterías de iones de litio usadas. Contiene los materiales activos del ánodo y el cátodo de las baterías. Dependiendo de la química de la batería, contiene grafito, litio y metales como cobalto, níquel o manganeso en diferentes composiciones. |
| Decreto | Resolución escrita de carácter normativo dictada por persona u órgano competente para ello. |
| Fin de la vida | Producto al final de su vida útil, que requiere una manipulación posterior y una gestión adecuada. |
| Responsabilidad extendida del productor (REP) | Enfoque de política medioambiental que amplía la responsabilidad del productor a la fase posterior al consumo del ciclo de vida de un producto. La responsabilidad puede ser económica y/o física, y puede recaer total o parcialmente en el productor (OECD 2022). Los productores pueden definirse como aquellos actores que introducen por primera vez un producto en un mercado determinado. En el contexto de la REP, los fabricantes y los importadores suelen considerarse productores. |
| Gestión integrada de residuos | Actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización, reciclaje, co-procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, recolección, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, realizadas individualmente o combinadas de manera adecuada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, cumpliendo con los objetivos de valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica, social y social. (SEMARNAT 2020). |
| Baterías de iones de litio (LIB) | Familia de tipos de baterías recargables en las que los iones de litio se desplazan del electrodo negativo al positivo durante la descarga y viceversa durante la carga. (Qiao and Wei 2012a). |
| Baterías portátiles | Las baterías portátiles son aquellas que un individuo puede transportar a mano sin dificultad, y no son baterías de automoción ni industriales. |

Glosario

| | |
|--|---|
| Baterías primarias | Celdas galvánicas de un solo uso que almacenan electricidad para un uso cómodo. Algunos ejemplos son las celdas de zinc-carbono, las celdas alcalinas de zinc-dióxido de manganeso y las baterías de metal-aire despolarizadas (Kordesch and Taucher-Mautner 2009). |
| Organización de Responsabilidad del Productor (PRO) | Los PRO son las organizaciones encargadas de aplicar los sistemas de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) en representación de los productores. |
| Reciclaje | Recolección, clasificación y tratamiento de materiales desechados para su utilización en otros procesos de fabricación. El proceso de reciclaje es diferente para cada material y lugar. En muchos lugares del mundo existe un "sector informal" de reciclaje que captura materiales desechados valiosos y los reintroduce en la economía (Circular Economy Practitioner Guide 2023). |
| Normativa | Norma o directiva elaborada y mantenida por una autoridad. |
| Remanufactura | Proceso de recuperación, desmontaje, reparación e higienización de componentes para su reventa con prestaciones, calidad y especificaciones de "producto nuevo". Los productos remanufacturados no deben entenderse como "usados", "reacondicionados", "reparados" o "reutilizados" (Circular Economy Practitioner Guide 2023). |
| Reutilización | Utilización de un producto o material para una función distinta de aquella para la que se fabricó originalmente. (Circular Economy Practitioner Guide 2023). |
| Resolución | Declaración formal de opinión o decisión de emprender una acción. En el contexto de una práctica legislativa, la "resolución" no es más que una forma en la que un órgano legislativo expresa una opinión o un propósito con respecto a un asunto o tema determinado que tiene carácter temporal (LII 2023). |
| Reúso | Utilización de un material o producto previamente usado, sin ningún proceso de transformación. |

Glosario

Logística inversa

Proceso de recolección y agrupación de productos, componentes o materiales al final de su vida útil para su reutilización, reciclaje y devolución. La logística inversa cierra el ciclo. Los programas de recolección post-consumo, las garantías y las devolución de productos defectuosos requieren una logística inversa para que el producto vuelva del consumidor al fabricante. (Circular Economy Practitioner Guide 2023).

Batería secundaria

Las baterías secundarias son eléctricamente recargables. La aplicación más común es el uso de baterías de plomo-ácido en automóviles con fines de arranque, iluminación y encendido (SLI). Las baterías de níquel-cadmio, níquel-hidruro metálico y litio están ganando grandes secciones de mercado (Kordesch and Taucher-Mautner 2009).

Residuos de manipulación especial

Residuos generados en procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados como residuos sólidos urbanos o peligrosos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos (SEMARNAT 2020).

Sistema de recolección post-consumo

Iniciativa organizada por un fabricante o minorista, para recoger productos o materiales usados de los consumidores y reintroducirlos en el ciclo original de procesamiento y fabricación. (Circular Economy Practitioner Guide 2023).

Baterías de iones de litio usadas (ULIB)

Algunas de estas baterías tienen el potencial de ser reusadas o reutilizadas para una subsecuente utilización de su material.

Resumen ejecutivo

Trasfondo

La creciente demanda de baterías de iones de litio (LIB) debida al crecimiento de la demanda de vehículos eléctricos, equipos electrónicos y almacenamiento para fuentes de energía renovables ha generado inquietudes sobre la necesidad una adecuada disposición final de estas baterías. Actualmente, solo la mitad de las LIB que llegan al final de su vida útil en todo el mundo llegan a empresas de reciclaje. Las LIB se consideran desechos peligrosos debido a su alta densidad energética y contenido de sustancias peligrosas, así como de electrolitos inflamables. Su manejo disposición inadecuados pueden provocar contaminación ambiental e incendios. Se necesita con urgencia una gestión eficaz y segura del final de la vida útil, junto con medidas que faciliten la extensión de la vida útil y la recuperación de materiales, especialmente en países donde aún no se han implementado las mejores para el manejo de baterías al final de su vida útil.

La demanda de baterías de iones de litio está creciendo en América Latina y el Caribe debido al aumento en la producción de energía renovable y vehículos eléctricos. La región tiene objetivos ambiciosos para la mitigación del cambio climático y la producción de energía renovable, y se espera que la generación de energía solar y eólica aumente en un 550 % para el año 2030 (con respecto a niveles del 2015). El uso de sistemas de almacenamiento de energía basados en baterías es crucial para alcanzar estos objetivos.

La región posee el 67% de las reservas mundiales de litio. Mientras que la minería representa un factor económico importante en algunas áreas de la región, también tiene impactos en el medio ambiente y las comunidades locales¹. En esta situación, un enfoque más fuerte en la promoción, reúso y reciclaje de las baterías de iones de litio usadas (ULIB) puede lograr tanto una mayor creación de valor local y recuperación de recursos de dispositivos al final de su vida como una reducción en la demanda de la explotación de depósitos minerales.

La región carece de un marco regulatorio sólido para el manejo de baterías de iones de litio usadas y al final de su vida útil, lo que crea retos para el desarrollo de soluciones para el manejo adecuado del fin de la vida de las baterías. Mientras que estos vacíos en la regulación deben resolverse en el futuro cercano, también existe la necesidad de desarrollar un enfoque regional para mejorar las capacidades locales¹, facilitar el movimiento transfronterizo de las baterías y promover inversiones para una recolección, reúso y reciclaje de ULIB más eficiente. Este tipo de enfoques regionales son particularmente importantes en el caso de países con un tamaño limitado cuyos volúmenes de baterías al final de su vida serán insuficientes para justificar inversiones en sus propias capacidades de gestión de baterías.

¹ El alcance de los impactos sociales y ambientales de la minería dependen ampliamente del contexto local y del mineral extraído.



Objetivos

El objetivo de este proyecto es realizar una evaluación analítica de las prácticas globales y regionales para el reúso y el reciclaje de baterías de iones de litio usadas (ULIB), con un enfoque específico en la región de América Latina y el Caribe (ALC), junto con la identificación de oportunidades de crecimiento y la formulación de estrategias para la adopción de buenas prácticas en el reúso y el reciclaje de ULIB.

Los resultados proporcionarán una visión general integral de la cadena de valor de gestión de LIB al final de su vida útil para inversionistas, actores del sector privado, autoridades nacionales y agencias de cooperación internacional. La evaluación comparó las mejores prácticas globales en términos de tecnología y marcos regulatorios con las prácticas actuales en la región de ALC. Sobre la base de este análisis, se formularon recomendaciones clave para la promoción del reciclaje y el reúso de ULIB de manera segura y respetuosa con el medio ambiente. Las recomendaciones dan prioridad a extender la vida útil de las LIB, mitigar los impactos ambientales y prevenir prácticas de gestión de EoL deficientes en la región. Además de promover la cooperación regional, promover la incorporación de las baterías de iones de litio a los marcos regulatorios existentes y promover sistemas de Responsabilidad Extendida del Productor (REP).

El capítulo 1 del informe proporciona información general sobre los conceptos de economía circular, baterías de iones de litio y una visión general de las buenas prácticas para la gestión del final de la vida útil de las baterías de iones de litio. El capítulo 2 ofrece una visión general del enfoque metodológico seguido en el estudio; El capítulo 3 analiza el estado del arte global de las tecnologías y prácticas para la gestión ambientalmente responsable y segura de las baterías de litio, junto los marcos regulatorios que permitieron su introducción; El capítulo 4 presenta los resultados de la evaluación del panorama actual de las prácticas de reutilización, reaprovechamiento y reciclaje de las BIL en la región de ALC, los hallazgos más relevantes de este proceso se presentan en el capítulo 5.

El capítulo 6 presenta las perspectivas regionales para las LBI en la región, incluyendo la estimación de los volúmenes de baterías que llegarán al final de su vida útil en el período 2024-2050, junto con estimaciones de los volúmenes de LBI disponibles para reciclaje y reutilización en diferentes escenarios, esta sección también presenta estimaciones de los requisitos de inversión para establecer la infraestructura de reciclaje y reutilización requerida en cada escenario. El capítulo 7 finaliza el informe proporcionando una serie de recomendaciones en áreas críticas para apoyar la implementación de las mejores prácticas para la EoL de las ULIB en la región.



Metodología

Este informe se elaboró a través de investigaciones documentales, visitas de campo, la elaboración de casos de estudio y entrevistas con actores clave de la región. La evaluación de las prácticas de reúso, reutilización y reciclaje de ULIB en ALC se realizó a través de una revisión documental inicial destinada a obtener una evaluación regional no exhaustiva sobre el tema. Los criterios de selección incluyeron marcos regulatorios, esquemas dedicados de responsabilidad extendida del productor para baterías, infraestructura de reciclaje para ULIB, desarrollos relevantes en objetivos nacionales de movilidad eléctrica y estrategias de electrificación rural/fuera de la red.

La investigación documental proporcionó una descripción general del estado actual de las prácticas de reúso, reutilización y reciclaje de ULIB en ALC. Sobre la base de esta información, se eligieron cuatro países para realizar estudios de casos en profundidad: Chile, Colombia, Costa Rica y México. Se realizaron entrevistas con actores clave en cada país utilizando un enfoque semiestructurado para obtener una comprensión más profunda del entorno regulatorio, las capacidades de gestión de baterías usadas y los desarrollos en curso. El objetivo era recopilar más información e identificar a los actores más importantes de la región. La información recopilada de estas entrevistas ayudó a desarrollar una comprensión más completa de la

situación en cada país. Un análisis de las diferencias entre la evaluación de la situación actual de la región de ALC y las mejores prácticas mundiales permitió elaborar recomendaciones y necesidades de capacidad para la región.

El informe también incluyó el mapeo de partes interesadas, como parte de la evaluación regional utilizando el Análisis de Redes Sociales (SNA), una técnica que representa visualmente las relaciones sociales y brinda información sobre las redes de actores. El mapeo de actores complementó la información recopilada durante la fase de entrevistas y se utilizó para identificar a los actores clave dentro de la red.

Las estimaciones de los volúmenes de baterías, las capacidades de reciclaje y reutilización necesarias y los requisitos de inversión se elaboraron mediante el análisis del comportamiento histórico y previsto de tres sectores clave de generación de baterías en la región: la energía solar, la energía eólica y los vehículos eléctricos. La demanda de almacenamiento de energía asociada a estos sectores se convirtió en su equivalente en masa de baterías y, a continuación, en masa de baterías que alcanza su EoL, lo que permitió formular un caso de referencia y elaborar tres escenarios diferentes para las tasas de recogida, reciclaje y reutilización de baterías.



Resultados

- Actualmente, los procesos de reciclaje de baterías de iones de litio (LIB) en la región de América Latina y el Caribe (ALC) se limitan al pretratamiento mecánico y la separación de diferentes fracciones.
- La región requerirá de inversiones adicionales para ampliar las plantas de reciclaje de ULIB, esto debido al incremento esperado a largo plazo en los volúmenes de baterías de iones de litio que alcanzarán el final de su vida útil.
- La creciente cantidad y relevancia de las baterías LFP podría hacer que los procesos de reciclaje dejen de ser rentables debido a que contienen una menor proporción de materiales valiosos que otros tipos de baterías de iones de litio. Para mitigar estos impactos económicos, instrumentos financieros adicionales, como los sistemas de responsabilidad extendida del productor (REP) serán necesarios.
- Existe la necesidad de una mejor información y apoyo de los actores gubernamentales en el desarrollo de medidas centralizadas para el almacenamiento, embalaje y transporte seguros de las baterías de iones de litio usadas (ULIB).
- Los esfuerzos actuales en la región para la gestión de EoL de ULIB se centran en el reciclaje, mientras que las iniciativas de reutilización (la mayoría al nivel de start-up) reciben poco apoyo.
- La rastreabilidad de los volúmenes de LIB al final de su vida es muy baja en la región debido a la naturaleza informal de grandes segmentos del sector de manejo y reciclaje de residuos en la región.
- Actualmente hay poca cooperación regional entre países vecinos para mejorar las prácticas de gestión del fin de la vida útil para LIB, a excepción de algunos acuerdos comerciales bilaterales y de cooperación para la transferencia de tecnología.
- Las pequeñas y medianas empresas en ALC carecen de capacidades administrativas para aplicar los procedimientos de Consentimiento Fundamentado Previo para los movimientos transfronterizos de las ULIB recolectadas. Este procedimiento se requiere para organizar movimientos de residuos peligrosos a través de fronteras internacionales y por lo tanto es una precondition importante para una cooperación a través de fronteras bien establecida y controlada para el manejo de baterías al final de su vida.
- La recolección de baterías en la región se ve obstaculizada por el hecho de que la mayoría de los actores involucrados en el reciclaje deben cobrar tarifas de entrada para cubrir los costos de una gestión adecuada del final de la vida útil de las baterías, a lo que muchos usuarios se muestran reacios a pagar. Esta situación, junto con la ausencia de normas para la apropiada disposición de las baterías y de mecanismos para su cumplimiento, representa una barrera para el impulso a la recolección y la gestión ambientalmente responsable de las baterías. Adicionalmente, estas limitaciones resultan en un número reducido de actores, por lo que la gestión de las baterías implica costos significativos de transporte para los pocos operadores activos, lo que incrementa aún más los costos.
- Se ha estimado que entre 6.6 y 7.5 millones de toneladas de baterías de iones de litio alcanzarán el final de su vida útil en ALC en el periodo comprendido entre el año 2024 y 2050.

- La implementación de buenas prácticas para la reutilización y el reciclaje de ULIB en la región de ALC podría reducir hasta 2.1 millones de toneladas la cantidad de ULIB que llegan al final de su vida útil para 2050 (0.7 millones de toneladas en un escenario más conservador) y permitir que la región recicle hasta 2.8 millones de toneladas de ULIB entre 2024 y 2050 (1.5 millones de toneladas en un escenario más conservador).
- Las necesidades de inversión para establecer las capacidades de reciclaje necesarias para toda la región en el periodo 2024-2050 oscilan entre 353 y 462 millones de dólares americanos sólo en costos de capital (Entre 188 y 247 millones de dólares en un escenario más conservador).
- Las necesidades de inversión para establecer las capacidades de reuso y reutilización de baterías en la región en el periodo 2024-2050 oscilan entre 949 y 1.243 millones de dólares americanos en costos de inversión y costos operativos (entre 237 y 311 millones de dólares en un escenario más conservador)



Recomendaciones

- Apoyar a los actores del sector público en la integración de los requisitos de las baterías de litio en las normas nacionales de gestión de residuos, el establecimiento sistemas obligatorios de responsabilidad extendida del productor (REP) y la implementación de los marcos regulatorios nacionales específicos para baterías.
- Promover la gestión segura y ambientalmente responsable de las baterías de litio a través de regulaciones que promuevan el reuso/reutilización de baterías, tasas de recuperación obligatorias y el uso de materiales reciclados en baterías nuevas.
- Realizar conferencias y talleres regionales enfocados en la gestión del final de la vida, facilitando el intercambio de buenas prácticas, particularmente en relación a sistemas de recolección efectivos y aplicables, junto con plataformas colaborativas.
- Fomentar la creación de grupos nacionales para soluciones de economía circular y grupos de trabajo sobre regulación para fomentar el intercambio de conocimientos, la cooperación entre actores y el desarrollo de regulaciones específicas para la gestión de baterías de litio en países con un creciente número de baterías usadas.
- Apoyar la movilización de inversiones y fondos hacia instalaciones de reuso y reciclaje de pequeña y mediana escala.
- Brindar capacitación específica a los actores involucrados en la recolección y el transporte de baterías de litio para garantizar la implementación de buenas prácticas.
- Capacitar a las autoridades nacionales, las agencias ambientales, los recolectores y los transportadores en las áreas de buenas prácticas y el cumplimiento de las reglamentaciones pertinentes, como el Convenio de Basilea, para facilitar el movimiento de baterías usadas dentro de la región.



1. Contextualización



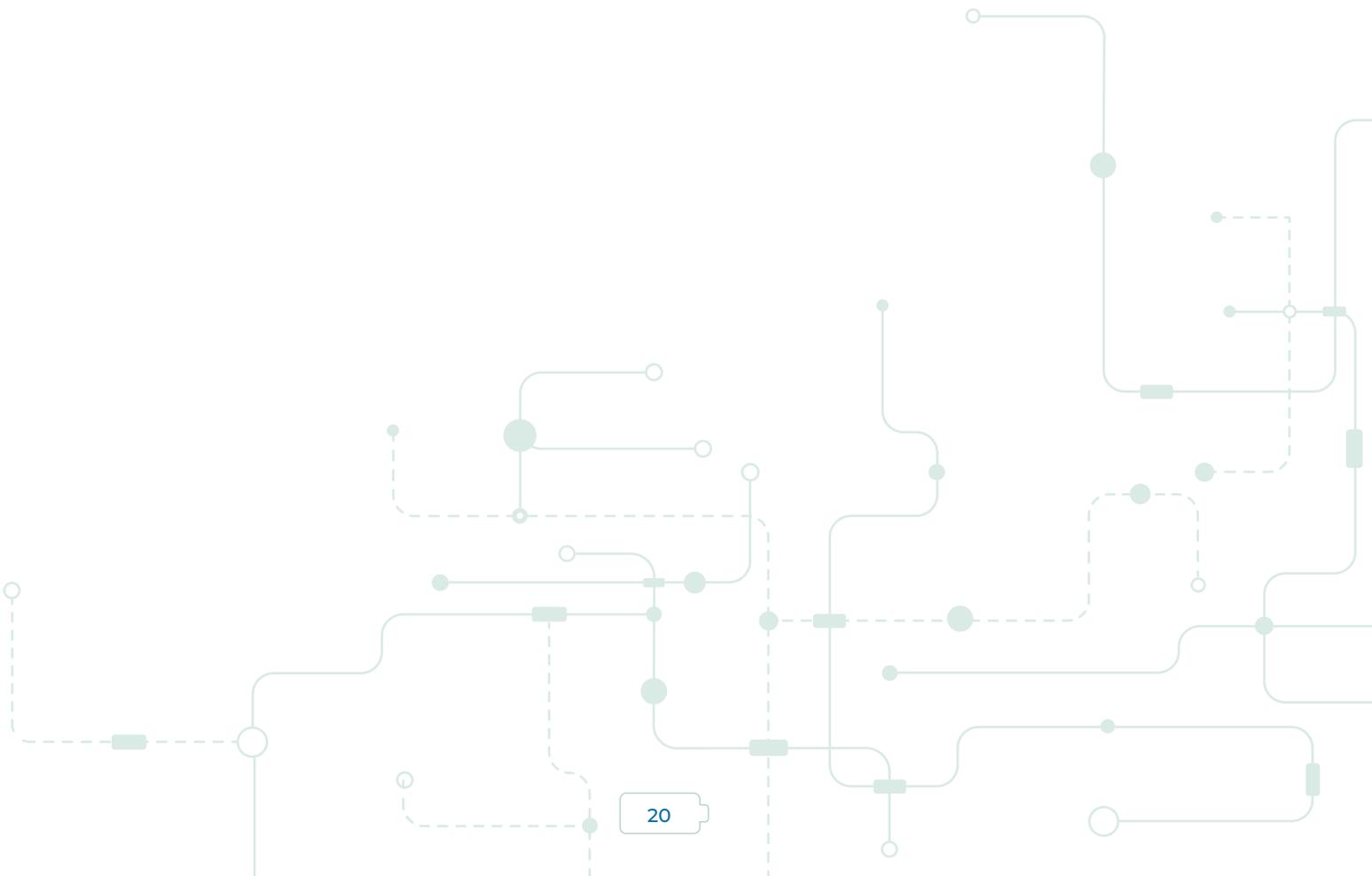
La necesidad de fomentar las prácticas de reuso y reciclaje de las baterías de iones de litio (LIB) es cada vez más importante a medida que aumenta la demanda de vehículos eléctricos (EV), productos electrónicos y fuentes de energía renovables (RE) (entre otros sectores). Las baterías de iones de litio se utilizan actualmente en una gran variedad de productos de consumo (por ejemplo, teléfonos móviles, ordenadores portátiles, etc.), ya que son el tipo de batería recargable más utilizado. El uso de baterías de iones de litio no ha dejado de crecer en la última década, impulsado por el reciente crecimiento exponencial del sector de los EV, con previsiones mundiales de 140 millones de EV para 2030 y aproximadamente 11 millones de toneladas métricas de baterías de iones de litio para 2030 (Jacoby 2019; IEA 2023). Además, las LIB desempeñan un papel clave en la transición energética mundial, se espera que la demanda mundial de litio crezca 42 veces entre 2020 y 2040 en un escenario climático que cumpla el Acuerdo de París, y aún más en un escenario en el que se alcance el objetivo de llegar a las "emisiones netas cero" en 2050 (Blakemore et al. 2022). Esta situación ha suscitado una preocupación mundial en relación con la correcta gestión del fin de la vida (EoL) de estas baterías una vez que alcanzan el final de su vida útil.

En 2018, solo la mitad de todas las LIB que alcanzaron el final de su vida útil a nivel mundial fueron recicladas, y una cantidad significativa fue desechada, teniendo en cuenta que el número de baterías en aplicaciones de segunda vida sigue siendo bajo. La capacidad instalada de baterías de segunda vida, que son ULIB utilizadas en aplicaciones menos exigentes, como el almacenamiento de energía para pequeños sistemas residenciales o soluciones más grandes a escala de la red, es inferior a 100 MWh en Europa, e inferior a 10 MWh en Norteamérica (Melin 2022). De ahí la urgente necesidad de garantizar su gestión eficaz y segura al final de su vida útil junto con enfoques que permitan la extensión de su vida útil y promuevan la recuperación de materiales, en particular para los países en los que aún no se han definido o aplicado buenas prácticas para la gestión al final de la vida útil de las baterías de iones de litio.



Las LIB suelen clasificarse como residuos peligrosos aunque contengan menos metales tóxicos que otros tipos de baterías, que contienen mayores concentraciones de plomo o cadmio. Las baterías de iones de litio son consideradas un residuo peligroso por entidades como la Agencia de Protección del Medio Ambiente de Estados Unidos (EPA) debido a su alta densidad energética y a su contenido en elementos peligrosos, como níquel, cobalto y otros productos químicos orgánicos como electrolitos tóxicos e inflamables que convierten las pilas y baterías de litio en un riesgo químico y eléctrico (Xu et al. 2008; U.S. Department of Transportation 2022). La gestión inadecuada de estas baterías conduce a la contaminación del medio ambiente por la infiltración de metales pesados a cuerpos submarinos o la liberación de gases venenosos como el fluoruro de hidrógeno (HF) a la atmósfera (Balasubramaniam et al. 2020). Además, las baterías de iones de litio son inflamables, y su eliminación en instalaciones municipales no equipadas para su procesamiento puede provocar incendios (EPA; OLEM 2019).

En América Latina y el Caribe (ALC), la demanda de LIB ha estado en constante crecimiento, ya que varios países de la región buscan incrementar su producción de energía renovable y promover la adopción de vehículos eléctricos (López Soto et al. 2022). Motivados por los ambiciosos objetivos nacionales para la mitigación del cambio climático y la producción de energía a partir de fuentes renovables, para 2030 se espera que la generación de energía solar y eólica en la región aumente en un 550% con respecto a los niveles de 2015, alcanzando una cuota del 18,9% de la generación total de electricidad, junto con el aumento global de la demanda regional de electricidad, que se estima se duplicará con respecto a los niveles de 2015 para 2040 (Graham et al. 2021). Además, la demanda de energías renovables sería aún mayor para alcanzar el objetivo climático de 1,5°, con un requerimiento adicional de 20 GW de energía solar y 12 GW de capacidad de generación eólica al año hasta 2050 (IRENA 2022c) donde las LIB desempeñarán un papel fundamental como la tecnología de almacenamiento estacionario más implementada, alcanzando el 50% de la cuota de almacenamiento de energía en los proyectos existentes y previstos (Graham et al. 2021).





En cuanto a los vehículos eléctricos, su adopción está en marcha en algunos mercados de la región. En 2021 se matricularon 25.000 nuevos EV, duplicando los niveles de 2020 (BloombergNEF 2022). En 2020, el 2,7% de los nuevos vehículos de pasajeros fueron EV en Costa Rica, seguido por Colombia con el 0,6% y Chile, donde alcanzaron el 0,5%. El mercado continuará su crecimiento, apoyado además por iniciativas y objetivos del sector público para incorporar vehículos de cero emisiones (ZEV), que incluyen: alcanzar el 100% de ventas de autobuses urbanos de cero emisiones para 2035 en Colombia, alcanzar el 100% de ventas de vehículos nuevos de cero emisiones en el año 2050 en México y en el 2035 en Chile (Kohli et al. 2022), mientras que en Costa Rica, de acuerdo con su Contribución Nacionalmente Determinada del 2020, para el año 2030 el 8% de la flota de vehículos ligeros privados e institucionales será eléctrica, estas medidas están complementadas con la puesta en funcionamiento de trenes eléctricos tanto de pasajeros como de carga.

Aunque el número de baterías de iones de litio ha aumentado considerablemente en la región, y se espera que continúe aumentando, las alternativas para una gestión ambientalmente responsable para el fin de la vida de las baterías son escasas. Entre otros factores, esto se debe a la falta de un marco normativo sólido dirigido a la gestión ambientalmente responsable de las baterías y a que la tasa de gestión adecuada de residuos sólidos en la región es de sólo el 55%. Si bien ha habido algunos esfuerzos para abordar estas cuestiones, la investigación sobre las prácticas mundiales y regionales para la reutilización y el reciclaje de baterías de iones de litio en América Latina y el Caribe ha sido limitada.

Esta situación exige un enfoque regional que mejore las capacidades y fomente la inversión para una recolección, reciclaje y reutilización más eficientes de las ULIB. Además, sin un marco normativo específico, la gestión inadecuada de estas baterías sólo podrá evitarse parcialmente y la presión sobre la extracción de recursos vírgenes de litio en la región continuará aumentando.

Promover el reúso y el reciclaje de las baterías de iones de litio tendrá muchas posibles repercusiones medioambientales y sociales positivas a largo plazo en la región, al reducir la demanda de litio virgen que debe obtenerse a través de la minería. Se espera que la explotación de los recursos de litio en la región de ALC aumente, ya que el 67% de las reservas mundiales de este metal se concentran en Bolivia, Argentina, Chile, México y Perú (USGS 2021). La extracción de recursos de litio en operaciones de minería de roca dura, que en la región ocurren solo en Brasil tienen varios impactos, como la contaminación del suelo y del aire y el consumo de recursos hídricos, necesarios para las comunidades circundantes, incluyendo el aumento en las emisiones producto de la minería y el procesamiento de minerales, como las emisiones de SO_x de la fundición de minerales sulfurados (Dunn et al. 2012; Rahman et al. 2017). En este contexto, los procesos de reciclaje representan una opción viable para reintroducir los componentes de las baterías de iones de litio en el ciclo económico, reduciendo así la necesidad de materias primas (Velázquez-Martínez et al. 2019).



El objetivo de este proyecto es la evaluación analítica de las prácticas mundiales y regionales de reuso y reciclaje de baterías de iones de litio. Esta revisión se centra especialmente en las buenas prácticas y tecnologías disponibles, así como en los instrumentos normativos que facilitan su introducción. La revisión se centra específicamente en la región de América Latina y el Caribe (ALC) con el objetivo de evaluar el estado actual de los flujos de baterías de iones de litio al final de su vida útil (EoL), sus perspectivas de crecimiento y proporcionar estrategias para la adopción de buenas prácticas para la reutilización y el reciclaje dentro de la región.

Los resultados de esta revisión proporcionarán a inversionistas, representantes del sector privado, autoridades nacionales y agencias de cooperación internacional una visión global de la cadena de valor de la gestión del final de la vida útil de las LIB. Las buenas prácticas mundiales identificadas en términos de tecnología y marcos normativos propicios se contrastaron con las prácticas actuales en la región de ALC. Por último, se elaboraron recomendaciones con el objetivo de fomentar el reciclaje y el reuso de las ULIB de forma segura y respetuosa con el medio ambiente, dando prioridad a la extensión de su vida útil, la promoción de la recuperación de materiales y la mitigación de los impactos ambientales, así como a la prevención de la gestión deficiente del fin de la vida útil de las LIB en la región.

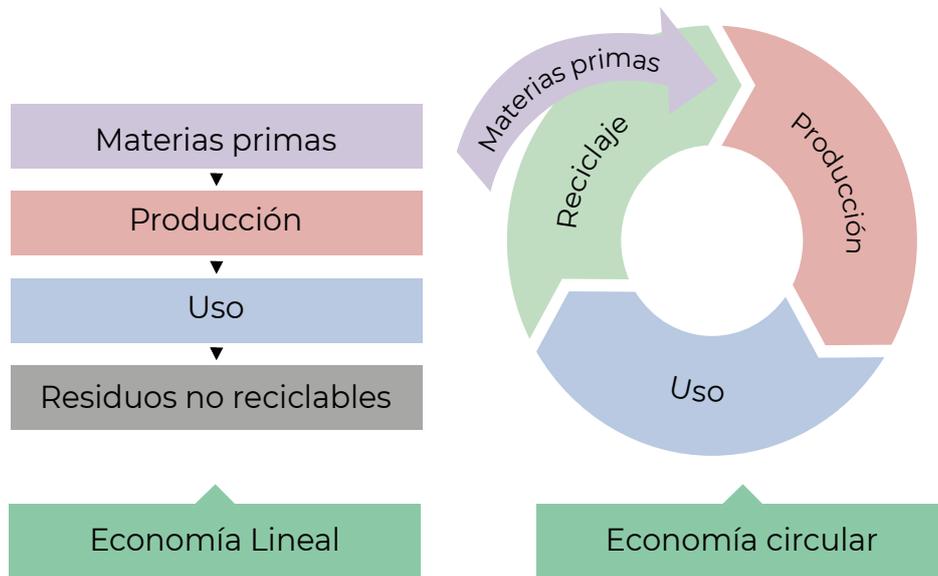
1.1 Consideraciones sobre la economía circular

La Economía Circular (EC) vincula el uso eficaz de los recursos al crecimiento económico y es un enfoque regenerativo destinado a reducir los residuos y a garantizar la sostenibilidad ecológica de los productos después de su uso. La creciente demanda de LIB ha suscitado preocupaciones respecto al medio ambiente y la cadena de suministro global. Algunos de los problemas derivados de la demanda actual y futura de LIB son los riesgos geopolíticos, los problemas medioambientales, conflictos sociales y presiones económicas:

- Los materiales críticos utilizados para el ánodo y el cátodo de las LIB, como el litio, el níquel, el cobalto, etc. son finitos y se concentran en países que pueden tener una normativa ambiental y de salud menos estrictas.
- Contaminación vinculada a la gestión incorrecta de las ULIB que contienen materiales tóxicos.
- Uso del agua en la extracción y tratamiento del litio.
- A pesar de la necesidad de utilizar el litio de forma más eficiente, aproximadamente el 90% termina en vertederos, en parte debido a limitaciones técnicas, económicas, normativas y problemas logísticos (Costa et al. 2021). A medida que aumentan los problemas medioambientales, las partes interesadas, los responsables políticos y los reguladores han empezado a identificar los obstáculos a una economía circular para las LIB, junto con soluciones para impulsar y permitir una gestión ambientalmente sostenible de las ULIB.
- En este contexto, el concepto de economía circular para la industria de las LIB se refiere a la transición de un sistema económico lineal de "tomar-hacer-consumir-eliminar" a un sistema circular que permita una mayor vida útil, un alto rendimiento y la reutilización o recuperación de materiales críticos (véase la Figura 1-1) (Curtis et al. 2021).



Figura 1-1: De la economía lineal (izquierda) a la economía circular (derecha)



Fuente: Government of the Netherlands (2016)

Una batería de iones de litio es un tipo de batería recargable en la que los iones de litio se desplazan del electrodo positivo al negativo durante la carga y viceversa al descargarse (Qiao and Wei 2012b). Cada celda está formada por un compuesto de metal de transición como cátodo (electrodo positivo), grafito como ánodo (electrodo negativo), aluminio y cobre como colectores de corriente, una sal de litio disuelta en solventes orgánicos como electrolito, un separador polimérico y una carcasa metálica (Tarascon and Armand 2001; Reddy 2011). Una batería de iones de litio (o paquete de baterías) está formada por una o varias celdas individuales agrupadas. Como el enfoque del proceso de reciclaje de ULIB está impulsado por el valor de mercado, el cobalto y las fracciones metálicas representan actualmente el principal interés del mercado, con procesos de reciclaje emergentes que se centran también en la recuperación de litio, particularmente en formaciones que contienen cobalto (Ober 2018; Velázquez-Martínez et al. 2019; Gaines and Dunn 2014)



1.2 Tipos de baterías de iones de litio (LIB)

Las baterías de iones de litio se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones y se presentan en diferentes tamaños, diseños y subtipos. Desde el punto de vista químico, las baterías de iones de litio pueden diferenciarse en los principales subtipos que se enumeran en la Tabla 1.1. Las baterías de litio-cobalto (LCO) se utilizan principalmente en equipos eléctricos y electrónicos móviles. Estas baterías son bastante atractivas para el reciclaje, ya que contienen altas concentraciones de cobalto, que es uno de los principales portadores de valor de las baterías de iones de litio que alcanzan el fin de la vida. Las baterías de óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC) y óxido de aluminio de litio-níquel-cobalto (NCA) también contienen cobalto, pero en concentraciones más bajas. En cambio, los cátodos están compuestos por una mezcla de cobalto y otras sustancias, de las cuales el níquel (baterías NMC) también tiene un valor considerable para las empresas recicladoras. Las baterías de litio-ferrofosfato (LFP) y de óxido de litio-manganeso (LMO) están totalmente libres de cobalto y níquel y, en su lugar, utilizan fosfato de hierro y óxido de manganeso como recursos para la producción de material catódico. Los costes del material del cátodo tienen implicaciones considerables en los costes totales de producción de las baterías. Debido a los altos precios de las materias primas en los últimos meses y años, las aplicaciones sensibles al precio cambiaron cada vez más hacia el uso de baterías LFP más baratas, lo que llevó a un rápido aumento de la cuota de mercado de este subtipo del 5% en 2019 a alrededor del 40% en 2022. Este cambio también se vio favorecido por la mejora de las densidades energéticas de este subtipo (Wunderlich-Pfeiffer 12 Oct 2022).

Tabla 1-1: Principales subtipos actuales de químicas de baterías de iones de litio

| Química de la batería | | Densidades de energía | Aplicaciones comunes |
|-----------------------|---|-----------------------|---|
| LCO | Litio-cobalto | 150-200 Wh/kg | Teléfonos móviles, computadoras portátiles, cámaras |
| NMC | Óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto | 150-260 Wh/kg | Herramientas eléctricas, bicicletas eléctricas, vehículos eléctricos |
| NCA | Óxido de aluminio de litio-níquel-cobalto | 200-260 Wh/kg | Dispositivos médicos, baterías industriales, vehículos eléctricos |
| LFP | Litio-ferrofosfato | 90-180 Wh/kg | Aplicaciones estacionarias (por ejemplo, baterías de almacenamiento de energía solar), autobuses eléctricos, vehículos eléctricos |
| LMO | Óxido de litio-manganeso | 100-150 Wh/kg | Aplicaciones estacionarias, vehículos eléctricos (sin cuota de mercado relevante) |

Fuente: (Battery University 2021; Wunderlich-Pfeiffer 12 Oct 2022; electrive.net 1 Apr 2022)



Las baterías de iones de litio también presentan una gran variedad en cuanto a tamaños y diseños, incluidas las celdas planas o de bolsa utilizadas en teléfonos móviles o tabletas, las celdas cilíndricas y los paquetes de baterías de mayor tamaño compuestos por numerosas celdas y módulos (véase Figura 1-2).

Figura 1-2: Diferentes tipos y diseños de baterías de iones de litio



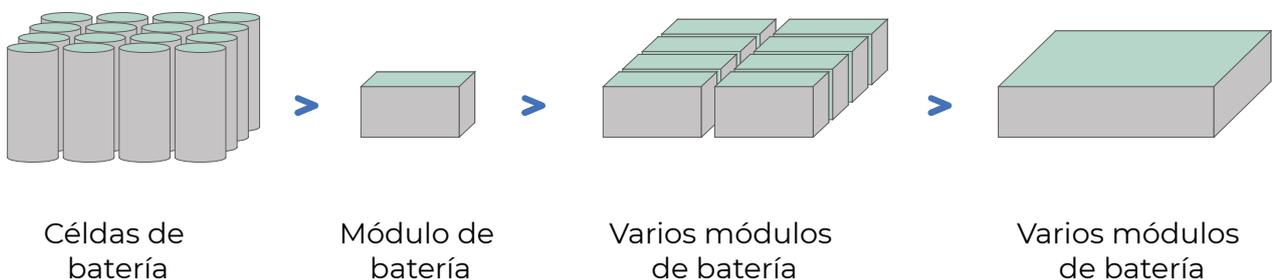
Fuente: Oeko-Institut

- 1: Baterías de iones de litio de teléfonos móviles
- 2: Batería de iones de litio de una herramienta eléctrica
- 3: Celdas cilíndricas ensambladas en baterías más grandes (retractiladas)
- 4: Celdas cilíndricas ensambladas en una batería más grande con un sistema de gestión de baterías (BMS)



Las baterías de los vehículos eléctricos suelen pesar varios cientos de kilogramos y se componen de numerosas celdas. Las celdas suelen ser cilíndricas, pero pueden tener otras formas (prismáticas, en forma de aspa, etc.) y se ensamblan en módulos de batería. Varios módulos se combinan en un paquete de baterías encerrado en una carcasa y equipado con un sistema de gestión de la batería (BMS) (véase la Figura 1-3). Estos paquetes de baterías se denominan comúnmente baterías para vehículos eléctricos. La carcasa no sólo cumple funciones de protección, sino que también debe conducir el calor al sistema de refrigeración para proteger del sobrecalentamiento. Por ello, muchos paquetes de baterías para vehículos eléctricos tienen elementos de aluminio que pueden absorber y eliminar el calor generado a nivel de celda y módulo.

Figura 1-3: Composición de las baterías de los vehículos eléctricos (simplificada)



Fuente: Oeko-Institut

1.3 Buenas prácticas en la gestión del final de la vida útil de las LIB

La Figura 1-4 ofrece una visión general de una cadena de suministro inversa optimizada para baterías de vehículos eléctricos:

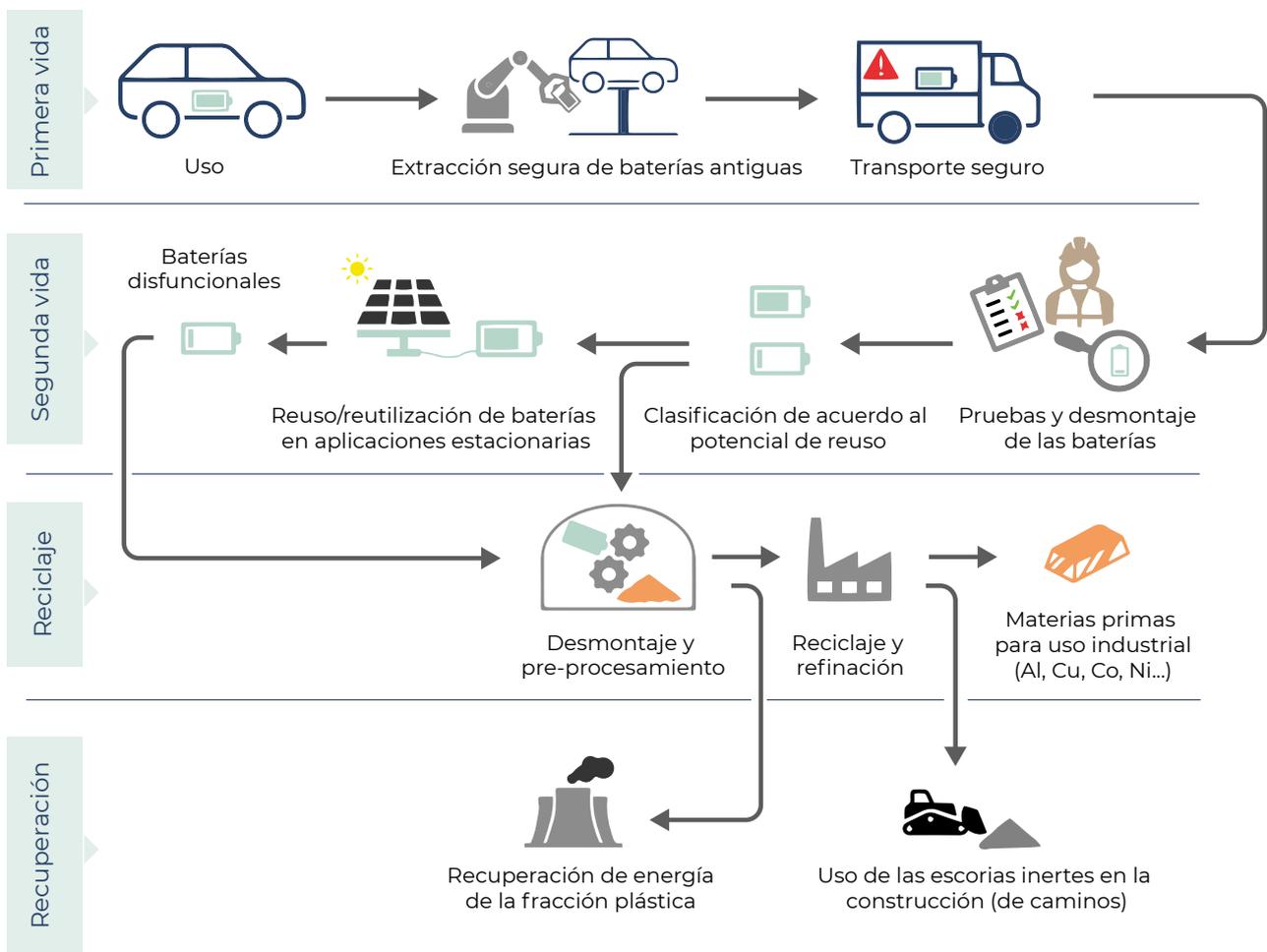
- Una vez que las baterías han alcanzado una capacidad restante demasiado baja para el funcionamiento del vehículo, se extraen, empacan y envían de forma segura a un centro autorizado de pruebas y tratamiento de baterías.
- La empresa receptora realiza una prueba del "estado de salud" de las baterías y sus módulos. Los módulos reutilizables se emplean para ensamblar soluciones de almacenamiento de segunda vida (una práctica también denominada "reutilización"). Los demás módulos y componentes de las baterías se destinan al reciclaje.
- Tras varios años más de uso en aplicaciones de segunda vida, las baterías ya no tienen ningún valor de reuso y también se entregan al reciclaje.
- El reciclaje comienza con el desmontaje manual de las baterías más grandes. El procesamiento posterior se realiza en condiciones seguras en un entorno sellado, incluidos controles de polvo y emisiones. La mayoría de los procesos de reciclaje implican un tratamiento mecánico previo en el que los módulos y las celdas de las baterías se trituran y clasifican en las principales fracciones de salida, a saber, cobre, aluminio, plásticos y masa negra².

² La masa negra se refiere a un polvo negro obtenido tras el preprocesamiento mecánico de las baterías de iones de litio usadas. Contiene los materiales activos del ánodo y el cátodo de las baterías. Dependiendo de la química de la batería, contiene grafito, litio y metales como cobalto, níquel o manganeso en diferentes composiciones.



- La calidad de los plásticos recuperados suele ser demasiado baja para su reciclaje, por lo que este material se destina a la recuperación de energía³.
- El aluminio, el cobre y la masa negra pasan a procesos especializados de fundición y refinación que generan materias primas para la producción industrial.
- Los subproductos inertes de las operaciones de fundición (escorias) pueden utilizarse en la construcción de carreteras como grava o arena.

Figura 1-4: Cadena de suministro inversa optimizada para baterías de vehículos eléctricos



Fuente: Oeko-Institut

³ La recuperación energética es un término habitual en la gestión de residuos y engloba todos los procesos en los que se aprovecha el poder calorífico. Principalmente mediante la combustión. Esto puede ocurrir en hornos de cemento, incineradoras de residuos, co-procesamiento en plantas de carbón, entre otros.



El diagrama de flujo anterior representa un modelo simplificado y no tiene en cuenta posibles pasos adicionales, corrientes laterales y variaciones. Entre otras, se incluyen:

- Las baterías al final de su vida útil también deben descargarse antes de su desmontaje y procesamiento. Esto puede realizarse antes del envío (en el punto en el que las baterías se retiran de los vehículos) o como primer paso de gestión antes del desmontaje. En cualquier caso, la descarga profunda de baterías industriales y de vehículos eléctricos es una operación de alta tensión y sólo debe ser realizada por personal entrenado.
- La descarga profunda de las baterías suele ser un reto por varias razones: las baterías más grandes tienen una protección contra la descarga profunda, que debe ser desactivada accediendo al sistema de gestión de la batería.
- Las pruebas de las baterías pueden basarse en un protocolo de pruebas para módulos y celdas o utilizar los datos de uso registrados guardados en el sistema de gestión de la batería (BMS) o en una solución de almacenamiento en la nube. Esta última opción podría permitir el reúso/reutilización de la batería sin actividades de desmontaje (véase la sección 3.2).
- Existen varios enfoques para el proceso de reciclaje. Mientras que la mayoría de ellos se refieren al preprocesamiento mecánico, otros inician el reciclaje con métodos térmicos o pirometalúrgicos, lo que tiene consecuencias para diversos materiales implicados, como el aluminio y los plásticos (véase también la sección 3.3).

El modelo indicado arriba también puede aplicarse a otros tipos de baterías de iones de litio. No obstante, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- En el caso de las baterías más pequeñas (por ejemplo, de teléfonos celulares), la descarga también es difícil, ya que los contactos suelen estar corroídos o se corroen durante los intentos de descarga (por ejemplo, en baños de agua salada).
- Las baterías de iones de litio pequeñas (por ejemplo, de equipos eléctricos y electrónicos) suelen tener un bajo potencial de reúso. Por ello, las pruebas y el reúso/reutilización suelen limitarse a otros tipos de baterías, como las industriales y las de vehículos eléctricos.
- Las baterías pequeñas (pilas, paquetes pequeños) tampoco requieren ser desmontadas antes del tratamiento.

En general, los esquemas de recolección posconsumo, especialmente los que se ajustan a los principios de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), desempeñan un papel clave para garantizar que las responsabilidades y los costes de una buena gestión del final de la vida útil de las ULIB se especifiquen claramente y se apliquen de forma eficaz (véase también la sección 3.4.4). En los países en los que ya existen sistemas de REP para las LIB usadas, la recolección y el transporte seguro están prescritos por las obligaciones legales vigentes (véase también el apartado 3.4). Aunque el mismo planteamiento puede adoptarse de forma voluntaria en los países que no cuentan con sistemas de REP, garantizar una gestión eficaz de las pilas ULIB podría resultar más difícil.



2. Metodología



La visión general sobre el estado actual de la tecnología para el reciclaje de ULIB (capítulo 3) se obtuvo mediante una investigación documental y una revisión de la literatura técnica. Gracias al trabajo previo del Oeko-Institut y a su experiencia en el campo del reciclaje de baterías, los autores pudieron complementar la revisión teórica con impresiones de primera mano y conocimientos adquiridos a través de varias visitas de campo a diferentes plantas de reciclaje y operaciones de reuso en todo el mundo (véanse las fotografías incluidas en el informe). La selección de marcos normativos (capítulo 3.4) se basó en un alto nivel de experiencia en las respectivas jurisdicciones. Ya sea por el elevado volumen de pilas usadas (China), por la evolución gradual del marco a lo largo del tiempo (Alemania) o por un proceso de revisión intenso y actualizado de todo el marco (UE).

La evaluación de las prácticas de reutilización, reuso y reciclaje de ULIB en ALC (capítulo 4) se llevó a cabo mediante una investigación documental inicial destinada a obtener una selección regional no exhaustiva sobre el tema. Los criterios de selección fueron determinados por los aspectos habilitantes relevantes en las mejores prácticas globales para el reuso y el reciclaje de las baterías de iones de litio (LIB). Entre ellos se incluyen los marcos normativos existentes (incluyendo LIB), los programas específicos de Responsabilidad Extendida del Productor para baterías, la infraestructura de reciclaje para ULIB, así como los avances relevantes en términos de objetivos nacionales de movilidad eléctrica y estrategias para la electrificación áreas rurales y sin conexión a la red (como indicadores de la necesidad proyectada de gestión de LIB al final de su vida).

Con la información recopilada a través de la investigación documental fue posible obtener una visión general del estado actual del reuso, reutilización y reciclaje de ULIB en ALC. Como siguiente paso, se identificaron los cuatro (4) países más interesantes y relevantes para desarrollar estudios de caso en profundidad. Para los países seleccionados, la investigación se complementó con entrevistas a los principales



actores (véase el Anexo I). Se realizaron entrevistas semiestructuradas para recabar más información sobre la situación en determinados países e identificar a los actores más relevantes de la región. El objetivo de esta fase fue comprender mejor la realidad en términos de eficacia de la regulación, capacidad de gestión del fin de la vida útil de las baterías de las actividades y la evolución actual en cada país.

Como último paso en la evaluación de las prácticas regionales, se llevó a cabo un mapeo de los actores relevantes. El mapa de actores relevantes se llevó a cabo mediante la metodología del Análisis de Redes Sociales (SNA). El SNA es un método utilizado para proporcionar una representación visual de las relaciones sociales -localización y agrupación de actores- y obtener información sobre los límites de las redes de actores, y que ha demostrado su utilidad en una amplia gama de campos de las ciencias sociales (Borgatti 2009). La premisa básica del SNA es que los actores que están conectados indirectamente en el contexto de las redes temáticas pueden influirse mutuamente (Marin & Wellman 2011). Por lo tanto, el SNA resulta útil para comprender la dinámica de las redes e identificar a los actores relevantes cuando se aplica a un contexto específico como el objeto de esta tarea. Además de las partes interesadas identificadas en el análisis regional (véase 4.1), el mapeo de partes interesadas se complementó con la información recopilada durante la fase de entrevistas.

Las perspectivas regionales (véase el capítulo 6) se elaboraron recopilando datos regionales de tres sectores identificados como críticos para la generación de LIB de gran tamaño (energía solar fotovoltaica, energía eólica y vehículos eléctricos). Los datos recopilados se utilizaron para estimar el comportamiento de estos tres sectores

en el periodo 2024-2050 en términos de requerimientos de demanda (demanda de capacidad instalada de energía fotovoltaica o eólica y demanda de nuevos vehículos eléctricos), junto con la demanda equivalente de almacenamiento de LIB, que posteriormente se convirtió en requisitos de masa de batería equivalente. Esto permitió estimar la masa de baterías que entraría en el mercado de ALC cada año durante el periodo de estimación y la masa de baterías que llegaría al final de su vida útil. Esta evaluación se apoyó además con la formulación de una línea base y tres escenarios diferentes, cada uno asumiendo diferentes tasas de recolección, reciclaje y reúso de ULIB. Posteriormente, la masa de baterías recicladas y reusadas se utilizó como dato de entrada para estimar los beneficios económicos previstos y los requisitos de inversión para alcanzar los valores requisitos de reciclaje y reúso de las ULIB de cada escenario. Todo el enfoque metodológico para la elaboración de este capítulo y los supuestos utilizados se describen en detalle en el Anexo IV.

Las recomendaciones y capacidades necesarias (véase el capítulo 7) se elaboraron identificando las principales lagunas entre las perspectivas regionales y las mejores prácticas mundiales identificadas para el reúso, el reciclaje y la reutilización. Las recomendaciones se dividieron en cuatro categorías, y dentro de cada categoría las recomendaciones se dividieron en intervenciones primarias y secundarias.





3. Panorama del estado del arte global y de las prácticas existentes en materia de EoL de baterías de iones de litio



3.1 Recolección y transporte

La recolección de baterías de ion-litio usadas y al final de su vida útil depende en gran medida de la legislación nacional y del sistema de gestión de residuos. En general, muchos tipos de LIB al final de su vida útil no tienen suficiente valor material para resultar atractivos a los recolectores y empresas recicladoras. Aunque pueden generarse algunos ingresos de la recuperación de materiales, a menudo no cubren todos los costes de la logística inversa y las operaciones de reciclaje (Angliviél et al. 2021; Manhart et al. 2022). Por lo tanto, la recolección depende en gran medida de sistemas y normas obligatorios que deleguen la obligación de una recolección, transporte y un tratamiento responsables (que incluyan el reuso y el reciclaje) en actores claramente identificables. Esto suele hacerse a través de la legislación y la aplicación basadas en el principio de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP), por el que los fabricantes o importadores de las baterías y equipos que contienen baterías tienen la tarea de establecer y gestionar sistemas de recolección y garantizar que los volúmenes recolectados se traten de acuerdo con criterios definidos, como las tasas de reciclaje, el rendimiento medioambiental y la seguridad (véase también la sección 3.4).

En cuanto a la manipulación de las baterías de iones de litio usadas y al final de su vida útil, es importante tener en cuenta que dichas baterías contienen diversas sustancias de interés, incluidas sustancias que pueden causar quemaduras en la piel y lesiones oculares, que están clasificadas como altamente inflamables, que son sospechosas de causar cáncer y que pueden causar una reacción alérgica en la piel (Stahl et al. 2018). Además, las baterías de iones de litio usadas y al final de su vida útil conllevan importantes riesgos de incendio y explosión, derivados básicamente de su contenido de sustancias inflamables, así como de la posible carga residual. El sobrecalentamiento y los conatos de incendio se deben principalmente a la sobrecarga, la descarga profunda, las altas temperaturas o el estrés físico de las baterías. Los incendios en baterías de iones de litio pueden propagarse de una celda a las celdas y a módulos adyacentes y, por tanto,



conlleven el riesgo de que se produzcan incendios de mayor envergadura. Además, estos incendios suelen ser difíciles de controlar y extinguir, ya que el sobrecalentamiento puede desarrollarse en pocos segundos y debido a que el sobrecalentamiento de algunos materiales catódicos libera oxígeno, que puede mantener un incendio en la batería incluso bajo exclusión de aire (Manhart et al. 2018). Por estas razones, las baterías de iones de litio al final de su vida útil se clasifican como mercancías peligrosas en virtud del Acuerdo relativo al Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas por Carretera (Convenio ADR) y se consideran residuos peligrosos por muchos firmantes del Convenio de Basilea sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación⁴.

El almacenamiento y transporte de baterías de iones de litio usadas y al final de su vida útil están, por tanto, sujetos a diversas normativas internacionales y nacionales destinadas a minimizar los riesgos para la salud humana, la infraestructuras y el medio ambiente. A continuación se ofrece una visión general de las principales normas internacionales y buenas prácticas comunes. Es posible que se apliquen otros requisitos, en función de la legislación nacional o de las normas y procedimientos exigidos por otras partes, como compañías de seguros y agencias de transporte:

- Se prohíbe el transporte aéreo de pilas usadas a menos que lo aprueben el país de origen y el país de destino (RRC 2019).
- Para su transporte, las baterías al final de su vida útil deben empacarse en un sistema que sea termoaislante, resistente a las fugas, estabilizador y/o a prueba de golpes. La solución de empaque seleccionada debe cumplir los requisitos de seguridad del ADR, que deben ser confirmados por un organismo de certificación acreditado (Reneos 2022).
- Las baterías de iones de litio más pequeñas suelen empacarse en barriles aprobados por las Naciones Unidas (ONU), incrustados en arena o vermiculita. La arena/vermiculita separa las baterías, evita movimientos e impactos por golpes y absorbe el calor del sobrecalentamiento de las celdas. Las válvulas facilitan la liberación de la sobrepresión (véase la Figura 3-1).
- Las baterías dañadas que pesen más de 30 kg deben embalarse por separado.
- Los contenedores de transporte, así como los vehículos de transporte, deben etiquetarse con la clase de mercancía peligrosa adecuada (código ADR n° 9) y el código ONU (UN3480 Baterías de litio para reciclaje). Véase también Figura 3-2.
- El transporte a través de fronteras internacionales debe, en muchos casos, seguir el procedimiento de consentimiento previo informado del *Convenio de Basilea*, por el que las autoridades competentes (normalmente la autoridad responsable del medio ambiente) del país exportador notifican a las autoridades competentes de los países de tránsito y receptores antes del traslado. Los envíos de baterías usadas para su reutilización/reutilización sólo pueden quedar exentos de esta norma si van acompañados de una prueba de funcionalidad realizada por un tercero⁵.

⁴ Las baterías de iones de litio al final de su vida no figuran de manera explícita en los Anexos I al VIII del Convenio de Basilea. Sin embargo, algunas sustancias y sus características contenidas en las LIB (Por ejemplo, el electrolito consiste en hexafluorofosfato) si figuran en los Anexos I y III.

⁵ En consonancia con las Directrices técnicas sobre movimientos transfronterizos de residuos eléctricos y electrónicos y aparatos eléctricos y electrónicos usados, en particular en lo que respecta a la distinción entre residuos y no residuos con respecto al Convenio de Basilea. (2019).



Figura 3-1: Barriles utilizados habitualmente para almacenar y transportar baterías de iones de litio (izquierda) y concepto de incrustación de baterías en arena o vermiculita (derecha).



Fuente: Oeko-Institut

Figura 3-2: Codificación y adhesivos necesarios para el transporte de baterías de iones de litio al final de su vida útil



Fuente: Dominio público



Además del transporte, los centros logísticos de LIB usadas y al final de su vida útil deben tomar diversas medidas de precaución para mitigar los riesgos de incendio y garantizar la salud y seguridad en el lugar de trabajo. Esto implica (pero no se limita necesariamente a):

- Separación de las zonas de almacenamiento de baterías de las zonas donde se realizan otras funciones (por ejemplo, residenciales, oficinas);
- Minimización de la carga de fuego procedente de otros materiales (por ejemplo, ninguna estructura o mobiliario de madera o plástico);
- Otras medidas de seguridad contra incendios (detectores de humo, extintores adecuados, etc.);
- Medidas para evitar el calor y la humedad excesivos en las zonas de almacenamiento;
- Planes de preparación ante emergencias y entrenamientos;
- Medidas para evitar la acumulación de posibles fugas de gases de las baterías;
- Medidas para minimizar el riesgo de contacto directo del personal con materiales peligrosos de la batería (equipo de protección personal, estación de lavado de ojos, etc.);
- Entrenamientos periódicos en seguridad para los trabajadores y todo el personal visitante.

3.2 Reúso y reutilización

La capacidad de almacenamiento de las baterías de iones de litio se degrada con el tiempo, lo que suele llevar a situaciones en las que las baterías usadas se consideran inadecuadas para una determinada aplicación, mientras que siguen siendo apropiadas para otras. Esto suele ocurrir con las baterías utilizadas en el sector de la movilidad, donde la capacidad de la batería está relacionada con el kilometraje del vehículo. Las baterías de los vehículos eléctricos suelen considerarse inadecuadas cuando su capacidad disminuye hasta el 80% o el 70%, dependiendo de la batería y de la calidad del vehículo, entre otros factores, es probable que esto ocurra tras más de 10 años de uso (Zhu et al. 2021; Allred 2021). En ese momento, en el que se sustituyen las baterías de los EV o se desmantela todo el vehículo, la batería puede probarse y utilizarse para otros fines (almacenamiento estacionario). (Tankou et al. 2023). Esta denominada "reutilización" permite prolongar la vida útil de las baterías durante varios años más y puede tener múltiples efectos secundarios positivos, como el suministro de soluciones de almacenamiento de energía asequibles y la generación de oportunidades de negocio en operaciones locales de pruebas y reúso/reutilización. (Angliviél et al. 2021).



El reuso y la reutilización pueden ir más allá de las baterías de los vehículos eléctricos y llevarse a cabo, por ejemplo, con baterías industriales devueltas en garantía (por ejemplo, de instalaciones de energía solar). Normalmente, sólo una minoría de las celdas y módulos de las baterías defectuosas están dañados o no son aptos para su reuso/reutilización. (Kampker et al. 2021).

El reuso y la reutilización comienzan con una inspección exhaustiva tanto visual como técnica de las baterías entrantes, que incluye la recopilación de toda la información recuperable sobre las aplicaciones anteriores y el estado de salud de las baterías. Las baterías más grandes (baterías de vehículos eléctricos, baterías industriales) suelen registrar los datos de uso (ciclos de carga y descarga, régimen de temperatura, corriente de descarga, etc.) en el sistema de gestión de la batería (BMS) o en un sistema de almacenamiento en la nube. El acceso a esta información puede ser fundamental para conocer el estado de salud de una batería y facilitar enormemente los esfuerzos de reuso y reutilización. Sin embargo, el acceso a los datos del sistema de gestión de la batería no es universal y requiere de programas informáticos especializados y un acceso que, por lo general, sólo está disponible para los fabricantes y sus estrechos colaboradores (Zhu et al. 2021).

Por lo tanto, la reutilización y el reuso independientes deben referirse a otros métodos de prueba que incluyan el desmontaje de las baterías hasta el nivel de módulo o incluso de celda, una inspección visual de las propiedades mecánicas (separar las celdas dañadas y con fugas) y pruebas de rendimiento electroquímico (tensión en circuito abierto, resistencia interna, capacidad) (Zhu et al. 2021). Las pruebas pueden utilizar los protocolos de la norma UL 1974, que es actualmente la única norma que guía la evaluación de baterías para su reuso y reutilización. En función de los resultados de las pruebas, los módulos y las celdas son rechazados (para su reciclaje) o se clasifican en grupos con propiedades similares. Estos últimos se reensamblan en nuevos paquetes de baterías y se equipan con un nuevo BMS.



Dado que la penetración de los vehículos eléctricos en el mercado no ha sido significativa hasta hace pocos años, la generación de baterías usadas para su reutilización sigue siendo muy limitada en la mayoría de los mercados. Por lo tanto, la reutilización de baterías sigue siendo limitada en escala (Allred 2021). En este contexto, la literatura menciona los siguientes aspectos adicionales sobre las perspectivas para el futuro:

- Las actividades de reuso y reutilización requieren una afluencia de baterías similares o incluso idénticas. En el caso de que un sistema de recolección genere una amplia variedad de baterías y celdas diferentes, el reuso y la reutilización se verán significativamente limitados (Kampker et al. 2021; Manhart et al. 2022).
- El acceso a los datos sobre el estado de salud de las baterías es fundamental para permitir su reuso y reutilización de forma rentable, segura y de alta calidad. Como el acceso a estos datos no es universal, este tipo de reutilización sólo es posible para los productores o los actores que colaboran estrechamente con ellos (véase más arriba). Hay varios intentos de establecer un pasaporte digital de baterías, pero aún no está claro si dicho pasaporte facilitará un acceso más universal a los datos sobre el estado de salud de las baterías (Berger et al. 2022; Zhu et al. 2021).
- En la actualidad, el desmontaje, las pruebas y el reensamblaje de las baterías son procesos que requieren mucha mano de obra, lo que -dependiendo de los costes laborales de un determinado entorno- puede repercutir en la viabilidad económica (Zhu et al. 2021; Allred 2021).
- La automatización del desmontaje y las pruebas pueden reducir las necesidades de mano de obra y mejorar la calidad de las inspecciones. Las pruebas también pueden completarse y mejorarse con tecnologías como la tomografía computarizada por rayos X (XCT), la dispersión de neutrones y en combinación con mejores modelos de los procedimientos típicos de degradación de las baterías (Zhu et al. 2021).
- La seguridad del producto de las baterías de segunda vida es de gran importancia e idealmente debería estar al mismo nivel que la de las baterías de primera vida. Estos niveles de seguridad se definen en normas específicas para cada aplicación, como la IEC 62619 o la UL 1973.
- En términos de beneficios medioambientales y socioeconómicos, el reuso y la reutilización de las baterías generadas localmente debería preferirse claramente a las importaciones de baterías usadas. La importación de baterías de iones de litio para su reuso/reutilización sólo debe considerarse en los casos en que tales importaciones permitan el acceso a soluciones de almacenamiento de alta calidad a un precio comparable bajo y en consonancia con los convenios internacionales sobre el movimiento transfronterizo de mercancías usadas y residuos peligrosos⁶ (Betz et al. 2022).

⁶ Los importadores deben considerar (1) la clasificación de las ULIB como residuo (no-) peligroso en los países receptores o de tránsito y (2) la enmienda de prohibición entre países (no-) OCDE



3.3 Reciclaje

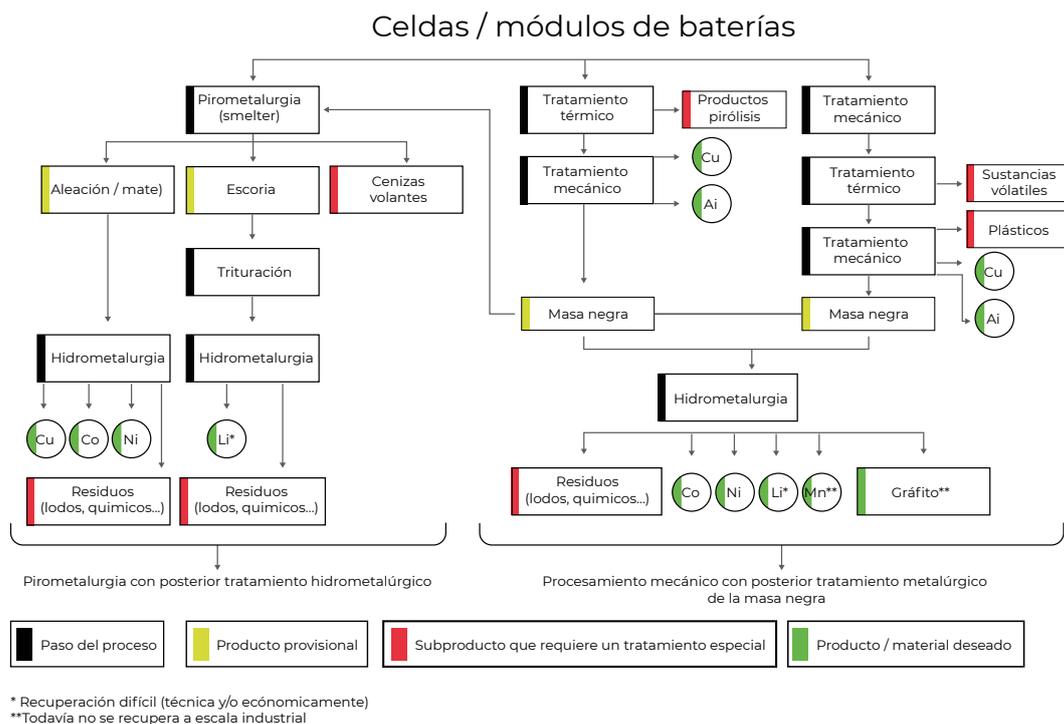
El reciclaje de baterías de iones de litio es un campo relativamente nuevo en el que se están probando y optimizando diferentes métodos y rutas de proceso. Las complejas composiciones de los materiales, incluidos los compuestos halógenos y orgánicos, así como las altas densidades energéticas de la carga residual potencial, hacen que el reciclaje de las baterías de iones de litio sea un reto tecnológico. Aunque algunas partes de los procesos de reciclaje, como las fases de procesamiento mecánico, se han desarrollado en muchas regiones del mundo, los procesos totalmente integrados sólo están disponibles en un número limitado de países de Asia (por ejemplo, Corea del Sur, Japón y China), Europa (por ejemplo, Bélgica, Alemania, Francia y Finlandia) y Norteamérica (Estados Unidos). (Sojka et al. 2020).

Aunque existen diversas rutas y variaciones del proceso, pueden clasificarse en dos tipos principales, que se describen con más detalle en las secciones siguientes (Brückner et al. 2020):

- Pirometalurgia con tratamiento hidrometalúrgico posterior
- Procesado mecánico con posterior tratamiento metalúrgico de la masa negra

El diagrama de flujo simplificado para ambas opciones se ilustra en la Figura 3-3 y en las secciones siguientes se ofrecen algunas descripciones. Además, se aplica el reciclaje directo de la masa negra recuperada, pero actualmente se limita al reciclaje de los residuos de la producción de baterías (reciclaje pre-consumo), que se explica con más detalle en la sección 3.3.3.

Figura 3-3: Diagrama de flujo general de las principales vías de reciclaje de las ULIB



Fuente: Adaptato de Brückner et al. (2020)



3.3.1 Pirometalurgia con tratamiento hidrometalúrgico posterior

En los procesos pirometalúrgicos, las baterías se introducen directamente en un horno de fundición. Las altas temperaturas y los agentes reductores funden y reducen los metales incrustados, que forman una aleación/mate que contiene el cobre, el níquel y el cobalto de las pilas (véase la Figura 3-4). El aluminio, el hierro, las impurezas y algunos oligoelementos, incluido el litio, forman una escoria. Los principales retos del tratamiento pirometalúrgico están relacionados con el contenido en flúor y litio de las pilas, que pueden atacar el revestimiento refractario del horno (Brückner et al. 2020). El flúor, convertido en su mayor parte en ácido fluorhídrico (HF), también puede corroer otras partes del sistema (de salida de gases) y crear problemas de emisiones (Brückner et al. 2020; Manhart et al. 2022). El contenido orgánico de la LIB (plásticos, electrolitos, grafito) añade una energía considerable, que debe tenerse en cuenta en el proceso de fundición. El contenido de aluminio de la LIB también tiene implicaciones, ya que aumenta la viscosidad de las escorias (Brückner et al. 2020).

La aleación/mate producida se trata posteriormente con métodos hidrometalúrgicos y obtención eléctrica para recuperar los metales (Cu, Co, Ni) en forma pura. En general, la etapa pirometalúrgica de este tipo de reciclaje de baterías de iones de litio puede diferenciarse en dos tipos principales:

- Pirometalurgia en la que las baterías de iones de litio se co-procesan con otras materias primas del horno
- Procesos de fundición totalmente dedicados a las baterías de iones de litio

El co-procesamiento es realizado por varias fundiciones, entre ellas Nickelhütte Aue (Alemania) y Glencore (fundición en Sudbury, Canadá, hidrometalurgia en Kristiansand, Noruega).

Umicore (Bélgica) y Ecomet (Italia), entre otras, se dedican a la fundición de ULIB. Ambos procesos producen una aleación/mate que se somete a tratamiento hidrometalúrgico. Estas secuencias de procesos son bastante eficientes para la recuperación de cobre, cobalto y níquel, con tasas de recuperación de >95% en los procesos pirometalúrgicos y pérdidas <5% en los procesos hidrometalúrgicos (Brückner et al. 2020). El aluminio y el litio pasan a la escoria. La concentración de LiO_2 de las escorias procedentes de la fundición dedicada de ULIB se sitúa en torno al 8-10 %, similar a la de los concentrados de litio procedentes de la minería de espodumeno. Posteriormente, el litio (Li_2CO_3) puede recuperarse de dichas escorias mediante molienda, lixiviación ácida, filtración y precipitación (Brückner et al. 2020). La concentración de litio en las escorias de la fundición coprocesada suele ser demasiado baja para su recuperación.

Figura 3-4: Aleación/material como producto intermedio del reciclaje pirometalúrgico de ULIB



Fuente: Oeko-Institut



3.3.2 Procesado mecánico con posterior tratamiento metalúrgico de la masa negra

El tratamiento mecánico de las baterías de iones de litio (celdas o módulos) tiene por objeto separar los distintos materiales (cobre, aluminio, masa negra) en flujos de salida definidos. Mientras que las láminas de cobre y aluminio, así como la fracción de metales ferrosos, pueden entregarse a los respectivos procesadores/fundidores de metales básicos, el polvo separado ("masa negra") con grafito, litio, cobalto, níquel y manganeso se entrega a un tratamiento especializado para la recuperación de metales.

El tratamiento mecánico puede realizarse con una variedad de secuencias de proceso, algunas de las cuales implican una etapa de tratamiento térmico previa a la separación. El tratamiento térmico (pirólisis) tiene como objetivo eliminar el electrolito, los disolventes y otras sustancias volátiles y descomponer las baterías en sus principales componentes metálicos, incluida la masa negra (Velázquez-Martínez et al. 2019). Estos procesos tienen la ventaja de que las baterías pierden su potencial peligroso (riesgos de incendio y explosión) en esta primera etapa de tratamiento en condiciones controladas. Para ello, el tratamiento térmico se realiza en una atmósfera inerte (nitrógeno, dióxido de carbono o argón) o al vacío. Además, el revestimiento interior del horno debe estar hecho de un material resistente a la corrosión y todos los gases y partículas extraídos deben capturarse en un sistema de tratamiento de gases de escape bien diseñado y mantenido. (Manhart et al. 2022). La eliminación térmica de los aglutinantes orgánicos permite una separación bastante clara del cobre, el aluminio y la masa negra, lo que no es posible con medios de separación puramente mecánicos (Brückner et al. 2020; Sojka et al. 2020). La desventaja de este proceso es su funcionamiento bastante complejo (proceso por lotes), que requiere altos rendimientos y economías de escala (Manhart et al. 20). (Manhart et al. 2022).

Para evitar la complejidad del tratamiento térmico, varias empresas inician el proceso de reciclaje con la trituración mecánica de las baterías, seguida de la eliminación de sustancias volátiles y la clasificación automatizada. Este enfoque también es adoptado por varias procesadoras de reciclaje de pequeña y mediana escala que pretenden iniciar el reciclaje de baterías de iones de litio a escala limitada y suministrando fracciones de salida (cobre, aluminio, masa negra) a empresas más grandes para su posterior tratamiento.

Para evitar los riesgos de incendio y explosión en la trituración, se suele aplicar una doble estrategia:

- Las baterías se descargan antes de la trituración⁷;
- La trituración se realiza en condiciones inertes (por ejemplo, cámara de trituración inundada de nitrógeno).

⁷ La descarga completa de todas las baterías suele ser muy difícil, ya que los sistemas de gestión de baterías incorporados impiden una descarga completa. Las baterías más pequeñas o sin BMS suelen descargarse en un baño de agua salada. Este método también tiene limitaciones, ya que el agua salada puede corroer los polos de la batería, lo que limita la velocidad de descarga.



El producto de la trituradora contiene aún sustancias volátiles, que deben eliminarse antes del tratamiento posterior. Esto se hace mediante calentamiento y/o destilación al vacío, donde se capturan los compuestos evaporados. Cabe destacar que la trituración y este tratamiento posterior generan gases altamente corrosivos y peligrosos, que no deben emitirse al lugar de trabajo ni al medio ambiente, por lo que es imprescindible la captura y el tratamiento de los gases de escape. (Sojka et al. 2020). La mezcla resultante de metales y masa negra se separa en una secuencia de pasos mecánicos. Una tercera opción es la trituración en agua (pH alcalino). Esta opción la utiliza la empresa canadiense Li-cycle en varias de sus operaciones anunciadas, que suministran la masa negra recuperada a uno de sus centros, que sin embargo, aún no está en operación (Li-Cycle 2022). Esta trituración en húmedo produce una masa negra húmeda, lo que probablemente limita las posibilidades de comercialización de este material. Todas las operaciones de trituración también producen una fracción plástica adecuada para la recuperación de energía.

La masa negra de toda operación mecánica pasa a un tratamiento posterior. Si bien la masa negra puede tratarse en procesos pirometalúrgicos (véase la sección 3.3.1), muchos operadores aplican medios hidrometalúrgicos para recuperar el cobalto y el níquel. También se puede recuperar litio en las etapas finales del procesamiento hidrometalúrgico (por ejemplo, en forma de Li_2CO_3), pero la optimización del proceso es bastante difícil (Allred 2021; Velázquez-Martínez et al. 2019). Los métodos hidrometalúrgicos también permiten la recuperación de manganeso y grafito. Sin embargo, la complejidad de los procesos implicados es alta, y la recuperación aún no se practica a escala industrial y podría entrar en conflicto con las altas tasas de recuperación de otros metales (Brückner et al. 2020; Sojka et al. 2020).

3.3.3 Reciclaje directo

El reciclaje directo de ULIB tiene como objetivo recuperar el material del cátodo y del ánodo (y potencialmente también el electrolito) de forma que puedan reutilizarse directamente en la producción de baterías de iones de litio. Se han probado con éxito enfoques relacionados a escala de laboratorio⁸ y se espera que estos procesos puedan ahorrar energía y emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los procesos de reciclaje más establecidos descritos en las secciones 3.3.1 y 3.3.2 (Zachary J. Baum et al. 2022). El reciclaje directo requiere un flujo de entrada de baterías con idéntica química celular e, idealmente, diseños de batería uniformes. Las baterías de diferentes diseños pueden tolerarse, pero estarían asociadas a esfuerzos y costes adicionales para su desmontaje, mientras que las químicas divergentes de las celdas (si se tratan en el mismo lote) causarían una mezcla de materiales de salida que sería inadecuada para su uso directo en la producción de baterías.

⁸ La investigación sobre el reciclaje directo corre a cargo, entre otros, de la institución Faraday del Reino Unido: <https://www.faraday.ac.uk/research/lithium-ion/recycle-reuse/>



Las baterías usadas y al final de su vida útil tienen una amplia variedad de formas y químicas y suelen llegar mezcladas a las empresas recicladoras. Por tanto, el reciclaje directo no es una opción realista en la mayoría de los casos, pero tiene un papel en el reciclaje de los residuos de la producción de baterías (reciclaje pre-consumo) y puede ser factible y viable en los casos en que haya un flujo de entrada constante de tipos y diseños de baterías uniformes. Este último enfoque es el que sigue la empresa suiza de vehículos eléctricos Kyburz, que ha desarrollado un proceso de reciclaje directo para las baterías LFP utilizadas en sus vehículos (Kyburz 2022).

Una visión comparativa de las (des)ventajas de las opciones de reciclaje descritas puede encontrarse en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Resumen de las diferentes opciones de reciclaje de ULIB

| | Procesamiento mecánico + Metalurgia | | | Reciclaje directo |
|--------------------|--|---|---|--|
| | Pirometalurgia | Operaciones a gran escala incluyendo tratamiento térmico | Operaciones a escala (más)pequeña sin tratamiento térmico previo | |
| Ventajas | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Eficiente para recuperar cobre, cobalto y níquel. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Si el procesamiento mecánico se combina con tratamiento térmico las baterías pierden su potencial peligroso (riesgo de fuego y explosión). ▪ La eliminación térmica del aglutinante permite una separación clara de cobre, aluminio y la masa negra. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ La complejidad del proceso se reduce sin tratamiento térmico. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ahorra energía y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). |
| Desventajas | <ul style="list-style-type: none"> ▪ El aluminio y el litio están en la escoria, el litio solo puede recuperarse a partir de la fundición dedicada de las baterías de litio, las concentraciones en la escoria del co-procesamiento es muy baja, el aluminio se pierde. ▪ El flúor y el litio tienen propiedades corrosivas, especialmente las emisiones de flúor que requieren de un tratamiento adecuado, de lo contrario existe riesgo de corrosión de la planta y contaminación. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Proceso bastante complejo que requiere de altos rendimientos y economías de escala. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ El tratamiento únicamente mecánico no permite una clara separación de las fracciones. ▪ La trituration y el tratamiento posterior generan gases altamente corrosivos y peligrosos; riesgos para la salud y el medio ambiente si no hay un tratamiento adecuado de los gases de escape. | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Requiere un flujo de entrada con una química de las celdas casi idéntica e, idealmente, diseño de batería uniforme. ▪ Actualmente limitado a proyectos piloto y al reciclaje de residuos de la producción de baterías ▪ (reciclaje pre-consumo). |

Fuente: Elaboración propia



3.4 Marcos normativos que permiten el reúso y reciclaje de las ULIB

Los materiales del cátodo de las baterías de iones de litio son muy diversos, y existen varios subtipos de LIB como, por ejemplo, litio-ferrofosfato, óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto, Óxido de aluminio de litio-níquel-cobalto y litio-cobalto (ver Tabla 1-1). Teniendo en cuenta las actuales tecnologías de reciclaje y los precios de las materias primas, los contenidos de cobalto y níquel determinan en gran medida el valor material de la batería, ya que el litio todavía no se recupera en muchos procesos (véase la sección 3.3). En el caso de las ULIB con bajo contenido en cobalto y níquel, el valor material aún no es lo suficientemente alto como para cubrir los costes de reciclaje, aunque esto podría cambiar en el futuro en función de los precios de las materias primas y el desarrollo tecnológico. En general, los costes de tratamiento son sustanciales en todos los enfoques de reciclaje practicados y llevan a situaciones en las que muchas compañías recicladoras cobran tasas de entrada por aceptar ciertos tipos de ULIB para su reciclaje. Se espera que el creciente volumen de baterías al final de su vida útil permita economías de escala en el reciclaje de baterías, lo que probablemente reducirá los costes de tratamiento en el futuro. No obstante, se cree que los costes netos persistirán en el caso de las baterías LFP (Brückner et al. 2020).

Por lo tanto, no sólo las técnicas de reciclaje disponibles, sino también los marcos normativos son parámetros decisivos para el reciclaje de las ULIB. En las siguientes secciones se presenta el panorama normativo que enmarca el reúso y el reciclaje de las baterías de iones de litio en tres jurisdicciones diferentes. China es el país con la mayor cuota de mercado mundial en el reciclaje de baterías de iones de litio usadas y, además de Europa, es la jurisdicción con el marco normativo más avanzado (Obaya and Céspedes 2021). El marco normativo alemán para la gestión de baterías EoL se estableció hace más de tres décadas y se ha seguido desarrollando desde entonces, mientras que la legislación europea ampliamente revisada sobre baterías (y baterías usadas) se ha actualizado recientemente y aborda los últimos desarrollos a lo largo de la cadena de valor de las baterías.

Las siguientes secciones ofrecen una breve visión general de los marcos normativos seleccionados.

3.4.1 Marco normativo chino para el reúso y el reciclaje de baterías

El uso de baterías de iones de litio ha aumentado considerablemente en China en los últimos años, y el uso generalizado y temprano de vehículos eléctricos da lugar actualmente a cantidades significativas de baterías de iones de litio de tamaño comparable que necesitan una buena gestión al final de su vida útil. Como resultado, el marco normativo para la gestión de las baterías al final de su vida útil se ha complementado y desarrollado en los últimos años, con especial atención a la reutilización y el reciclaje de las baterías de iones de litio procedentes de vehículos eléctricos. (Hampel 2022).



Desarrollo del marco reglamentario

Al principio, el marco normativo chino abordaba las baterías usadas en la *Ley de Prevención y Control de la Contaminación por Residuos Sólidos (1995)* entre otros flujos de residuos sólidos y exigía un reciclaje separado de las baterías. Las siguientes normativas sobre baterías usadas se centraron únicamente en la gestión adecuada de baterías de plomo-ácido al final de su vida útil. (Neumann et al. 2022).

No obstante, el número cada vez mayor de LIB usadas y, sobre todo, el despliegue de los vehículos eléctricos, dieron lugar a normativas específicas para las LIB a partir de 2015 (Bird et al. 2022). Desde entonces, la gestión responsable de las ULIB ha cobrado cada vez más importancia y desempeña un papel importante en diversas legislaciones chinas sobre baterías. Algunos ejemplos importantes son (Bird et al. 2022):

- Norma para las técnicas de prevención de la contaminación de baterías usadas (2016)
- Plan para la implementación del sistema de responsabilidad extendida del productor (2016)
- Especificaciones sobre las medidas de seguridad, los procedimientos, el almacenamiento y la gestión de las baterías de los vehículos (2017)
- Estandarización de pilas, módulos y baterías para facilitar su reciclaje (2017)

Las normativas pertinentes incluyen objetivos de reciclaje para los principales residuos, incluido baterías de iones de litio, del 40% para 2020 y del 50% para 2025 (Neumann et al. 2022). Además, existen tasas de recuperación de materiales obligatorias para las empresas recicladoras de vehículos eléctricos para varias materias primas que suelen contener las LIB. Los índices de recuperación exigidos se refieren a los compuestos de níquel, cobalto y manganeso, así como a un índice de recuperación compuesto para elementos de tierras raras y otros metales de más del 95 % cada uno. Se pide un índice de recuperación de iones de litio mínimo del 85% (Véase Tabla 3-2).

Tabla 3-2: Tasas obligatorias de recuperación de materiales para el reciclaje de baterías de vehículos eléctricos en China

| Materia prima | Tasa de recuperación de material ⁹ |
|--|---|
| Tasa compuesta de recuperación de níquel, cobalto y manganeso | ≥ 98% |
| Tasa de recuperación de iones de litio | ≥ 85% |
| Tasa compuesta de recuperación de elementos de tierras raras y otros metales | ≥97% |

Fuente: (Wenbo Li et al. 2021)

⁹ El nivel de ambición de los objetivos fijados podría variar en función de la definición de recuperación utilizada en este contexto. Si, por ejemplo, el uso de escoria de fundición en la construcción de carreteras se contabiliza como recuperación, los índices de recuperación de materiales podrían ser más fáciles de alcanzar. La legislación de la UE distingue entre objetivos de reciclaje y de valorización (véase la sección 3.4.3).



La responsabilidad de la gestión de las baterías al final de su vida se asigna legalmente a los productores. Aunque la responsabilidad extendida del productor no se introdujo oficialmente antes de 2016, la normativa anterior ya responsabilizaba a los fabricantes de baterías de la recolección y el etiquetado de las baterías usadas. Una vez promulgado el plan de aplicación del sistema de responsabilidad extendida del productor en 2016, los productores de baterías pasaron a ser responsables de la gestión de los RAEE más allá de la recolección de las baterías. El reglamento REP se complementó con requisitos específicos para los fabricantes de VE en 2018, haciendo a los fabricantes de vehículos eléctricos (EV) responsables de la creación de instalaciones de recolección y reciclaje de baterías usadas. Además, se responsabilizó a los fabricantes de EV de establecer una red de servicios de mantenimiento que permita la reparación y el intercambio de baterías usadas (Bej et al. 2022).

Con el fin de apoyar a los productores con la responsabilidad asignada, y para canalizar las ULIB a instalaciones de reciclaje adecuadas, el gobierno chino estableció una lista blanca para las empresas recicladoras de baterías de iones de litio que cumplen con los Requisitos Estándar para la Utilización Integral de Baterías de Potencia de Nuevos Vehículos Eléctricos Fuera de Servicio (*Standard Requirements for the Comprehensive Utilization of Decommissioned NEV Power Batteries*) (Bej et al. 2022). Mientras que al principio sólo se incluyeron cinco instalaciones en la lista, el Ministerio de Industria y Tecnologías de la Información (MIIT) responsable añadió más instalaciones en varias actualizaciones de la lista (Hampel 2022).

Además de los reglamentos que abordan el reciclaje de ULIB, los ministerios chinos responsables publicaron conjuntamente medidas para promover el "downcycling" de ULIB. Las medidas publicadas en 2021

tienen por objeto facilitar la reutilización de las baterías de vehículos eléctricos para aplicaciones de segunda vida como almacenamiento de energía o suministro de energía de reserva. Para garantizar un funcionamiento seguro, las medidas van acompañadas de normas industriales que deben cumplirse. (Kenji 2022).

Retos actuales

Además del amplio marco normativo descrito anteriormente, se ha informado de que existen importantes retos para garantizar que las ULIB provenientes de vehículos eléctricos se reciclen de acuerdo con los estándares nacionales vigentes (Wenbo Li et al. 2021). Al igual que ocurre con muchos otros flujos de residuos, el reciclaje deficiente y sin cumplir las normas puede -con un alcance económico estrechamente definido- ayudar a reducir costes a algunos agentes individuales de la cadena de gestión. Estas ventajas económicas suelen ir acompañadas de importantes efectos secundarios negativos (por ejemplo, contaminación) que afectan a otras partes, como las comunidades cercanas y la sociedad en general.

Si no se establecen o aplican unas normas técnicas mínimas, será muy difícil para las instalaciones que siguen buenas prácticas competir con las empresas recicladoras que no cumplen las normas.

Además, los bajos índices de recolección de ULIB se han identificado como uno de los principales retos. Aunque existen tasas detalladas y ambiciosas de recuperación de materias primas en las baterías de los vehículos eléctricos para cada empresa de reciclaje de baterías individual (ver Tabla 3-2), el incumplimiento de los objetivos de recolección de baterías de vehículos eléctricos se ha identificado como un obstáculo para la ampliación del reciclaje de ULIB en China (Wenbo Li et al. 2021).



3.4.2 La Ley Alemana de Baterías¹⁰

La Ley Alemana de Baterías (BattG) regula la distribución, recolección y gestión del fin de la vida útil respetuosa con el medio ambiente de baterías y acumuladores útil en Alemania. Entró en vigor en 2009 y adapta la Directiva 2006/66/CE de la UE a la legislación nacional alemana. El anterior Reglamento sobre baterías (BattV) fue encargado en 1998. Su objetivo era reducir la entrada de materiales peligrosos en los residuos de baterías y sólo contenía unos pocos requisitos relativos a la gestión del fin de a vida útil en forma de recolección de baterías. (BattV 1998).

A lo largo de los años, las enmiendas legislativas y las experiencias prácticas permitieron un desarrollo iterativo de los actuales sistemas de recolección de baterías. La última actualización de la Ley de Baterías en 2020 aumentó las tasas mínimas de recolección, incluyó requisitos adicionales para el cálculo de los índices de recolección y un requisito que responsabiliza financiera y organizativamente a los productores de baterías automotrices e industriales de la recolección y recuperación de las baterías introducidas en el mercado (IHK Karlsruhe 2020; Bej et al. 2022).

Este marco actualmente vigente quedará anulado en cuanto entre en vigor el Reglamento de la UE sobre baterías¹¹ (véase la sección 3.4.3). No obstante, su constitución actual y las experiencias prácticas de años anteriores siguen permitiendo extraer conclusiones relevantes.

¹⁰ Algunas secciones del siguiente texto se han extraído del informe del autor, hasta ahora inédito, "Developing a regulatory framework for Extended Producer Responsibility and take-back scheme for batteries in Ethiopia" (Desarrollo de un marco normativo para la responsabilidad extendida del productor y el sistema de recogida de pilas en Etiopía), sin fecha.

¹¹ Mientras que una directiva de la UE fija objetivos para los Estados miembros que deben traducirse en leyes nacionales para ser aplicables, los reglamentos de la UE son leyes que se aplican directamente ((Citizens Information 2022).



Alcance y requisitos

Como ya se ha dicho, la Ley Alemana de Baterías traslada la Directiva de la UE sobre Baterías a la legislación nacional. Por lo tanto, su ámbito de aplicación comprende las mismas tres categorías de baterías utilizadas también en la Directiva de la UE: (1) baterías portátiles (2) baterías automotrices y (3) baterías industriales. En consonancia con la Directiva de la UE sobre baterías, asigna:

- Responsabilidad de los fabricantes de baterías de registrarse antes de que las baterías sean introducidas en el mercado (Artículo 4)
- Responsabilidad de los fabricantes de recoger gratuitamente las baterías usadas de los distribuidores y de los puntos de recolección voluntaria (Artículo 5).
- La responsabilidad de los distribuidores de recuperar gratuitamente las baterías usadas del usuario final y de entregar las baterías portátiles usadas recolectadas a un sistema de recolección (Artículo 9).
- La responsabilidad de que todas las baterías usadas recolectadas e identificables sean procesadas de acuerdo con el estado del arte y se recuperen sus materiales (Artículo 14).
- Además de los requisitos predefinidos de la Directiva de baterías de la UE, la Ley de Baterías Alemana complementa los siguientes requisitos:
- La responsabilidad de los fabricantes de recuperar también las baterías industriales (Artículo 8).
- Responsabilidad de los distribuidores que suministran baterías automotrices a los usuarios finales de cobrar un depósito reembolsable de 7,50 euros, IVA incluido, por batería de vehículo si el usuario final no devuelve una batería automotriz usada en el momento de la compra de una batería de vehículo nueva (Artículo 10).
- Desde 2021, un índice mínimo de recolección del 50% para las baterías portátiles usadas (Artículo 16)¹², que es un 5% superior al 45% que exige actualmente la Directiva de la UE (European Commission 2006) y que está previsto que se mantenga constante hasta finales de 2023 en el Proyecto de Reglamento de la UE sobre Baterías (véase la sección 3.4.3).
- Un diseño ecológico de las tarifas (eco-modulación): Los sistemas de recolección deben incluir incentivos monetarios para minimizar el uso de sustancias peligrosas en la producción de baterías portátiles. Además, se les pide que diferencien las tasas en función de la durabilidad, reusabilidad y reciclabilidad de las pilas portátiles (Artículo 7a).

Aunque la Ley Alemana de Baterías no utiliza el término Responsabilidad Extendida del Productor, trasladar los requisitos predefinidos de la Directiva de la UE a la legislación alemana conduce inevitablemente a la creación de un sistema de REP para las baterías (véase la sección 3.4.4 para más información sobre la REP). En este contexto, se describe un marco administrativo del sistema de REP de baterías en Alemania, dejando el diseño de los mecanismos de recolección y los detalles de su aplicación práctica para que los desarrollen los productores y distribuidores (o sus representantes autorizados).

¹² La tasa mínima de recolección solicitada en el BattG para las baterías portátiles aumentó con el tiempo: 35% hasta 2012, 40% hasta 2015, 45% hasta 2016, 50% desde 2021.



Para controlar la eficacia de los sistemas de recolección, el Artículo 15 incluye requisitos sobre cómo documentar el peso de las baterías recolectadas y notificarlo a la autoridad competente. Para garantizar el cumplimiento del sistema REP, este mecanismo de control se complementa con el Artículo 29, que especifica las infracciones a la Ley de baterías y las posibles multas.

Impacto del marco normativo en los índices de recolección de baterías

Dado que la Ley Alemana de Baterías fue precedida por un Reglamento Alemán sobre Baterías, en el momento de su puesta en marcha ya había tres sistemas de recolección en funcionamiento en Alemania. Debido a su experiencia práctica y a los procesos establecidos, la tasa de recolección en 2009 -el primer año de la comisión- era casi un 10 % superior al 35 % solicitado. (UBA 2011). En 2019, la tasa de recolección aumentó hasta el 52,2%, pero disminuyó al año siguiente hasta el 45,6% (UBA 2022)¹³. En 2021 no se cumplió la tasa mínima de recolección solicitada del 50%, y solo se recolectaron el 48,2% de las baterías portátiles (ver Tabla 3-3).

Tabla 3-3: Evolución de los índices de recolección solicitados y reales de baterías portátiles usadas en Alemania

| Año | Porcentaje mínimo de recolección exigido en la Ley de Baterías | Tasa real de recolección de baterías portátiles |
|------|--|---|
| 2009 | 35 % | 44.4 % |
| 2019 | 45 % | 52.2 % |
| 2020 | 45 % | 45.6 % |
| 2021 | 50 % | 48,2 % |

Fuente: Elaboración propia a partir de (UBA 2011) y (UBA 2022)

Las cifras indican que los índices de recolección ya eran bastante elevados cuando se introdujo la Ley de Baterías en 2009. La falta de unos requisitos mínimos cada vez más estrictos permitió que los índices de recolección práctica se estancaran de forma generalizada en la última década.

¹³ El descenso del índice de recogida en 2020 se debió, entre otras cosas, a un aumento del 20% de los volúmenes de baterías comercializadas, que no se complementó con la mayor cantidad necesaria de baterías usadas recogidas.



3.4.3 Reglamento de la UE sobre baterías

Hasta el 2023, las normativas de la UE relevantes para baterías incluían la Directiva Europea sobre Baterías (Directiva 2006/66/CE) y la Directiva sobre Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) (Directiva 2012/19/UE) (Neumann et al. 2022). Para adaptar el marco legislativo a la situación actual y armonizar la gestión de las baterías en toda la UE, el marco legislativo fue modificado con el nuevo Reglamento de la UE sobre Baterías (UE) 2023/1542, adoptado por el Parlamento Europeo y el Consejo en 2023. La propuesta inicial publicada en 2020 fue objeto de un amplio debate y, en diciembre de 2022, la Comisión, el Consejo y el Parlamento de la UE anunciaron que habían alcanzado un acuerdo provisional sobre el reglamento. En julio de 2023 se publicó el texto definitivo de este reglamento (Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea 2023), el cual modifica la Directiva 2008/98/CE y el Reglamento (UE) 2019/1020 y deroga la Directiva sobre baterías (2006/66/CE).

El nuevo Reglamento de la UE sobre baterías contiene un amplio conjunto de requisitos aplicables a las baterías comercializadas en el mercado europeo y a su gestión al final de su vida útil.

Las baterías nuevas tendrán que contener determinados porcentajes de **materias primas recicladas** (Artículo 8). Para las baterías que contengan cobalto, plomo, litio o níquel, será obligatorio un porcentaje de contenido reciclaje específico para cada material. El contenido reciclaje podrá proceder de (1) residuos de fabricación de baterías o (2) residuos posconsumo. El Artículo 8 define una fase inicial en la que sólo habrá que documentar el contenido reciclado. Asimismo, el artículo introduce valores mínimos obligatorios que irán aumentando con el paso de los años. Como puede verse en la Tabla 3-4, porcentajes de reciclaje de entre el 6 y el 16 % están indicados como primer paso para aquellas materias primas relevantes para las baterías de iones de litio¹⁴. En comparación con el proyecto de reglamento publicado por la Comisión en el 2020, los porcentajes mínimos para el cobalto, el litio y el níquel han aumentado, ya que ahora los residuos de la fabricación de baterías, y no sólo los residuos posconsumo, se contabilizan como contenido reciclaje (Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea 2023).

Transcurridos unos años, los porcentajes solicitados para las baterías de iones de litio aumentarán hasta el 12 - 26 %. El cálculo y la verificación del cumplimiento de los porcentajes solicitados seguirán una metodología aún por desarrollar por la Comisión Europea.

¹⁴ Debido a su valor material intrínseco y a las técnicas de reciclaje bien establecidas, la gran mayoría de las baterías de plomo-ácido ya se reciclan en la mayoría de los países y el plomo recuperado se utiliza, entre otras cosas, para fabricar nuevas baterías.



Tabla 3-4: Contenido mínimo de materias primas recicladas para las baterías nuevas comercializadas en el mercado europeo de acuerdo a (UE) 2023/1542

| Contenido mínimo reciclado | Baterías en el ámbito de aplicación |
|--|---|
| A partir del 18 de Agosto de 2031 | |
| <ul style="list-style-type: none">▪ 16% de cobalto▪ 85% de plomo▪ 6% litio▪ 6% níquel | Baterías industriales, para vehículos eléctricos y baterías de arranque, iluminación e ignición (SLI Batteries) |
| A partir del 18 de Agosto de 2036 | |
| <ul style="list-style-type: none">▪ 26% de cobalto▪ 85% de plomo▪ 12% litio▪ 15% níquel | Medios de transporte ligeros, industriales, vehículos eléctricos y baterías de arranque, iluminación e ignición (SLI Batteries) |

Fuente: Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea 2023

El contenido mínimo no se aplica a las baterías reutilizadas, reaprovechadas o remanufacturadas que ya se habían comercializado anteriormente. Está previsto que los umbrales mínimos se revisen pocos años después de la entrada en vigor del reglamento. Los objetivos podrían adaptarse (en ambos sentidos) y podrían añadirse otras materias primas. La información sobre el contenido reciclaje de las pilas debe ser accesible, entre otros datos, a través de un código QR en las baterías (artículo 13).

Los requisitos relativos a una cuota mínima definida de materias primas secundarias se complementan con la **diligencia debida en la cadena de suministro** para los materiales primarios (Capítulo VII: Artículos 47-53). Los requisitos definitivos ordenan que los operadores que comercialicen baterías nuevas deberán cumplir los requisitos de diligencia debida, excluyendo de esta obligación a las baterías destinadas al reuso y la reutilización.

Para reducir la cantidad de pilas que se convierten en residuos, el Reglamento contiene requisitos específicos de **rendimiento y durabilidad** para las baterías portátiles de uso general (Artículo 9) y para las baterías de vehículos de transporte ligeros, las baterías industriales recargables y las baterías de vehículos eléctricos (Artículo 10).



El Reglamento también establece importantes requisitos previos para **el reuso y la reutilización** de las baterías (Artículo 14). Solicita que la información sobre el estado de salud y la vida útil prevista de las baterías se ponga a disposición del comprador de la batería. Los requisitos de este artículo ordenan que, a partir de Agosto de 2024, los sistemas de gestión de baterías contengan datos actualizados sobre los parámetros pertinentes para determinar el estado de salud y la vida útil restante prevista de las baterías, indicando su capacidad para un uso posterior. Estos requisitos están destinados a aplicarse a las baterías de los medios de transporte ligeros y de los vehículos eléctricos, así como a las baterías utilizadas en el almacenamiento estacionario de energía.

El Reglamento contiene numerosos requisitos previos relativos al manejo de las baterías usadas, incluida la asignación de responsabilidades y objetivos específicos de recolección y tratamiento (Capítulo VIII). Se hace especial hincapié en la aplicación de la **responsabilidad extendida del productor** (Artículo 56) y, en su mayor parte, engloba requisitos ya vigentes en la legislación nacional de cada Estado miembro:

Artículo 55: "Los Estados miembros de la UE crearán un registro de productores que servirá para controlar el cumplimiento de los requisitos por parte de los productores [...]". Los productores estarán obligados a registrarse, ya sea directamente o a través de una Organización de Responsabilidad del Productor (PRO). El artículo también especifica la información necesaria para el registro ante una autoridad competente.

Artículo 56: "para las baterías que comercialicen por primera vez en el territorio de un Estado miembro. [...]" Esto significa que los fabricantes están obligados a organizar y promover la recolección separada de las baterías usadas (incluido su posterior transporte y gestión), a facilitar información sobre las baterías puestas en el mercado y aquellas recolectadas y gestionadas, y a financiar todas estas actividades. Estas obligaciones pueden cumplirse individualmente o de forma colectiva a través de un PRO.

El Reglamento de la EU sobre Baterías también especifica todos los procedimientos administrativos pertinentes para aplicar los sistemas de REP, incluidas las obligaciones de los estados miembros, las autoridades competentes, los productores, los distribuidores, los usuarios finales y las instalaciones de tratamiento.

Los productores o las organizaciones de productores responsables designadas que actúen en su nombre son responsables de alcanzar unos índices mínimos de **recolección** de baterías portátiles usadas (Artículo 59). Los índices mínimos prevén un índice de recolección del 45% a finales de 2023, y un aumento hasta el 65% después de seis años, y hasta el 70% después de ocho años (véase la Tabla 3-5).



Tabla 3-5: Tasas de recolección exigidas para las baterías portátiles usadas en (UE) 2023/1542

| Tasa de recolección | Plazo |
|---------------------|----------------------------------|
| 45 % | Hasta el 31 de diciembre de 2023 |
| 63 % | Hasta el 31 de diciembre de 2027 |
| 73 % | Hasta el 31 de diciembre de 2030 |

Fuente: Elaboración propia a partir de Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea (2023)

Las baterías usadas recolectadas no se eliminarán ni se tratarán en una operación de recuperación de energía (Artículo 70), sino que todas las baterías usadas recolectadas se prepararán para su reutilización, reúso o reciclaje (Artículo 71).

Con el fin de alcanzar tasas de recolección de baterías portátiles más elevadas en el tiempo, se prevén requisitos relativos a la posibilidad de **extracción y sustitución** por parte de los usuarios finales (Artículo 11). La extracción será posible con el uso de herramientas disponibles en el mercado. Las herramientas especializadas sólo serán necesarias si se suministran gratuitamente con el producto.

Las eficiencias de reciclaje y los objetivos de recuperación de materiales se especifican en las partes B y C del anexo XII. Está previsto imponer eficiencias de reciclaje basadas en el peso para todos los tipos de baterías. La Tabla 3-6 muestra los valores discutidos para las baterías a base de litio.

Tabla 3-6: Eficacia de reciclaje solicitada por peso medio de las baterías de iones de litio¹⁵ en (UE) 2023/1542

| Eficacia del reciclaje | |
|------------------------|----------------------------------|
| 65 % | Hasta el 31 de diciembre de 2025 |
| 70 % | Hasta el 31 de diciembre de 2030 |

Fuente: Elaboración propia a partir de Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea (2023)

Aún más específicos son los tasas de recuperación de materiales, que dan porcentajes fijos del contenido de materias primas que deberán recuperarse en el futuro. Las cifras, indicadas en la Parte C del Reglamento, figuran en la Tabla 3-7.

¹⁵ El reglamento sobre baterías también contiene eficiencias de reciclaje para baterías de plomo-ácido, níquel-cadmio y otros residuos.



Tabla 3-7: Porcentajes de recuperación de material solicitados en (UE) 2023/1542

| Recuperación de materiales | |
|---|----------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">▪ 90 % para cobalto, cobre, plomo, níquel▪ 50 % de litio | Hasta el 31 de diciembre de 2027 |
| <ul style="list-style-type: none">▪ 95 % para cobalto, cobre, plomo, níquel▪ 80 % de litio | Hasta el 31 de diciembre de 2031 |

Fuente: Parlamento Europeo; Consejo de la Unión Europea (2023)

Dado que con las tecnologías actuales el litio sólo se recupera en algunas de las instalaciones de reciclaje existentes, los porcentajes previstos del 50% o incluso del 80% supondrían una gran presión para ampliar sistemáticamente este enfoque.

El nuevo Reglamento de la UE sobre baterías entró en vigor el 17 de agosto de 2023. Se espera que los índices de recuperación de materiales específicos y el uso obligatorio de materias primas recicladas en las baterías nuevas previstos tengan un impacto importante en el desarrollo del reciclaje de baterías de iones de litio en la Unión Europea. Además, la normativa establece condiciones favorables para las actividades de reutilización y reuso de baterías en el mercado europeo.

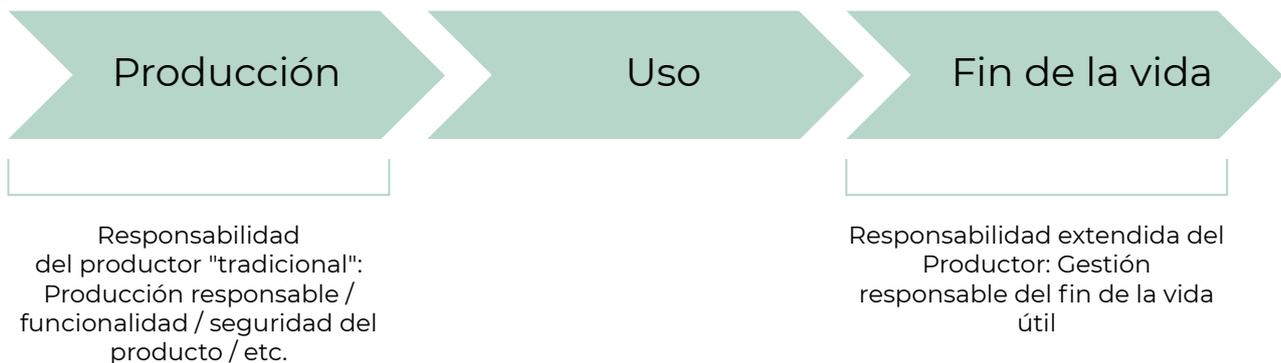
En resumen, los tres marcos normativos ofrecen una buena panorámica de los instrumentos políticos y los requisitos específicos de recolección y reciclaje que pueden utilizarse para apoyar y permitir el reuso y el reciclaje de las baterías de iones de litio. Dado que las tres normativas seleccionadas hacen especial hincapié en el enfoque de política medioambiental de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), el siguiente capítulo ofrecerá una breve visión general del concepto y de las posibles configuraciones organizativas.



3.4.4 El papel de los sistemas de responsabilidad extendida del productor

La *Responsabilidad Extendida del Productor (REP)* amplía la responsabilidad del productor¹⁶ a la fase posconsumo del ciclo de vida del producto (ver Figura 3-5).

Figura 3-5: El concepto de Responsabilidad Extendida del Productor



Fuente: Oeko-Institut

La responsabilidad puede ser económica y/o física y puede recaer total o parcialmente en el productor (OECD 2022). "La responsabilidad física se refiere a garantizar el tratamiento de los residuos, incluida la recolección, el transporte, la clasificación, el reuso, el reciclaje y la eliminación [...]. La responsabilidad financiera se refiere a la financiación de las actividades mencionadas y permite a los productores internalizar los costes del tratamiento de residuos e incorporarlos a sus precios." (Neumann et al. 2022).

La responsabilidad física, incluido el cumplimiento de los índices mínimos de recolección de baterías usadas, puede cumplirse individualmente, y cada productor puede crear su propio sistema de recolección y gestión del final de la vida útil (ver Figura 3-6).

¹⁶ Para desarrollar sistemas de REP eficaces, el término "productor" necesita una definición clara. Por lo general, engloba a las partes interesadas que introducen por primera vez un producto en el mercado correspondiente. Puede tratarse de fabricantes o importadores.



Figura 3-6: Cumplimiento individual de la responsabilidad física para baterías usadas



Fuente: Adaptación de (PREVENT Waste Alliance 2020)

Otra posibilidad es que la responsabilidad se asuma de forma colectiva. En este último caso, varios productores asignan a una Organización de Responsabilidad del Productor (PRO) la tarea de la recolección y gestión al final de la vida útil en su nombre (ver Figura 3-7).



Figura 3-7: Cumplimiento colectivo de la responsabilidad física en materia de baterías usadas con la participación de una Organización de Responsabilidad del Productor



Fuente: Adaptación de (PREVENT Waste Alliance 2020)

En este caso, los productores pagan a una PRO para que asuma su responsabilidad (extendida) en la gestión responsable de las baterías de iones de litio al final de su vida. La PRO es entonces responsable de:

- Registrar a los productores miembros de la PRO y sus volúmenes de producto (baterías) introducidos en el mercado;
- Asumir la responsabilidad de aplicar los requisitos de la REP, por ejemplo, garantizando el cumplimiento de unos índices mínimos de recolección y una gestión responsable de las baterías al final de su vida útil recolectadas, o llevando a cabo campañas de concienciación de los consumidores;
- Coordinar y supervisar la aplicación de los requisitos de REP (por ejemplo, asignando recolectores de residuos y empresas recicladoras);
- Documentar los esfuerzos y proporcionar documentación transparente a las autoridades responsables.

Al hacer obligatoria para los productores la gestión adecuada de las baterías usadas al final de su vida útil, la REP puede utilizarse para garantizar el reciclaje de todos los subtipos de ULIB (véanse los retos económicos para el reciclaje de determinados subtipos en la sección 3.1). En general, se ha demostrado que la REP desempeña un papel importante en la eficacia del reciclaje de las ULIB (Bird et al. 2022; Neumann et al. 2022).



4. Evaluación de la reutilización, reuso y reciclaje de ULIB en América Latina y el Caribe



4.1 Panorama regional

En América Latina y el Caribe (ALC), el reciclaje y el reuso de baterías de iones de litio usadas (ULIB) se encuentran actualmente en una fase inicial. Los volúmenes de ULIB en el mercado siguen aumentando, como resultado de aplicaciones establecidas y nuevas como la movilidad eléctrica. Mientras tanto, ni los marcos normativos ni las capacidades e infraestructuras de gestión han evolucionado al ritmo de los volúmenes de baterías que llegan al final de su vida útil. La sensibilización general sobre la necesidad de soluciones para este creciente flujo de residuos no se ha hecho visible hasta los últimos años, pero ha estado vinculada principalmente a la demanda mundial de litio y a la atención prestada a la región en términos de reservas de litio. Aunque muchos países ya cuentan con normativas para la gestión de residuos peligrosos y residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), sólo unas pocas de ellas abordan las baterías o el litio como un flujo de residuos específico en el que centrarse.

En la actualidad, en la mayoría de los países de ALC, una gran parte de las baterías de iones de litio no se gestiona o se gestiona de forma inadecuada. Esto se debe a la ausencia de normativas específicas y de sistemas de REP operativos, así como a la escasa recolección de ULIB y de infraestructuras de reciclaje. En la mayoría de los países, la gestión de baterías al final de su vida sigue estando cubierta por sistemas más generales de gestión de residuos sólidos. Esto no es especialmente alentador en una región en la que sólo el 55% de los residuos sólidos se gestiona adecuadamente (Obaya and Céspedes 2021). En el caso de las ULIB resultantes de las actividades de gestión de RAEE (por ejemplo, desmontaje para pretratamiento) y de los programas posconsumo, algunos operadores autorizados solían exportarlas para su tratamiento en el extranjero. Sin embargo, debido a los riesgos de incendio y de seguridad durante el almacenamiento y el transporte, las ULIB están sujetas a diversas normativas internacionales y nacionales, como el Convenio de Basilea, que restringe el movimiento transfronterizo de residuos peligrosos (véase la sección 3.1). Para poder exportar las LIB usadas a otras regiones con capacidad de reciclaje (UE, Norteamérica, Asia), los gestores de RAEE deben preparar y cumplir una serie de requisitos formales y técnicos. Muchos operadores locales de gestión de residuos declararon no tener las capacidades legales para solicitar los permisos y la documentación requeridos.



En términos de infraestructura, sólo unos pocos países de la región de ALC cuentan en la actualidad con empresas que realicen la gestión in situ de ULIB. Estas empresas están trabajando para escalar su tecnología y ampliar sus capacidades, así como tratando de colaborar en el intercambio de experiencias para superar los obstáculos legales y burocráticos. Entretanto, se han anunciado los primeros proyectos extranjeros de inversión en reciclaje de ULIB en la región para los próximos años. Además, algunas "start-ups" y actores nacionales están desarrollando modelos de negocio para aplicaciones de reutilización o reúso de las ULIB.



Para el estudio, se llevó a cabo una primera selección regional con el fin de obtener una visión general de las prácticas regionales de reciclaje y reúso de ULIB, así como de otros aspectos (marco normativo, evolución del mercado) importantes para la selección de estudios de casos más detallados. La selección regional incluyó los siguientes criterios:

- Marcos normativos existentes que abordan la gestión del final de la vida de baterías de iones de litio,
- Sistemas existentes de REP para baterías,
- Infraestructura de reciclaje de ULIB existente o prevista,
- Necesidades previstas de gestión de la movilidad eléctrica para LIB, en concreto objetivos de movilidad eléctrica y estrategias de electrificación de zonas rurales y sin conexión a la red¹⁷.

Cabe mencionar que para efectos de los casos de estudio, se hace referencia a la infraestructura de reciclaje como procesamiento sólo hasta la etapa de separación de fracciones mediante procesos electromecánicos, y no hasta la etapa de hidro o pirometalurgia, dado que esta última aún es inexistente en la región.

La Tabla 4-1 presenta una matriz general de los países latinoamericanos seleccionados en relación con los criterios de selección enumerados anteriormente. En general, en Sudamérica es donde se han identificado los mayores avances

en términos de marco normativo y desarrollo de capacidades para la gestión ambientalmente responsable de las ULIB. En la actualidad, Colombia y Ecuador cuentan con normativas para la gestión ambientalmente responsable de las baterías que también abordan explícitamente las ULIB. Bolivia, Perú y Colombia han establecido sistemas obligatorios de REP para la recolección de baterías (incluidas las ULIB). Mientras tanto, Colombia, Chile y Brasil están a la cabeza de la región en cuanto a infraestructura operativa para el reciclaje de baterías. En los mismos países, algunas iniciativas y start-ups para la reutilización de baterías ya están funcionando a pequeña escala.

México, el único país latinoamericano situado en Norteamérica, es relevante debido al tamaño de su mercado y a los ambiciosos objetivos nacionales en materia de movilidad eléctrica, que se traducirán en volúmenes significativos de ULIB que requerirán una gestión de fin de la vida. En la región del Caribe, así como en Centroamérica, apenas se han encontrado avances. Costa Rica es el único país con avances relevantes en términos de marco normativo, infraestructura existente para el reciclaje de ULIB y ambiciosos planes de movilidad eléctrica.

A partir de estos resultados preliminares, se seleccionaron cuatro países para realizar casos de estudio en profundidad: Colombia, Costa Rica, Chile y México. Estos países representan casos relevantes e interesantes de diferentes regiones de ALC.

¹⁷ Es muy probable que los ambiciosos objetivos de movilidad eléctrica y/o las estrategias nacionales de electrificación sin conexión a la red estén vinculados a volúmenes crecientes de LIB al final de su vida en el futuro.



Tabla 4-1: Matriz general de América Latina

| País | Población | Cadena de valor del litio virgen | Regulación de las baterías de litio | Sistema obligatorio de REP para las baterías | Infraestructuras de reciclaje | Necesidades previstas de gestión del final de la vida útil de LIB | | |
|--------------------|------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--|---|---|--|--|
| | Banco Mundial (2021) | | | (excl. baterías E-mobility) | (Procesamiento hasta la fase de producción de masa negra) | Objetivos de movilidad eléctrica | | Energía renovable descentralizada sin conexión a la red (2021) |
| | Millones de habitantes | sí/no | - / + / ++* | no / en desarrollo / sí | - / + / ++ / +++** | Año | Objetivo | Sistemas instalados *** |
| Argentina | 45.8 | sí | - | en desarrollo | + | 2030 | 4.500 autobuses eléctricos en Buenos Aires | 193 |
| Bolivia | 11.8 | sí | + | sí | - | 2030 | El 20% de la flota de vehículos es eléctrica | n/d |
| Brasil | 213.9 | sí | + | no | ++ | 2030 | 1.000 autobuses eléctricos (hipótesis conservadora) | 269 |
| Chile | 19.2 | sí | + | en desarrollo | ++ | 2035 | El 100% del transporte público urbano es de emisiones cero | 6,000 |
| Colombia | 52.3 | no | ++ | sí | +++ | 2030 | 600.000 vehículos eléctricos en las carreteras colombianas | n/d |
| Costa Rica | 5.1 | no | + | en desarrollo | ++ | 2030 | 8% del parque de vehículos ligeros eléctricos | 2,000 |
| Ecuador | 17.9 | no | ++ | no | - | 2025 | 10.000 vehículos eléctricos | n/d |
| El Salvador | 6.5 | no | - | no | - | n/d | n/d | 38 |
| Guatemala | 17.1 | no | - | no | - | 2032 | Aumento del 30% en las ventas de vehículos eléctricos | 3,600 |



| País | Población | Cadena de valor del litio virgen | Regulación de las baterías de litio | Sistema obligatorio de REP para las baterías | Infraestructuras de reciclaje | Necesidades previstas de gestión del final de la vida útil de LIB | | |
|-----------------|------------------------|--|-------------------------------------|--|---|---|--|--|
| | Banco Mundial (2021) | | | (excl. baterías E-mobility) | (Procesamiento hasta la fase de producción de masa negra) | Objetivos de movilidad eléctrica | | Energía renovable descentralizada sin conexión a la red (2021) |
| | Millones de habitantes | sí/no | - / + / +++* | no / en desarrollo / sí | - / + / ++ / +++** | Año | Objetivo | Sistemas instalados *** |
| Honduras | 10.1 | no | - | en desarrollo | + | 2030 | El 50% del transporte público urbano es eléctrico | n/d |
| Jamaica | 2.9 | no | - | no | - | 2030 | 16% de flota de transporte público eléctrica | n/d |
| México | 130.3 | no (pero reservas de litio sin explotar) | + | no | ++ | 2030 | 800.000 vehículos eléctricos | 130,000 |
| Panamá | 4.4 | no | - | en desarrollo | + | 2025 | El 10% de la flota de vehículos es eléctrica | 893 |
| Perú | 33.3 | sí | + | sí | - | 2032 | 6.700 autobuses eléctricos y 171.000 coches eléctricos | n/d |
| Uruguay | 3.5 | no | + | no | - | 2035 | Parque de vehículos 100% electrificado | 700 |

* "-" = sin normativa, "+" = baterías incluidas en la normativa de gestión de residuos, "++" = normativa específica de las baterías de litio.

** "-" = no se ha encontrado ninguna, "+" = plantas de reciclaje planificadas / piloto, "++" = al menos una empresa de reciclaje que realiza el tratamiento in situ, "+++" = más de una empresa que realiza el tratamiento in situ.

*** Los tamaños y capacidades de los sistemas resumidos varían y no son directamente comparables entre países.

Fuente: Elaboración propia



4.2 Prácticas y políticas actuales en los países seleccionados

4.2.1 Colombia

Colombia es uno de los países de la región con mayores avances en materia de reúso y reciclaje de ULIB. Además, el país cuenta con uno de los marcos regulatorios más avanzados de América Latina para promover la recolección y gestión ambientalmente responsable de las ULIB. En las siguientes secciones¹⁸ se describirá el estado actual de las prácticas de reúso y reciclaje de las ULIB cubriendo diferentes aspectos: marco regulatorio, infraestructura y capacidades existentes y desarrollos nacionales.

4.2.1.1 Políticas, normativas y sistemas de REP

En Colombia la gestión de baterías al final de su vida fue reglamentada por primera vez mediante la Resolución 1297 de 2010 del Ministerio del Ambiente. Esta normativa fue la base para el establecimiento de sistemas de recolección selectiva y gestión ambientalmente responsable de baterías y acumuladores portátiles usadas con el objetivo de prevenir la degradación ambiental. El ámbito de aplicación se definió para las celdas y baterías primarias (incluidas las de iones de litio), así como para los acumuladores de níquel-cadmio, níquel-hierro y los acumuladores eléctricos usados. Antes de esta resolución, casi todas las baterías portátiles usadas se eliminaban en vertederos, vertederos a cielo abierto u otras zonas no reguladas (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial 2010).

Como resultado, el primer sistema de recolección y gestión ambiental de baterías empezó a funcionar a partir de 2011. Dentro de los primeros seis, 31 sistemas de recolección fueron aprobados por la autoridad responsable, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). Adicionalmente se instalaron más de 12.000 puntos de recolección en todo el país (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2017).

En el 2017, tras años de recopilación de experiencias prácticas con sistemas de gestión de baterías, se aprobó la Resolución 2246 que complementaba la Resolución 1297 del 2010. Esta agregó un conjunto de indicadores de gestión, que permitieron un mejor seguimiento y evaluación de los diferentes sistemas de recolección y gestión.¹⁹ Estas dos resoluciones se aplicaban a todos los productores²⁰ que comercializaran más de 3.000 o más baterías en el país. El ámbito de aplicación del producto incluía las baterías o acumuladores portátiles primarios y secundarios. Sin embargo, se excluían del marco regulatorio temprano las baterías industriales y las de vehículos eléctricos.

¹⁸ Algunas secciones del siguiente texto proceden del informe del autor, hasta ahora inédito, "Developing a regulatory framework for Extended Producer Responsibility and take-back scheme for batteries in Ethiopia" (Desarrollo de un marco normativo para la responsabilidad extendida del productor y el sistema de recolección de baterías en Etiopía), sin fecha.

¹⁹ Se trata de indicadores de recolección y gestión, información y sensibilización de los consumidores, aumento de la cobertura geográfica e incentivos directos a los consumidores. Por ejemplo, el indicador de recolección y gestión se define en esta resolución como la relación entre la cantidad de baterías y acumuladores usados recolectados y gestionados respecto al objetivo de masa recolectada en el año de evaluación. La evaluación de los sistemas de recolección en función de estos indicadores se obtiene sumando los valores alcanzados en cada uno de ellos, de forma que el cumplimiento se consigue con una puntuación mínima.

²⁰ La definición de productor incluye a fabricantes, distribuidores e importadores (artículo 3, Res 1297).



En el 2022, un nuevo Decreto Único Regulator del Sector de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible que aborda los RAEE, las pilas y los acumuladores (Resolución 851 del 2022) fue expedido. A partir del 1 de enero de 2023, la normativa anterior para la recolección de RAEE y baterías fue derogada por la Resolución 851.

Esta resolución establece metas nacionales para la recolección y gestión a largo plazo de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), con base en el principio de Responsabilidad Extendida del Productor (ver capítulo 3.4.4) y teniendo en cuenta la vida útil de cada dispositivo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2022). Los productos incluidos en el ámbito de aplicación de esta resolución se definen en función de las líneas arancelarias de las mercancías importadas. Las baterías de iones de litio se incluyen en el código 8507.60.0000 de la nomenclatura arancelaria armonizada (Anexo 1 de la Res 851 de 2022).

En contraste con las resoluciones previas, la Res 851 incluye algunos requisitos específicos para ULIB de mayor tamaño (industriales y vehículos). Entre otras disposiciones, hace obligatoria la recolección de ULIB de vehículos eléctricos a partir de 2024. Los productos incluidos en el ámbito de aplicación de esta resolución se definen en función de las líneas arancelarias de las mercancías importadas. Las baterías de iones de litio se incluyen en el código 8507.60.0000 de la lista arancelaria armonizada (HTS) (Anexo 1 de la Res 851 de 2022).

En general, el marco normativo colombiano hace de la Responsabilidad Extendida del Productor (REP) un instrumento importante para la gestión de pilas y baterías usadas en el país. Aunque las Resoluciones 1297 y 2246 no hacían referencia explícita a REP, sus requerimientos llevaron al establecimiento de un sistema de REP para pilas y baterías. En cambio, la actual Resolución 851 de 2022 utiliza el concepto de Responsabilidad Extendida del Productor como principio rector para definir los objetivos nacionales de recolección y gestión de RAEE (incluidas baterías y acumuladores). En los artículos 6 y 11 se detalla la obligación para los productores (importadores y fabricantes nacionales) de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) y baterías de consumo en masa de implementar un sistema de recolección y gestión, individual o colectivo, el cual estará sujeto a evaluación, aprobación y seguimiento por parte de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales. A los productores de AEE y baterías de uso industrial (que incluyen las baterías de vehículos eléctricos). La Res 851 también les solicitó implementar un sistema de recolección y gestión pero aún no están sujetos a monitoreo. En cambio, se pide a los productores de baterías industriales que establezcan canales de información para los consumidores sobre las condiciones de recolección al final de la vida útil.

La Resolución 1297 introdujo tasas mínimas de recolección de baterías portátiles usadas, que pasaron del 4% en 2012 al 45% en 2022 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial 2010). Sin embargo, estos objetivos no fueron alcanzados por los principales sistemas de recolección en el pasado (ver Tabla 4-3). En la nueva resolución 851 de 2022, las tasas de recolección obligatoria de baterías y acumuladores se reajustaron empezando con un 37% en 2022 con un aumento del 1% hasta el 45% en 2030. A partir de 2024 la Res 851 de 2022 también establece tasas de recolección obligatoria para las baterías de vehículos eléctricos y otras baterías industriales²¹ que comienzan en el 0,5% de las cantidades introducidas en el mercado en 2024 y aumentan hasta el 65% en 2044 (ver Tabla 4-2).

²¹ La Res 851 de 2022 categoriza las LIB (código HS 8507.60.0000 como se identifica en el Anexo I) utilizadas en vehículos eléctricos como artículos de uso industrial de larga duración y, por tanto, los objetivos para las tasas de recolección se diferencian de las baterías y acumuladores de corta duración. Lo mismo se aplica a las LIB utilizadas en aplicaciones industriales, como el almacenamiento estacionario de energía para sistemas fotovoltaicos.



Tabla 4-2: Tasas de recolección de baterías y acumuladores y baterías de iones de litio provenientes de vehículos eléctricos en Colombia²²

| Año de evaluación | Tasa de recolección Baterías y acumuladores de iones de litio | Tasa de recolección Baterías industriales y de vehículos eléctricos | Años base para el cálculo del indicador |
|-------------------|--|--|---|
| 2022 | 37% | - | 2021,2020, 2019 |
| 2023 | 38% | 0% | 2022,2021, 2020 |
| 2024 | 39% | 0.5% | 2023, 2022, 2021 |
| 2025 | 40% | 1% | 2024, 2023, 2022 |
| 2026 | 41% | 2% | 2025, 2024, 2023 |
| 2027 | 42% | 4% | 2026, 2025, 2024 |
| 2028 | 43% | 6% | 2027, 2026, 2025 |
| 2029 | 44% | 9% | 2028, 2026, 2025 |
| 2030 | 45% | 12% | 2029, 2028, 2027 |
| 2031 | 45% | 15% | 2030, 2029, 2028 |
| 2032 | 45% | 19% | 2031, 2030, 2029 |
| 2033 | 45% | 23% | 2032, 2031, 2030 |

Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2022)

²² Calculado en base al peso total del equipos eléctricos y electrónicos introducidos anualmente al mercado, en este caso, se indica el promedio de los tres años base.



Además, el actual sistema colombiano de responsabilidad extendida del productor también se centra en la concientización de los consumidores finales y en la cobertura geográfica de los sistemas de recolección post-consumo. En este contexto, los sistemas de recolección establecidos se evalúan mediante un sistema de criterios múltiples. Cada sistema debe definir una estrategia para alcanzar una puntuación mínima y proporcionar información de apoyo. Este sistema incluye cinco indicadores:

- Recolección y gestión
- Información y sensibilización de los consumidores.
- Cobertura geográfica
- Investigación aplicada y desarrollo experimental en el uso de residuos
- Fomento de la economía circular

Los productores (importadores y fabricantes nacionales) pueden cumplir las responsabilidades descritas individual o colectivamente (véase también el capítulo 3.4.4).

En Colombia existen actualmente tres sistemas de recolección colectiva de baterías portátiles usadas: *Pilas con el ambiente*, *Recopila* y *ARBAM-(Motorola)*²³. Además, hay 27 sistemas individuales registrados.

Ejemplo práctico 1: Pilas con el Ambiente

Implementación de los requisitos regulatorios

Pilas con el Ambiente es uno de los programas de recolección que forma parte del Grupo Retorna y uno de los programas colectivos registrados con mayor cobertura del país. Grupo Retorna es una iniciativa medioambiental formada por seis programas posconsumo: Cierra el Ciclo, EcoCómputo, Pilas con el Ambiente, Red Verde, Recoenergy y Rueda Verde. Cada programa se estableció con el propósito de crear canales para el reciclaje de dispositivos o productos que han cumplido su ciclo de vida como: envases de insecticidas domésticos, ordenadores y periféricos, baterías usadas, electrodomésticos, baterías de plomo-ácido usadas y neumáticos. La idea es promover la conciencia ambiental a través del reciclaje como un objetivo común de todos los colombianos. Pilas con el Ambiente está organizada como una cooperación sin ánimo de lucro y representa a algunos de los principales distribuidores e importadores de baterías portátiles en Colombia. Empezó a recolectar baterías en 2012 y ha aumentado la tasa de recolección hasta el 20 % en 2021 (véase Tabla 4-3).

²³ Siglas de "Acuerdo de recogida de baterías Motorola".



Tabla 4-3: Evolución de los índices de recolección solicitados y reales de Pilas con el Ambiente

| Año | Tasa mínima de recolección solicitada en la Res 1297 | Tasa real de recolección alcanzada para baterías portátiles |
|------|--|---|
| 2012 | 4 % | 1,9 % |
| 2013 | 8 % | 5,6 % |
| 2014 | 12 % | 6,7 % |
| 2015 | 16 % | 6,2 % |
| 2016 | 20 % | 7,6 % |
| 2017 | 25 % | 12,2 % |
| 2018 | 30 % | 18,8 % |
| 2019 | 35 % | 17,6 % |
| 2020 | 35 % | 17,6 % |
| 2021 | 40 % | 19,5 % |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos facilitados por Pilas con el ambiente

A pesar del aumento de las tasas de recolección a lo largo de los años, la cantidad de baterías recolectadas no coincidió con las tasas mínimas obligatorias. Desde la perspectiva de Pilas con el Ambiente como sistema de REP, los principales retos son los siguientes:

- La competencia entre los distintos sistemas de recolección. A partir de las experiencias prácticas, la existencia pocos sistemas de recolección colectivos de lugar a tasas de recolección más elevadas.
- Falta de concientización y compromiso de los consumidores finales para devolver las baterías portátiles usadas a los puntos de recolección designados.
- Falta de apoyo de las autoridades nacionales y locales para el desarrollo de las acciones de sensibilización necesarias.

Además de centrarse en la recolección y sensibilización, desde el 2018 Pilas con el Ambiente también ha dedicado recursos al desarrollo de tecnología para el tratamiento de los volúmenes previstos de ULIB procedentes del sector movilidad y, por tanto, ha contribuido a aumentar las capacidades de reutilización y reuso de ULIB.



A partir de 2023, las actividades de Pilas con el ambiente se centrarán en adaptar el actual sistema de gestión para cumplir con los nuevos requisitos relativos a las LIB de mayor tamaño que entrarán en vigor en 2024. Para ello, está previsto que Recoenergy, otra empresa del Grupo Retorna, se convierta en la organización responsable de la recolección de baterías de iones de litio procedentes de la movilidad eléctrica. Esta organización se encargaba hasta ahora del esquema de recolección de ULABs (baterías ácido-plomo) pero ampliará su ámbito de actuación para atender los crecientes volúmenes de LIB al final de su vida en el sector del automóvil y el transporte.

4.2.1.2 Infraestructuras de reciclaje e iniciativas de reúso existentes

En lo que respecta a las iniciativas de gestión de las LIB al final de su vida, Colombia es el país de la región con más avances. A día de hoy, el país cuenta con dos plantas activas de reciclaje de ULIB en dos de las principales regiones industriales. Altero, situada en los alrededores de Medellín, e Innova Ambiental, en la región metropolitana de Cali. Ambas empresas aplican procesos de reciclaje mecánico a pequeña escala para obtener fracciones separadas de metal y plástico, así como masa negra (véase también el capítulo 3.3.2). La masa negra se exporta para su posterior procesamiento y valorización mediante la recuperación de cobalto o níquel.

Se identificaron otras dos empresas que operan con modelos de negocio dedicados a la reutilización de las baterías de litio: BatX y Recobatt. BatX ofrece servicios de almacenamiento de energía, integrando componentes reciclados y reutilizados en el diseño y la fabricación de baterías. Recobatt es una iniciativa reciente fruto de una asociación estratégica entre un fabricante nacional de baterías (Tronex) y una empresa de reciclaje de RAEE y ULIB (Innova Ambiental). Esta empresa se centra en el desarrollo de aplicaciones de segunda vida derivadas de LIB usadas procedentes de la movilidad eléctrica (véase Ejemplo práctico 2 para más información).

En el contexto de las actividades de uno de los sistemas REP, desde 2022 se coordina un grupo de trabajo sobre soluciones de economía circular para baterías de iones de litio y otras tecnologías. Este grupo incluye representantes de productores, gestores de residuos, PROs y actores sectoriales. Las actividades de este grupo se han centrado en el intercambio de experiencias sobre iniciativas en curso y posibles soluciones tecnológicas para la gestión del final de la vida de las ULIB en Colombia. Así mismo, se informó por parte de uno de los expertos participantes en el grupo de trabajo que se han discutido e identificado dentro del grupo los obstáculos legales, técnicos y económicos para el desarrollo de modelos locales de valorización de los flujos de materiales resultantes de precursores de LIB.

Además de las empresas privadas mencionadas, otros miembros del grupo de trabajo mantienen negociaciones y acuerdos de cooperación con otros actores regionales (en Costa Rica, Chile y Brasil). Estas colaboraciones están orientadas a complementar competencias en diferentes etapas de los procesos de reciclaje de ULIB, incluyendo acuerdos de suministro (masa negra para la recuperación de cobalto) o transferencia de tecnología. Por ejemplo, en colaboración con una empresa chilena, Gaia Vitare, un operador colombiano de gestión de RAEE, ha establecido un proceso de trituración de ULIB con el objetivo de exportar masa negra a Chile como precursores para el refinado de cobalto en Ecominería (ver Ejemplo práctico 5).



Ejemplo práctico 2: Innova Ambiental & Recobatt

Integración de los modelos de negocio de reutilización y reciclaje de ULIB

Innova Ambiental es una empresa ubicada en las cercanías de Cali, en Colombia. Fue creada en 2010 para prestar servicios de gestión de residuos peligrosos para el sector industrial (RAEE, luminarias). En 2018 como respuesta a la problemática mundial de crecimiento en el número de LIB usadas y el interés de los mercados por materiales críticos como Co y Ni, se empezó a desarrollar una nueva línea para el procesamiento de ULIB.

Innova Ambiental obtuvo la licencia en 2020 para procesar baterías secundarias. Inicialmente, sólo se procesaban Ni-Cd y NiMH, pero poco después el ámbito se amplió también a las baterías de iones de litio. El proceso es un reciclaje electromecánico en el que las baterías se separan en tres etapas:

1. Clasificación por composición química, tipo de batería y estado de la batería
2. Trituración en dos fases
3. Separación en tres etapas por imanes, tamaño de partícula y densidad

El proceso tiene diferentes variables que pueden modificarse en función de la química de las baterías y de las características del lote. El control de las emisiones se garantiza mediante sistemas centrales y locales de ventilación y extracción en las zonas de operación aisladas para la línea de procesamiento de ULIB. A pleno rendimiento, este complejo está diseñado para procesar 10 toneladas de baterías al día. En la actualidad, la empresa procesa unas 30 toneladas al mes.

Con el aumento de la cantidad de ULIB recolectadas procedentes de la movilidad eléctrica, Innova, en colaboración con Tronex, un fabricante colombiano de baterías alcalinas (primarias) y fundador del sistema de recolección colectiva "Recopila", identificó la necesidad de desarrollar soluciones adicionales para el reúso y la reutilización de este tipo de baterías. Como resultado de un intenso proceso de investigación, Recobatt se estableció como un modelo de negocio de economía circular para el diagnóstico, la remanufactura y la valorización de baterías procedentes de la movilidad eléctrica en aplicaciones de segunda vida. Recobatt opera como un complejo de servicios y procesos complementarios a los ya establecidos en las carteras de soluciones de Innova y Tronex (ver Figura 4-1).

El modelo de negocio de Recobatt está diseñado para gestionar las ULIB entrantes procedentes de la electromovilidad. El proceso de Recobatt incluye la clasificación y caracterización de la electroquímica de las baterías para determinar su estado de salud y su estado de carga.

Dependiendo del diagnóstico inicial, los módulos desmontados serán enviados a Cali o Medellín para su posterior procesamiento. Los módulos funcionales serán remanufacturados por Tronex Industrial y los clasificados como no funcionales serán enviados a Innova (Cali) para su reciclaje. Las baterías reutilizadas por Tronex se comercializan como soluciones de segunda vida para sistemas de respaldo y compensación de energía en aplicaciones que requieren un suministro de energía confiable, seguro e ininterrumpido, así como acumuladores temporales de energía en sistemas de generación solar o eólica.



Mientras se realizaba este estudio, las instalaciones de Recobatt en Bogotá estaban en construcción y el proceso no estaba totalmente escalado. Sin embargo, Recobatt ha estado operando las instalaciones y la infraestructura de sus empresas asociadas Innova y Tronex. Se prevé que este modelo de negocio gestione volúmenes cada vez mayores de baterías al final de su vida recolectadas procedentes de la electromovilidad, en cumplimiento con los objetivos de recolección fijados por la Resolución 851 de 2022. El sistema colombiano de REP actualmente no aplica como obligatorio para las baterías de vehículos eléctricos. Por esta razón, los volúmenes actualmente recibidos son de carácter voluntario.

Figura 4-1: Modelos de negocio integrados de reutilización y reciclaje de ULIB en Colombia



Fuente: Recobatt 2023



Ejemplo práctico 3: Altero

Tecnología de reciclaje ULIB modular y reproducible

Altero es una empresa colombiana que trabaja en el reciclaje de ULIB. Se trata de una tecnología de reciclaje de desarrollo propio, que integra diferentes sistemas para un tratamiento seguro y en seco de las baterías usadas, recuperando materiales de alto valor. Las baterías se transforman mediante un proceso electromecánico que no utiliza reactivos químicos y funciona bajo atmósfera inerte que neutraliza las baterías durante la trituración y las fases posteriores del proceso. La mezcla de gases, las presiones y los tiempos de remanencia según cada etapa son el núcleo de la patente (pendiente). La mezcla de gases permite triturar las baterías sin descarga previa y controla la volatilización del electrolito.

Los materiales resultantes se separan en tres productos estratégicos: material precursor para la fabricación de nuevas baterías (masa negra), mezcla de cobre y aluminio, y mezcla de disolventes orgánicos y sales de litio (electrolito). La tecnología de Altero está equipada para procesar todo tipo de baterías de iones de litio, procedentes de teléfonos móviles, computadores, juguetes electrónicos, aplicaciones de movilidad eléctrica (con desmontaje manual previo) y sistemas de almacenamiento de energía. Las baterías se separan y procesan en lotes según su composición química para garantizar cantidades significativas de los minerales deseados. Altero recibe ULIB usadas tanto de fabricantes de baterías como de baterías recolectadas a través de programas posconsumo (sistemas REP) y gestores de RAEE.

La planta de Altero está situada en Guarne - Antioquia, en las proximidades de Medellín. En su máxima capacidad, este complejo está diseñado para procesar 90 toneladas de baterías al mes (~1.000 toneladas al año). En la actualidad, la empresa procesa unas 5 toneladas al mes.

Figura 4-2: Instalación modular de reciclaje de ULIB en Colombia



Fuente: Altero 2023



Una de las principales características de esta tecnología es el hecho de que todo el proceso se realiza en contenedores de barco, de modo que el sistema queda aislado del suelo y de la atmósfera exterior. Las distintas fases del proceso (preparación, trituración y almacenamiento) se ubican en contenedores diferentes y pueden distribuirse en función de la superficie disponible. Esto convierte a la tecnología de Altero en una interesante solución modular que, con el tiempo, podría reproducirse en otros países que necesiten capacidades de gestión de ULIB al final de su vida.

4.2.1.3 Acontecimientos nacionales relevantes

La Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (2019) define el objetivo de contar con 600.000 vehículos eléctricos en las vías colombianas para 2030, y desplegar cinco estaciones de carga en las principales zonas urbanas para 2022 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2020). Además, Bogotá, la capital del país, es una de las ciudades de América Latina que más ha avanzado en la electrificación de su sistema de transporte público. Los ambiciosos objetivos fijados para 2022 se han alcanzado y a principios de 2023 Bogotá cuenta ya con un total de 1.485 autobuses eléctricos operativos. La ciudad también ha establecido un requisito mínimo de compra del 30% de vehículos eléctricos para el transporte público en 2025 y del 100% de autobuses eléctricos en 2035. (TUMI E-Bus Mission 2022b). Además de la capital, hay otras ciudades del país con objetivos ambiciosos y que avanzan rápidamente en materia de transporte público eléctrico (TUMI E-Bus Mission 2022a; 2022c).

Aunque estos avances son muy alentadores, llegará el momento en que los autobuses eléctricos y sus baterías se desgasten y deban ser retirados del servicio. Los autobuses eléctricos están equipados con varios cientos de kilogramos de baterías, que se clasificarán como residuos peligrosos al final de su vida útil. Por lo tanto, los avances en este tema también indican que se espera un aumento de los volúmenes de ULIB que necesitan soluciones de gestión del fin de la vida a nivel nacional.

4.2.1.4 Resumen del país

Colombia cuenta con el marco normativo más sólido de los casos de estudio analizados, así como con el mayor número de avances en cuanto a prácticas de reúso y reciclaje. En comparación con otros países, hay muchos actores activos, tanto en el reciclaje de ULIB como en la reutilización de ULIB. No obstante, las actuales empresas de reciclaje del país operan muy por debajo de su capacidad, lo que significa que hay más potencial más allá de los volúmenes recogidos actualmente a través de los sistemas REP y los acuerdos comerciales con los fabricantes.



4.2.2 Costa Rica

4.2.2.1 Políticas, normativas y planes de REP para LIB

La Ley para la Gestión Integral de Residuos (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica 2012) aborda la REP en su Artículo 42, obligando a los productores e importadores de bienes cuyos residuos sean declarados como "especiales" (incluidas las LIB) a implementar al menos una de las siguientes medidas:

- Establecer un programa eficaz de recuperación, reutilización, reciclaje, aprovechamiento energético u otros medios de valorización;
- Participar en un programa sectorial de residuos para su gestión integral;
- Adoptar un sistema de depósito, devolución y reembolso en el que el consumidor, al adquirir el producto, dejará una cantidad monetaria en depósito que se recuperará con la devolución del envase o producto;
- Desarrollar productos o utilizar empaques que minimicen la generación de residuos y faciliten su recuperación, o permitan su eliminación de la forma menos perjudicial para el medio ambiente.
- Establecer alianzas estratégicas con los municipios para mejorar los sistemas de recolección y gestión integral de residuos.

El Decreto N° 38272-S que regula la declaración de residuos de manejo también menciona en su Artículo 4 que los productores o importadores de dichos residuos deben ofrecer opciones para garantizar su recuperación y reducir los volúmenes que alcanzan los sitios de disposición final (Presidencia de la República; Ministerio de Salud 2014). El Anexo I de este decreto incluye a las ULIB, entre muchos otros materiales como llantas de automóvil, colchones y bombillos (Presidencia de la República; Ministerio de Salud 2014).

Finalmente, el Decreto No. 35993-S sobre el Reglamento para la Gestión Integral de Residuos Electrónicos, el cual incluye las baterías de iones de litio de computadoras portátiles, teléfonos celulares y unidades de alimentación ininterrumpida (UPS) en el Anexo I, aborda la REP en su artículo 12, al atribuir a los productores responsabilidad a lo largo de todo el ciclo de vida del producto" (Presidencia de la República; Ministerio de Salud; Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones 2010). Este decreto declaró la creación de un comité ejecutivo²⁴ que actualmente funciona como un consejo asesor coordinado por el Ministerio de Salud con varios representantes de ministerios, organizaciones no gubernamentales, la academia y el sector privado. Las funciones de este comité incluyen definir, revisar y publicar las metas anuales de recuperación de residuos y asegurar que los productores las cumplan (PREAL 2022).

A pesar de la existencia de un marco normativo para el tratamiento de baterías y RAEE, no ha habido una implantación efectiva de los mecanismos descritos en la legislación, ni un seguimiento y control efectivo de los que se han implantado (Domenech Cots and Guillén Miranda 2021). La falta de metas obligatorias de recolección y valorización hace que ni los importadores, ni los distribuidores, ni las marcas o fabricantes originales de los equipos estén obligados a asegurar una disposición final adecuada (Domenech Cots and Guillén Miranda 2021).

²⁴ Comité Ejecutivo de Gestión Integral de Residuos Electrónicos - CEGIRE



Otro mecanismo que no se ha implantado hasta ahora es la automatización mediante software de los informes de las empresas que cuentan con un sistema de REP. Desde la perspectiva de los actores consultados, la revisión y la evaluación de los resultados son cuestionables, lentos, manuales y dependen de unas pocas personas. Esto impide que el sistema proporcione las estadísticas necesarias para medir la eficacia de la REP. Asimismo, los actores activos en el reciclaje de ULIB en Costa Rica identificaron la falta de aplicación del marco normativo como uno de los principales obstáculos. Los expertos entrevistados evaluaron que el responsable, el Ministerio de Salud, carece de recursos para realizar un seguimiento eficaz. Esto conduciría a una falta de motivación de las empresas para cumplir las leyes nacionales. La ausencia de sanciones fue confirmada por expertos de diferentes organizaciones como un obstáculo para el registro de actores obligados en Costa Rica. Además, se dijo que la legislación actual enmarca el reciclaje de ULIB como una oportunidad para la generación de ingresos. Como consecuencia, muchas municipalidades no preveían en su planificación de actividades ningún presupuesto para la gestión responsable de baterías de iones de litio al final de su vida. Esto llevó a una situación en la que la recolección no era obligatoria para los importadores y los municipios no disponían de dinero presupuestado para esta tarea. Esto complementa las conclusiones de (Domenech Cots and Guillén Miranda 2021), quienes escribieron que el principal reto para las operaciones de reciclaje de ULIB en Costa Rica "no es la disponibilidad de ULIB usadas, que se espera sea suficiente, tomando en cuenta la posibilidad de integrar volúmenes generados en otros países de la región, sino la implementación de un sistema formal de recolección de este tipo de residuos, que permita altos porcentajes de cobertura a nivel nacional, y especialmente en Centroamérica".

Algunas de las deficiencias actuales podrían eliminarse cuando se promulgue la reforma a la ley de Manejo Integrado de Residuos (Ley 10031 del 2021). Esta reforma definió categorías de productos prioritarios en los que actuará la REP (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica 2021). Por el momento falta una ordenanza para que sea aplicable, pero cuando se finalice la ordenanza respectiva, la ley ya no dejará voluntarias la mayoría de las medidas de medio ambiente, salud y seguridad para el manejo de las baterías, sino que, entre otras cosas, hará obligatorio en Costa Rica el tratamiento racional de las baterías usadas de vehículos eléctricos.

4.2.2.2 Infraestructuras de reciclaje e iniciativas de reutilización existentes

El Ministerio de Salud (MINSa) y el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) desarrollaron una hoja de ruta para un manejo eficiente de las baterías de vehículos eléctricos en Costa Rica durante el primer semestre de 2022 (Urcuyo Solórzano et al. 2022) que incluyó un diagnóstico del estado actual del país en términos de infraestructura. A continuación se extraen algunos de estos resultados:

A 28 de febrero del 2022 se detectaron 19 gestores de residuos autorizados registrados para la gestión de ULIB o similares (MINSa; MINAE 2022). Es importante mencionar que podría tratarse exclusivamente de gestores de baterías de plomo-ácido. Sin embargo, estas empresas tienen el potencial (y la infraestructura inicial) para convertirse en gestores de ULIB. Casi todas ellas realizan actividades de recolección, transporte y almacenamiento de residuos, mientras que nueve realizan actividades de pretratamiento. Siete realizan actividades de valorización, que no se especifican, pero que podrían incluir el reúso y/o el reciclaje. El 30% de estas empresas exportan los residuos.



También se constató en la evaluación que ninguna de las empresas mencionadas realiza ningún tipo de proceso de valorización en las baterías de vehículos eléctricos, siendo lo más probable que éstas se exporten. En el contexto de este estudio, se descubrió que, entretanto, Fortech ha empezado a trabajar también con baterías de vehículos eléctricos. La empresa no sólo se dedica al reciclaje de diferentes tipos de ULIB, sino que actualmente también está desarrollando un modelo de negocio para el reuso de las celdas de las baterías usadas (ver más información en Ejemplo práctico 4). Otra empresa de gestión de residuos entrevistada es Solirsa, y aunque no recicla ULIB, está interesada en explorar el tema del reuso de ULIB.

Ejemplo práctico 4: Fortech

Experiencia costarricense en el reciclaje del ULIB como centro regional de conocimiento

La empresa de reciclaje Fortech de Costa Rica tiene más de dos décadas de experiencia en el reciclaje de RAEE, y empezó a desarrollar y optimizar un proceso de reciclaje de ULIB hace varios años. Entre otras cosas, con el apoyo de la Universidad Técnica de Aachen, Fortech desarrolló un proceso de tratamiento mecánico para ULIB, que da como resultado fracciones separadas de aluminio, cobre, plásticos y masa negra. Un tratamiento térmico tras la trituración evapora el electrolito, que se condensa y recupera también para su reutilización.

Fortech identificó compradores para todos los materiales recuperados. Mientras que el aluminio y el cobre se destinan a las rutas de reciclaje de aluminio y cobre que Fortech ya tenía establecidas cuando trabajaba con RAEE, la masa negra se vende a compradores de EE.UU. o Europa. La fracción plástica se convierte en combustible derivado de residuos para la recuperación de energía.

El caso de negocio de Fortech no se basa únicamente en los ingresos procedentes de los materiales vendidos, sino también en el sistema de REP existente en Costa Rica, que cubre las baterías entre varios otros tipos de residuos (véanse los retos del marco legal actual en la sección 4.2.2.1). Incluso en ausencia de tasas de recolección obligatorias, algunos importadores de baterías estaban dispuestos a pagar por la recolección y el tratamiento racional de las baterías usadas generadas.

Desde que Costa Rica se convirtió en miembro de la OCDE en 2021, la importación de baterías usadas es más fácil, también para las baterías más grandes procedentes de vehículos eléctricos²⁵. Fortech descarga las baterías antes del transporte, las desmonta en sus instalaciones y puede tratarlas mecánicamente en la misma planta que, por lo demás, está procesando ULIB portátiles. Fortech tiene un acuerdo con un fabricante de vehículos eléctricos para recoger y tratar las baterías usadas de sus vehículos, no sólo procedentes de Costa Rica, sino también de otros países de la región.

²⁵ El movimiento transfronterizo de pilas sigue necesitando seguir normativas internacionales como el Convenio de Basilea.



La empresa es miembro de E-waste LATAM, una red en América Latina y el Caribe que fomenta el intercambio entre actores a lo largo de las redes de reciclaje (véase el capítulo 4.3). Fortech está bien conectada en la región y tiene la ambición de compartir su experiencia y conocimientos con otros actores, ya sea a través de consultas o de un concepto de franquicia. Actualmente hay conversaciones en curso con actores de varios países de ALC, incluidos Colombia, Chile y México.

En el contexto de un piloto de recolección realizado entre noviembre de 2022 y enero de 2023, se pudieron establecer alianzas estratégicas y acuerdos con varias municipalidades costarricenses, gobiernos locales y productores. Como resultado del piloto, 120 toneladas de ULIB fueron recolectadas y canalizadas a iniciativas de reúso o a las instalaciones de reciclaje de Fortech.

4.2.2.3 Acontecimientos nacionales relevantes

Como parte de su Plan Nacional de Descarbonización²⁶, Costa Rica aspira a ser neutra en carbono en 2050, y parte de su plan de acción se orienta precisamente al transporte y la movilidad sostenible. Las ambiciones iniciales eran lograr que el 70% de la flota de autobuses y taxis y el 25% de la flota de vehículos privados fueran de cero emisiones para 2035; mientras que para el 2050, el 100% de la flota de autobuses y taxis y el 60% de la flota de vehículos privados fueran de cero emisiones.

Sin embargo, para el año 2020, la Dirección de Cambio Climático del MINAE presentó su informe de Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) en el que se ajustaron los objetivos originales, siendo la nueva meta lograr que el 8% de todas las flotas de autobuses, taxis y vehículos privados sean de cero emisiones para el año 2030. (MINSAs; MINAE 2022). Para otras categorías de vehículos, como las motocicletas, también se desarrollarán objetivos y medidas para migrar hacia los vehículos eléctricos.

Figura 4-3: Estación de carga para vehículos eléctricos en Uvita, Costa Rica



Fuente: Oeko-Institut

²⁶ Descarbonicemos Costa Rica Compromiso País 2018-2050

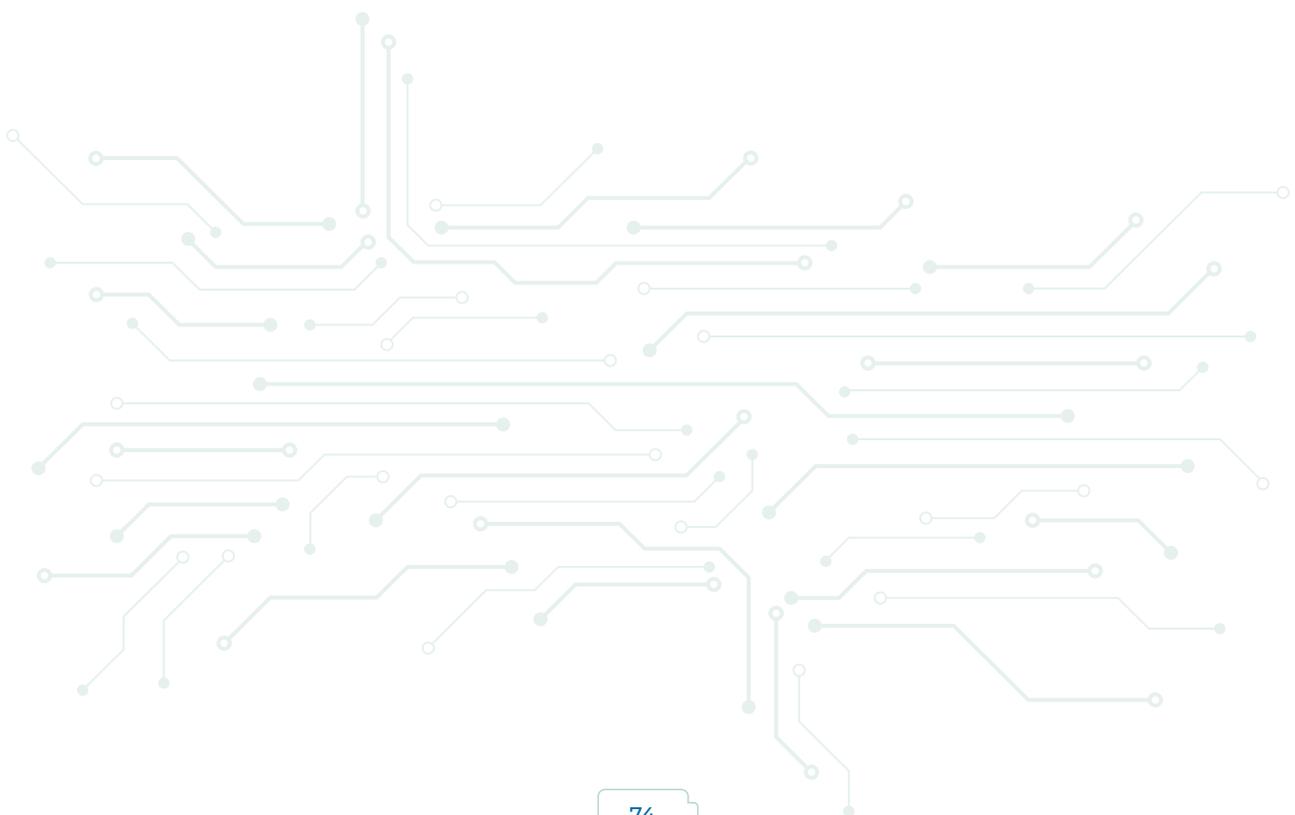


Con la aprobación de la Ley N° 9518 en 2018, se incentiva la adquisición de vehículos eléctricos en licitaciones públicas del Estado y se establece la meta de electrificar, al menos, el 5% de la flota de buses cada dos años (MINSAs; MINAE 2022). Ese mismo año se publicó un Plan Nacional de Transporte Eléctrico que incluye medidas concretas para la electrificación de los vehículos (MINAE 2018).

Adicionalmente, la hoja de ruta para un manejo eficiente de las baterías de vehículos eléctricos en Costa Rica desarrollada por el MINAE presenta retos, impactos ambientales y sociales, mejores prácticas y un plan de acción a corto (2030), mediano (2040) y largo plazo (2050) para el manejo eficiente y adecuado de las baterías eléctricas en Costa Rica (MOVE 2022). Como parte de esta hoja de ruta se estimó que para el 2030 se podrían producir alrededor de 1.000 toneladas baterías usadas en Costa Rica y para el 2040 alrededor de 3.000 toneladas (MINSAs; MINAE 2022).

4.2.2.4 Resumen del país

Costa Rica cuenta con una normativa sobre RAEE y pilas, así como con un sistema de REP establecido en la ley de gestión integral de residuos, pero no es obligatoria. Por lo tanto, la gestión de facto de los RAEE sigue estando lejos de ser sólida. Sin embargo, estudios recientes realizados en el país (Domenech Cots and Guillén Miranda 2021; MINSAs; MINAE 2022) confirman que existe abundante conocimiento sobre el tema en el país y que sirve de base hacia mejores prácticas. Los Planes Nacionales de Descarbonización y de Transporte Eléctrico demuestran que Costa Rica quiere ser pionera en la región, pero no se está prestando suficiente atención a las consecuencias de la descarbonización del transporte, es decir, a la creciente generación de baterías usadas de vehículos eléctricos que habrá que gestionar. Con una única planta, un proyecto de la empresa Fortech, como única infraestructura de reciclaje para ULIB, existe la necesidad de exportar las baterías. Sin embargo, Fortech ya es un buen ejemplo para el desarrollo del reciclaje de ULIB en la región centroamericana.





4.2.3 Chile

Junto con Bolivia y Argentina, Chile forma parte del "triángulo del litio", una región con salares cuyos niveles de concentración hacen que su explotación sea altamente rentable en relación con otros yacimientos. Actualmente es uno de los principales países exportadores de litio del mundo (López et al. 2019) a pesar de contar con sólo dos empresas que explotan actualmente el mineral (SQM & Albemarle). En las siguientes secciones se describirá el estado actual de las prácticas de reúso y reciclaje de ULIB abarcando diferentes aspectos: marco regulatorio, infraestructura y capacidades existentes y desarrollos nacionales.

4.2.3.1 Políticas, normativas y planes de REP para LIB

En 2004 se publicó el Decreto 148, que establece las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas a las que deben someterse los residuos peligrosos (Ministerio de Salud 2004). Aunque este decreto sigue vigente e incluye baterías, no se hace mención explícita a las baterías de iones de litio ni a los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.

Desde 2016, Chile cuenta con una legislación que aborda específicamente los RAEE y que solicita la introducción de un esquema de REP para varios productos prioritarios. La Ley Marco de Gestión de Residuos, Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje ("Ley REP")²⁷ (Ministerio del Medio Ambiente 2016), tiene como objetivo reducir la generación de residuos y promover su reúso, reciclaje y otros tipos de valorización, mediante el establecimiento de la REP y otros instrumentos de gestión de residuos. Aunque las baterías de plomo-ácido para automóviles y las baterías alcalinas son dos de los seis productos prioritarios incluidos en el sistema REP, ninguna categoría incluye las LIB. Las LIB pequeñas están incluidas en la categoría de aparatos eléctricos y electrónicos, ya que son componentes de los mismos. Sin embargo, existe un vacío normativo para las baterías de electromovilidad, que actualmente están excluidas de las obligaciones del marco normativo vigente.

Según la ley de REP, los productores de productos prioritarios deben organizar y financiar la recolección de residuos de productos prioritarios en todo el territorio nacional, así como su almacenamiento, transporte y tratamiento, mediante sistemas de gestión individuales o colectivos (véase el apartado 3.4.2). Asimismo, los productores deben garantizar que la gestión de los residuos de los productos prioritarios se lleva a cabo por gestores autorizados y registrados (Ministerio del Medio Ambiente 2016) Estas obligaciones serán exigibles con la entrada en vigencia de los respectivos decretos supremos que establezcan metas y requisitos adicionales asociados para cada uno de los productos prioritarios.

En 2022, la Resolución 207 aprobó la propuesta de proyecto de decreto supremo que establece metas de recolección y valorización y obligaciones asociadas para baterías portátiles y aparatos electrónicos y electrónicos (Ministerio del Medio Ambiente 2022). De acuerdo a este proyecto, las metas de recolección y valorización aumentarán gradualmente en el tiempo a partir del año de su entrada en vigencia, como se muestra en la Tabla 4-4.

²⁷ Ley 20920 que establece Marco para la Gestión de Residuos, REP y Promoción del Reciclaje



Tabla 4-4: Objetivos de recolección y valorización de aparatos eléctricos y electrónicos según la Resolución 207

| Año | Objetivo de recolección/valorización |
|-------------------------|--------------------------------------|
| Primer año | 3% |
| Segundo año | 5% |
| Tercer año | 8% |
| Cuarto año | 12% |
| Quinto año | 16% |
| Sexto año | 20% |
| Séptimo año | 24% |
| Octavo año | 30% |
| Noveno año | 37% |
| A partir del décimo año | 45% |

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente 2022

4.2.3.2 Infraestructuras de reciclaje e iniciativas de reuso existentes

En términos de reciclaje de ULIB, Chile cuenta con algunas iniciativas activas. En el momento en que se realizó este estudio, sólo se identificó una empresa que realizaba el reciclaje de ULIB en fase operativa y otra a escala piloto. Ecominería es una empresa con procesos establecidos para el reciclaje de LIB usadas (Ver Ejemplo de práctica 5). En 2023 la start-up Relitia estaba desarrollando un proceso piloto de reciclaje de ULIB (ver Ejemplo de práctica 6).

En el tema de la reuso de las ULIB, se identificó otra start-up, Andes Electronics. Esta empresa tiene planes para desarrollar opciones de reuso de las ULIB en vehículos eléctricos más pequeños (ver Ejemplo práctico 7). Además, cabe mencionar que la empresa minera chilena SQM ha firmado acuerdos con otros actores, como LG Energy Solution y la Universidad Católica del Norte (UCN), para promover y desarrollar infraestructura de reciclaje de ULIB en el país (SQM Media Center 2022; PV magazine 2022).



Ejemplo práctico 5: Ecominería

Recuperación y valorización de materiales de la masa negra

Ecominería es una empresa chilena especializada en el reciclaje de ULIB. La planta procesa diez toneladas al mes de ULIB de todo tipo. Uno de los productos objetivo del proceso es la masa negra que se obtiene de las baterías de Li-Co, presentes en dispositivos como teléfonos móviles, tabletas y drones. Ecominería ya recibe baterías de vehículos eléctricos, y el plan a largo plazo es obtener masa negra también de ellas. Aunque se recuperan materiales importantes como cobre, sulfato de cobalto, grafito y aluminio, Ecominería no recupera litio, ya que sus cantidades son muy pequeñas.

La empresa tiene un acuerdo de circularidad con Samsung Latinoamérica, lo que significa que procesa tres toneladas al mes de baterías de la compañía telefónica y les revende el material para producir nuevas baterías. También tiene un acuerdo con Gaia Vitare, una empresa colombiana de gestión de residuos, para reciclar baterías de teléfonos móviles procedentes de Colombia. Además, esta empresa mantiene una colaboración activa con la start-up Andes Electronics, que evalúa las baterías que recogen y retiene las que siguen siendo aptas para aplicaciones estacionarias de almacenamiento de energía.

Con su actual capacidad de procesamiento de 1.200 toneladas por año, Ecominería estaría en condiciones de procesar la totalidad de baterías de iones de litio al final de su vida producidas en Chile, que se estiman en 734 toneladas anuales (ANIR 2021). Sin embargo, con el creciente número de vehículos eléctricos que entran en el mercado nacional, esta capacidad no será suficiente para la cantidad futura de baterías de litio. Según la empresa, faltan inversiones para ampliar este tipo de tecnología a fin de satisfacer las necesidades de gestión del final de la vida de las baterías en otras regiones del país y de América Latina.



Ejemplo práctico 6: Relitia

El reciclaje de ULIB dirigido a la recuperación de litio

Relitia es una start-up centrada en el reciclaje de todo tipo de ULIB y en la recuperación de los materiales contenidos para reinsertarlos en la cadena de valor de nuevas baterías. Relitia cuenta con un proceso piloto de reciclaje, en el que se utiliza el desmontaje manual y el procesamiento hidrometalúrgico para la recuperación de las fracciones de las baterías. Actualmente, la empresa recupera grafito, sales metálicas y sales de litio, y los separa de los componentes inertes.

Durante la instalación, las baterías recolectadas se descargan utilizando una solución electrolítica para alcanzar voltajes inferiores a 1V. Una vez descargadas, las baterías se desmontan manualmente. El cátodo, el ánodo y el separador se tratan en un proceso hidrometalúrgico, separando el grafito en forma sólida y los metales, que se disuelven en una solución acuosa. Finalmente, los metales se precipitan en forma de hidróxido u óxido. El litio puede recuperarse precipitándolo en forma de carbonato.

Relitia cuenta con el apoyo de la empresa Sustrendlab y dispone actualmente de un fondo público de dos años para ampliar el proceso. En la fase piloto actual se procesan baterías de teléfonos móviles y patinetes eléctricos. Está previsto que en un futuro próximo se realicen pruebas con las primeras baterías de vehículos grandes, como las Pouch de LG-Chem y las 18650 de Tesla. No obstante, la empresa prevé que en los próximos años no se recuperará suficiente materia prima (valor) para trabajar exclusivamente con baterías de vehículos eléctricos.

Todavía a escala de laboratorio, la capacidad actual de procesamiento de Relitia es de 50 a 80 baterías al mes, con una media de 5 kg por batería. Sin embargo, Relitia se encuentra buscando inversiones que les permita una planta con una capacidad de entre 500 kg y 1 tonelada por hora. Relitia también declaró que su objetivo no es limitarse a obtener masa negra, sino separar los materiales y obtenerlos con el grado adecuado para reinsertarlos en la cadena de valor. Esto ya se ha conseguido con el grafito y las sales catódicas.



Ejemplo práctico 7: Andes Electronics

Reutilización de ULIB para aplicaciones de segunda vida

Andes Electronics es una start-up chilena que crea sistemas de almacenamiento de baterías de segunda vida (SLBESS), sistemas de gestión de baterías (BMS) y otros servicios dedicados a la reutilización de baterías. Para el desarrollo de su tecnología, los fundadores contaron con el apoyo de instituciones académicas, así como con financiación estatal a través del programa Startup Ciencia 2021.

Debido a la disponibilidad de baterías usadas, Andes Electronics procesa actualmente baterías de plomo-ácido. Sin embargo, su objetivo a largo plazo es centrarse en las ULIB. Actualmente, la empresa está desarrollando tecnologías para sustituir las baterías de plomo-ácido en aplicaciones de transporte e industriales por ULIB portátiles de segunda vida (por ejemplo, baterías de dispositivos electrónicos). Además, la empresa ya ha empezado a trabajar con baterías de segunda vida para pequeños vehículos eléctricos como e-bikes y e-scooters.

Figura 4-4: Modelo de negocio para aplicaciones de segunda vida de ULIB en Chile



Fuente: Andes Electrónica 2023



4.2.3.3 Acontecimientos nacionales relevantes

Chile es uno de los países más avanzados de América Latina en legislación relacionada con la movilidad eléctrica (MINSAs; MINAE 2022). Chile cuenta con una Estrategia Nacional de Electromovilidad, cuyo objetivo es "lograr que el 100% de las nuevas incorporaciones al transporte público urbano sean vehículos de cero emisiones en 2035, que el 100% de las ventas de vehículos livianos y medianos sean de cero emisiones en 2035, y que el 100% de las ventas de vehículos para transporte interurbano de pasajeros y carga sean cero emisiones en 2045". (Ministerio de Energía 2021).

En cuanto a la estrategia de electrificación, el acceso de la población chilena a la electricidad es casi absoluto. De hecho, la red eléctrica da cobertura al 99% de la población (Ministerio de Energía 2020). Hasta el 2021 Chile había instalado 6.000 sistemas descentralizados de energía renovable, muchos de los cuales incluyen baterías para el almacenamiento de energía. Una vez alcancen el fin de su vida útil, estas baterías también requerirán una gestión responsable con el medio ambiente. (Soler Guzmán et al. 2021).

4.2.3.4 Resumen del país

La ley nacional de REP no incluye las LIB como categoría de producto prioritaria, sino como componente de aparatos eléctricos y electrónicos (para los que existe una categoría específica). Sin embargo, en Chile se ha observado una creciente concientización sobre la correcta gestión del final de la vida. En cuanto a las capacidades existentes, se identificaron una instalación en fase operativa y una start-up especializada exclusivamente en el reciclaje de ULIB, así como una start-up para aplicaciones de segunda vida de las ULIB. Estos tres actores están bien interconectados y todos ellos tienen planes de expansión, no sólo en Chile sino en la región (por ejemplo, Ecominería tiene acuerdos con empresas de otros países sudamericanos). En cuanto al desarrollo de negocios de segunda vida para las baterías al final de su vida, los principales problemas en Chile son la falta de capacidad para la certificación de calidad de las baterías, y la falta de apoyo a los modelos de negocio de segunda vida. Los actores entrevistados identificaron las condiciones geográficas del país y las distancias de transporte como una barrera importante que hace más compleja la logística inversa para las LIB.



4.2.4 México

Aunque México cuenta con reservas de litio sin explotar, el país aún no ha desarrollado una cadena de valor para este mineral. En 2022, el Senado Mexicano aprobó una iniciativa presidencial para nacionalizar el litio, que será explotado exclusivamente por el estado a través de su recién fundada empresa LitoMx (SEGOB 2022). En las siguientes secciones se describirá el estado actual de las prácticas de reutilización y reciclaje de ULIB cubriendo diferentes aspectos: marco regulatorio, infraestructura y capacidades existentes y desarrollos nacionales.

4.2.4.1 Políticas, normativas y sistemas de REP

Por el momento, México no cuenta con una normativa específica para la gestión de baterías y RAEE al final de su vida útil. Sin embargo, las LIB están cubiertas por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR de 2003), que las clasifica como residuos "especiales" pero no peligrosos²⁸ y establece un marco de responsabilidad compartida entre diversos actores de la industria. Las LIB están contempladas indirectamente en la norma oficial mexicana²⁹ para el manejo de residuos peligrosos, que incluye algunos productos electrónicos (que contienen baterías) en sus listas (SEMARNAT 2012).

La norma técnica oficial mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011 establece los criterios para clasificar dichos residuos especiales y determinar cuáles están sujetos a un plan de manejo. Aunque los elementos y procedimientos para la formulación de planes de manejo están bien definidos, estos planes son voluntarios y no hay repercusiones si no se cuenta con ellos.

En 2020 se publicó un estudio de referencia para la gestión integral de residuos (SEMARNAT 2020). Este estudio menciona a las baterías como un caso emblemático en México para el que sólo se desarrolló una política temporal, pero que no tuvo efectos reales en la calidad ambiental del país.

El mismo documento identificaba los retos para la aplicación de buenas prácticas de gestión de residuos. Uno de los principales retos es la ausencia de una institución definida encargada del seguimiento y control de los planes nacionales de gestión de residuos. Además, se menciona como otro reto la coordinación de varios estados para aplicar y controlar estos planes a nivel regional. (SEMARNAT 2020).

²⁸ LIB incluidas en el artículo 19 de la LGPGIR de 2003 bajo: "Baterías que contengan litio, níquel, mercurio, cadmio, manganeso, plomo, zinc o cualquier otro elemento que permita la generación de energía en las mismas, en niveles que no estén considerados como residuos peligrosos en la norma oficial mexicana correspondiente".

²⁹ NOM-052-SEMARNAT-2005



Para hacer frente a estos retos, se desarrolló y publicó en 2022 el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de Residuos de Manejo Especial (PNPGIRME)³⁰ (SEMARNAT 2022). Los objetivos prioritarios del PNPGIRME son:

- Generar información sobre los residuos de manejo especial en el país, para fortalecer la toma de decisiones en los tres niveles de gobierno.
- Promover la prevención de la generación, así como la adecuada gestión y aprovechamiento de los residuos de manejo especial.
- Promover un marco legal adecuado que establezca atribuciones y competencias claras para la gestión de los residuos de manejo especial.

Aunque la publicación de este programa supone una mejora en el marco normativo para México, todavía no se dispone de suficiente información sobre las cantidades de baterías usadas generadas en el país. La falta de avances en el marco regulatorio de México dedicado a las baterías y baterías usadas, dificulta especialmente la implementación de buenas prácticas para el reuso o reciclaje de las baterías al final de su vida.

4.2.4.2 Infraestructuras de reciclaje e iniciativas de reutilización existentes

En México, la única empresa conocida que opera actualmente una planta de reciclaje de ULIB es SITRASA. Debido a la falta de información de primera mano obtenida en el transcurso de este estudio, no se pueden aportar más datos sobre el proceso o las capacidades en este momento. Reverse Logistics Group Latin America (RLG LATAM) también tiene operaciones en México relacionadas con la logística inversa de RAEE; sin embargo, no se confirmó si éstas involucran ULIB. Otras iniciativas para el desarrollo de infraestructuras de reciclaje implican a otros actores nacionales relevantes, como la Cámara Mexicana del Litio (CaMexLi), que anunció en 2021 la construcción de una planta de reciclaje de ULIB en el estado de Querétaro. Ese mismo año, dos empresas de movilidad eléctrica anunciaron proyectos de infraestructura para el futuro (Florencia Guglielmetti 15 Jun 2021; Ailen Pedrotti 8 Nov 2021).

Desde 2021, no se ha publicado más información sobre el estado actual de ejecución de los proyectos anunciados, por lo que no se ha confirmado si estas instalaciones están en desarrollo. En cuanto a la reutilización de las ULIB, se identificó una iniciativa llamada REMSA. Esta empresa utiliza ULIB EoL procedentes de vehículos eléctricos para convertirlas en unidades de energía solar (véase el ejemplo práctico 8).

³⁰ Programa Nacional de Prevención y Gestión Integral de Residuos de Manejo Especial - PNPGIRME



Ejemplo práctico 8: REMSA

Reutilización de ULIB en unidades de energía solar

REMSA (Recicla Electrónicos México), hasta ahora activa en el reciclaje de RAEE, ha desarrollado una nueva línea de negocio para la reutilización y reaprovechamiento de ULIB. El objetivo de la empresa es reutilizar las ULIB usadas en unidades autónomas (móviles) de energía solar y bancos estacionarios de almacenamiento de energía. Además, la empresa participa en programas de recolección con empresas de automoción y ofrece su propio servicio de recolección para ciudadanos y empresas a través de una aplicación móvil.

4.2.4.3 Acontecimientos nacionales relevantes

En este momento, el gobierno de México tiene gran interés en explorar opciones para explotar sus propias reservas de litio y convertirse en productor de baterías para electromovilidad. Para ello, la Cámara Mexicana del Litio es un actor visible que busca facilitar las inversiones en México dedicadas al procesamiento del litio (Becerra 21 Apr 2022). En contraste con los desarrollos en otros países de la región en cuanto a capacidades de reutilización y reciclaje de baterías de litio al final de su vida útil, no se han observado avances importantes para México.

México cuenta con una *Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME)* en fase de desarrollo, cuyo objetivo es que el 10% de las ventas de vehículos en 2030 sean eléctricos y que el parque automotor esté electrificado al 100% en 2050. Además, la estrategia prioriza la implementación de una regulación del fin de la vida útil para las baterías de los vehículos eléctricos para 2030, que debería incluir esquemas de reciclaje y de segunda vida como unidades de almacenamiento de energía (Altamirano 18 Aug 2022). En 2021, la Secretaría de Relaciones Exteriores inició una colaboración con la Universidad de California para desarrollar una estrategia para la electrificación de la industria automotriz en México. Esta iniciativa "propone una transición ordenada hacia la electromovilidad no sólo a nivel nacional, sino también a nivel regional, coordinando la integración productiva con el socio comercial más importante [de México], Estados Unidos" (Secretaría de Relaciones Exteriores; University of California 2022). El objetivo es presentar en 2023 una hoja de ruta binacional para la creación e implementación de políticas claras y definidas para la industria automotriz mexicana hacia la fabricación y uso de vehículos eléctricos. También se mencionó por parte de los entrevistados que el país se está involucrando rápidamente en la fabricación de baterías y vehículos eléctricos, pero no en absoluto en la gestión del fin de la vida de los mismos.

En cuanto a la electrificación sin conexión a la red, hasta 2021 México había instalado 130.000 sistemas descentralizados de energía renovable, cuyas baterías deben gestionarse en la fase del fin de la vida (Soler Guzmán et al. 2021).



4.2.4.4 Resumen del país

En México apenas se identificaron capacidades de reciclaje o reuso de ULIB y había muy poca información disponible públicamente. El país no cuenta con una normativa específica para las ULIB, ni con un plan nacional obligatorio de REP, ni con una ley de economía circular. Sólo se detectó una empresa de reciclaje de ULIB en fase operativa, pero no se pudo establecer ningún contacto. Los desarrollos relativos a la segunda vida para las ULIB se encuentran en una fase muy temprana, con una empresa que está empezando a participar en este sector. Los actores entrevistados para este estudio identificaron las características del mercado mexicano como un factor importante que explica la escasa concienciación sobre la necesidad de una gestión ambientalmente responsable de los crecientes volúmenes de ULIB. La constitución federal y la falta de coordinación institucional de este país también son barreras probables para los desarrollos nacionales en términos de reuso y reciclaje de ULIB.

La coordinación entre estados para lograr acuerdos regionales se consideró un factor que presumiblemente añade complejidad al progreso del país en términos de aplicación de la normativa. Además, los actores describieron los cambios en la administración federal y regional como un reto y una razón importante para el cambio de intereses sobre los proyectos de infraestructura anunciados (por ejemplo, su cancelación). Una posible razón de la falta de avances podría ser la dependencia del país respecto a EE.UU. principal socio comercial de México y donde ya se dispone de tecnología e infraestructuras para reciclar las ULIB.

4.3 Panorama de los actores activos en el reuso, reutilización y reciclaje de las ULIB en ALC

Para promover mejores prácticas de gestión del final de la vida útil de las baterías de iones de litio es fundamental comprender el panorama actual de los actores en la región. Por lo tanto, paralelamente a la investigación documental y las entrevistas para este estudio, se identificaron los actores activos en América Latina y el Caribe para el tema de la reutilización y el reciclaje de las ULIB. El mapa de actores resultante se presenta en el Figura 4-5. La lista completa de actores identificados como activos en los cuatro países seleccionados se presenta en el Anexo II.

Por otra parte, los actores identificados con capacidades operativas relacionadas con el reuso y el reciclaje de ULIB en los cuatro países objeto de estudio se han resumido en la Tabla 4-5.



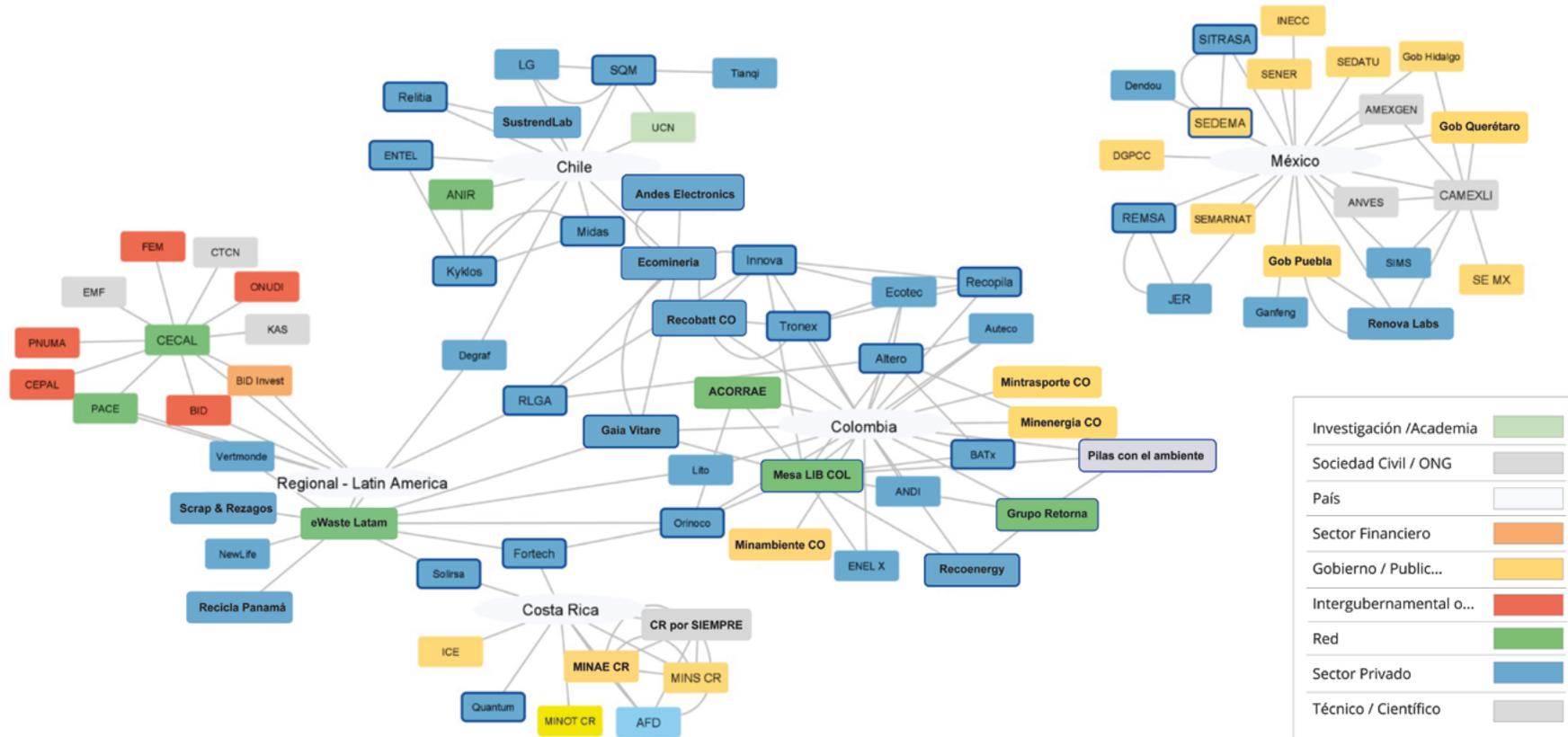
Tabla 4-5: Actores con iniciativas y capacidades existentes para la gestión del fin de la vida de LIB en los países seleccionados

| Tipo de actividad | Colombia | Costa Rica | Chile | México | Regional |
|---|--|--|---|--|--|
| Recolección y logística inversa de LIB | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grupo Retorna (incluye Pilas con el Ambiente y Recoenergy) ▪ Recopila | | <ul style="list-style-type: none"> ▪ ENTEL (en alianza con Kyklos) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Movistar (en alianza con REMSA) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grupo de Logística Inversa (RLG) |
| Reciclaje de ULIB | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Innova Ambiental ▪ Altero | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fortech | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ecominería ▪ Relitia | <ul style="list-style-type: none"> ▪ SITRASA | |
| Reutilización / reuso de ULIB | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Recobatt ▪ BATX | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fortech | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Andes Electrónicos | <ul style="list-style-type: none"> ▪ REMSA | |
| Otros agentes interesantes (que actualmente exploran o desarrollan iniciativas/proyectos relacionados) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Orinoco ▪ Tronex ▪ Gaia Vitare | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Solirsa ▪ Socios de Quantum Lifecycle ▪ LabVolta (Universidad de Costa Rica) | <ul style="list-style-type: none"> ▪ SQM ▪ LG Energy Solution ▪ Universidad Católica del Norte | <ul style="list-style-type: none"> ▪ CaMexLi ▪ Laboratorios Renova | <ul style="list-style-type: none"> ▪ E-Waste LATAM |

Fuente: elaboración propia



Figura 4-5: Mapeo de los actores en los cuatro estudios de caso seleccionados en ALC



Fuente: Elaboración propia

La mayoría de los actores identificados están principalmente conectados con otros actores dentro de sus mismos países, y no dentro de la región. Especialmente México tiene hasta ahora conexiones muy limitadas con otros países o redes regionales. La falta de capacidades para la ampliación y expansión de los modelos de negocio también es mencionada como un reto importante por parte de actores relevantes (véanse los capítulos 4.2.1 y 4.2.2). 4.2.1 a 4.2.4).

*Las conexiones representan interacciones, asociación de participación activa o visibilidad en torno al tema de LIB para los países seleccionados.

** Los agentes que trabajan activamente en el reciclaje o la reutilización de LIB aparecen resaltados con un borde de diferente anchura.

*** Las conexiones dobles entre actores indican vínculos declarados por ambas partes o una estrecha cooperación.



5. Hallazgos sobre el marco regulatorio y capacidades en ALC



Considerando las experiencias en los países seleccionados para los casos de estudio, los siguientes aspectos resumen los hallazgos y desafíos para mejorar las prácticas de reúso y reciclaje de ULIB en la región:



Tecnología para el reúso y el reciclaje de ULIB

- Los procesos actuales de reciclaje de ULIB en ALC llegan en su mayoría hasta la fase de tratamiento mecánico (trititación) y la posterior separación de las distintas fracciones (masa negra, plástico, cobre, aluminio). Las empresas de reciclaje siguen dependiendo de las fundiciones del norte global (Europa, Norteamérica, Asia) para exportar y recuperar los materiales valiosos.
- Actualmente, en la región de ALC no se lleva a cabo ninguna recuperación (significativa) de litio a partir de baterías usadas. Dado que la masa negra se exporta en su mayor parte para su posterior tratamiento (véase más arriba), el potencial de recuperación de Li se desplaza a estas regiones. Aún si la masa negra fuera tratada dentro de la región en el futuro, el proceso de producción secundaria de litio a partir de escorias sería completamente diferente de la producción primaria regional de litio a partir de salmueras (como se aplica en las industrias mineras).
- Los volúmenes actuales de baterías de litio que necesitan una gestión del fin de la vida útil siguen estando compuestos principalmente por baterías LCO y NMC. Se prevé que en los próximos años aumenten los volúmenes de baterías LPF, entre otras cosas como consecuencia de los vehículos eléctricos. Una consecuencia de esta evolución es que los procesos de reciclaje podrían dejar de generar ingresos suficientes a partir de los materiales recuperados para cubrir los costes de tratamiento (ya que ni el cobalto ni el níquel estarán presentes en cantidades significativas en la masa negra). En este caso, para garantizar las capacidades de reciclaje en la región, serían necesarios instrumentos financieros adicionales para cubrir los costes. Como se muestra en la revisión global, los sistemas REP podrían ser una solución viable para cerrar esta brecha. A modo de ejemplo, el sistema de REP aún no obligatorio en Costa Rica ya es un pilar importante en el modelo de negocio de un reciclador local.
- Actualmente los actores de la región perciben el reciclaje de ULIB sobre todo como una posible fuente de ingresos. Esto se explica posiblemente por el hecho de que los volúmenes actuales de ULIB contienen porcentajes comparativamente elevados de



materiales "valiosos" como el níquel y cobalto (véase más arriba). Además, la narrativa y que acompaña a algunas de las regulaciones relevantes se centra en mencionar los posibles ingresos derivados del tratamiento final sin considerar que los gobiernos deban reservar el presupuesto respectivo para la gestión del fin de la vida útil de las baterías. No obstante, algunas de las empresas de reciclaje ya distinguen entre los distintos tipos de baterías y se aseguran de cobrar tasas por el tratamiento de baterías de tipo LFP.

- La rastreabilidad de las cantidades de LIB al final de su vida útil es muy baja en la región. El mercado informal de gestión de residuos es un problema importante en todos los países estudiados. Debido a la informalidad, los residuos gestionados a través de estos canales no pueden cuantificarse.
- Faltan inversiones en la región para ampliar las plantas piloto o procesos existentes a pequeña escala (por ejemplo, Fortech, Ecominería, Altero). Desde la perspectiva de los actores consultados, el hecho de que los inversores latinoamericanos se centren en los resultados a corto plazo constituye un obstáculo importante para este tipo de desarrollos. En consecuencia, sigue habiendo poca inversión en la región para establecer o ampliar las capacidades de reciclaje de baterías al final de su vida útil.
- Los esfuerzos que se realizan actualmente en la región para mejorar la gestión al fin de vida de las LIB usadas se centran principalmente en las opciones de reciclaje, mientras que las iniciativas de reuso reciben muy poco apoyo (tanto de los gobiernos como de los inversionistas potenciales).



Marco normativo

- Por lo que respecta al marco normativo, existen pocas regulaciones específicas sobre las LIB en la región. En la mayoría de los países, las LIB se gestionan bajo leyes de residuos peligrosos o especiales, como en el caso de México, o bajo leyes de gestión de RAEE, como en el caso de Costa Rica y Chile. En Colombia, el marco legal es más específico, y las LIB se regulan bajo una categoría para baterías y acumuladores. El marco normativo incluye incluso algunos requisitos específicos para las baterías de iones de litio de mayor tamaño (industriales y de vehículos).
- Los marcos normativos existentes siguen basándose principalmente en medidas voluntarias y a menudo carecen de requisitos obligatorios. Según los actores locales, las medidas obligatorias existentes a menudo no se aplican suficientemente. Como confirma la revisión global de buenas prácticas, la existencia de marcos regulatorios es un requisito previo necesario para el desarrollo de prácticas efectivas de reuso y reciclaje, ya que el reciclaje de baterías de iones de litio no es un negocio rentable per se. Una comparación dentro de la región muestra que, de los cuatro países estudiados, Colombia es el más avanzado en términos de capacidades de gestión de las LIB. Al mismo tiempo, Colombia es el país con el marco normativo más sólido, con numerosos requisitos obligatorios. Por otro lado, México, Chile y Costa Rica carecen de normativa específica o sólo cuentan con regímenes voluntarios.
- Los países seleccionados cuentan con estrategias nacionales de electromovilidad (publicadas o en fase de desarrollo), comprometidas con la descarbonización con el objetivo de hacer crecer los mercados de EV. Sin embargo, se presta mucha atención al funcionamiento de los vehículos eléctricos y muy poca o ninguna a la gestión de sus componentes, incluidas las baterías. Hasta ahora, la gestión de las baterías de los vehículos eléctricos no se había abordado directamente en las normativas sobre residuos de los países estudiados. Colombia es la única excepción, ya que estas baterías se incluirán en los sistemas de recolección obligatoria a partir de 2024. Costa Rica también tiene planes para abordar este tipo de baterías en un futuro próximo.



Otros resultados

- Se ha constatado que existen muchas concepciones erróneas y precauciones entre los actores, como las empresas de transporte y los fabricantes, que actualmente retrasan o impiden que importantes volúmenes de baterías lleguen a los empresas recicladoras nacionales de los países examinados. En este contexto, es necesaria una información mejor y armonizada sobre los riesgos de las LIB, así como el apoyo de los entes gubernamentales en el desarrollo de medidas centralizadas para el almacenamiento, embalaje y transporte seguros de las LIB usadas.
- Existe poca cooperación regional entre países vecinos para mejorar las prácticas de gestión del fin de la vida de las LIB, aparte de algunos acuerdos comerciales bilaterales en curso. Así lo confirmó uno de los expertos consultados sobre el tema. Una de las pocas excepciones es WEEE LATAM, una red de gestores de RAEE de varios países latinoamericanos que trata de promover una buena gestión de los residuos. Esta red también cuenta con un grupo de trabajo establecido sobre baterías de iones de litio. Algunas empresas están evaluando actualmente las opciones para compartir y distribuir sus conocimientos y tecnología en la región, lo que posiblemente aumentará la cooperación en el futuro.
- El cumplimiento del Convenio de Basilea constituye un reto para la cooperación regional en la gestión del fin de la vida de las baterías de litio. Las pequeñas y medianas empresas activas en actividades de reuso y reciclaje de ULIB en ALC no disponen de las capacidades administrativas para realizar los trámites y esfuerzos legales necesarios para aplicar un procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo a los movimientos transfronterizos de LIB usadas. Esta situación reduce la motivación para recoger ULIB en países con capacidades nacionales de reciclaje inexistentes. La opción de exportar ULIB usadas a empresas de reciclaje de la región que teóricamente estarían en condiciones de procesar mayores volúmenes, como ya hacen, también se ve limitada por este obstáculo administrativo. Diversos actores mencionaron el apoyo jurídico y las soluciones para la consolidación colectiva de los volúmenes de LIB en el almacenamiento, el transporte y la exportación como posibles formas de abordar este reto.



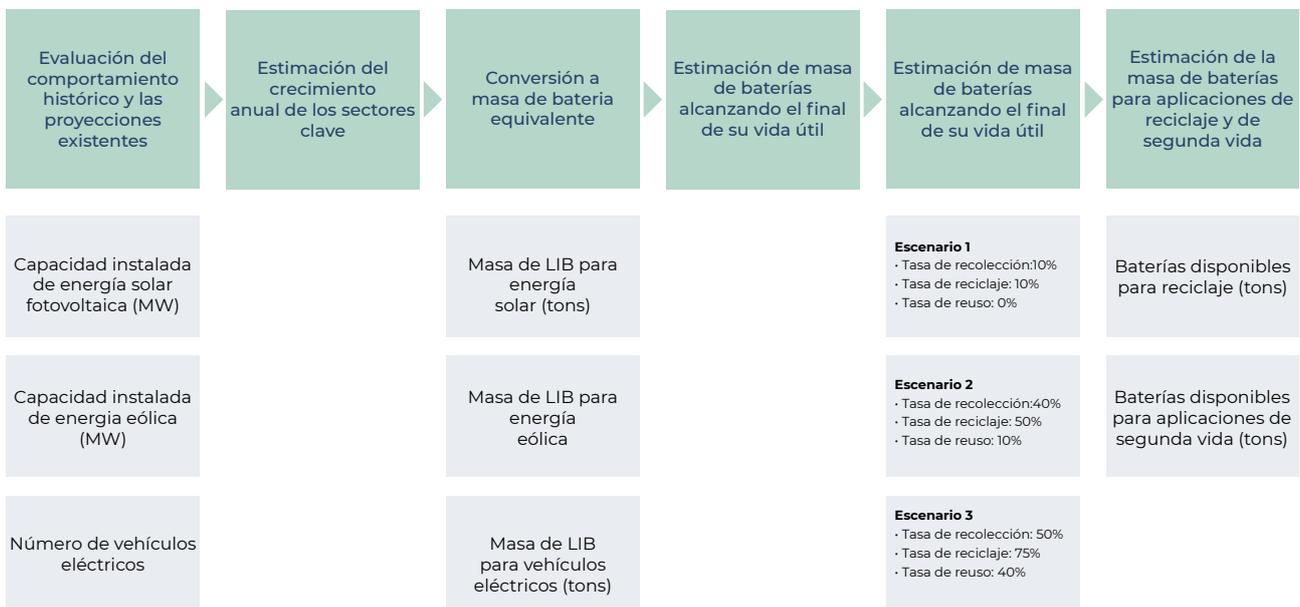
6. Perspectivas regionales



En esta sección se presentan los resultados más relevantes de las estimaciones de las cantidades de baterías de litio alcanzando el fin de su vida para toda la región de América Latina en el período 2024-2050, junto con un análisis de escenarios de los volúmenes potenciales de baterías disponibles para reciclaje y reuso y los requisitos de inversión necesarios para establecer la infraestructura requerida para gestionar estos volúmenes.

Las estimaciones tienen en cuenta únicamente las baterías asociadas a tres sectores clave: Almacenamiento de energía solar fotovoltaica, almacenamiento de energía eólica y almacenamiento de energía para vehículos eléctricos, incluyendo autos eléctricos ligeros y buses eléctricos. Estos sectores fueron seleccionados de acuerdo con los requisitos del proyecto, y teniendo en cuenta que estos sectores: i) emplean ULIB de gran tamaño, ii) están asociados a aplicaciones que son críticas para los esfuerzos de descarbonización de la región, y iii) se espera que tengan una adopción significativa en la región en los próximos años. (López Soto et al. 2022). La siguiente sección se centra en los resultados de las estimaciones, proporcionando una visión general del enfoque metodológico que se puede ver en la Figura 6-1 abajo, y la metodología y los supuestos se explican en detalle en el Anexo IV.

Figura 6-1: Resumen de la metodología para la estimación de ULIB



Fuente: Elaboración propia



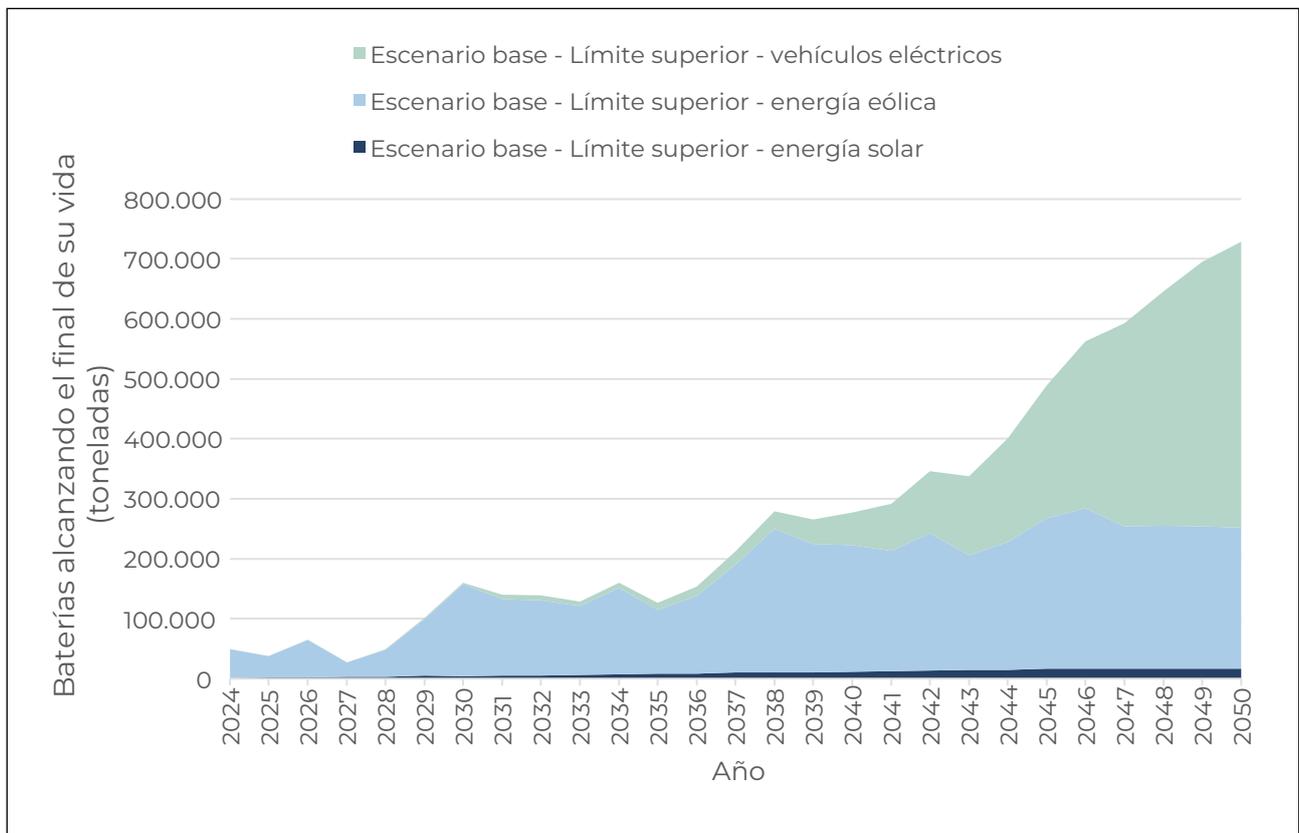
6.1 Estimación de los volúmenes de ULIB

6.1.1 Escenario base

La Figura 6-2 y la Figura 6-3 proporcionan una visión general de los valores límite superiores del Escenario base que muestran la masa anual y acumulada de baterías (en toneladas) que llegan al final de su vida útil (EoL) durante el período 2024 - 2050 para la región de ALC. El escenario de referencia no considera ninguna aplicación de reúso de baterías.

Como puede verse en Figura 6-2. Las baterías para la energía solar fotovoltaica representan una pequeña parte de las baterías que alcanzan el final de su vida, siendo la mayor parte de las baterías residuales importadas por el sector de los vehículos eléctricos en 2050. La Tabla 6-1 proporciona los límites superior e inferior de los volúmenes anuales de baterías que alcanzan el fin de su vida estimados para los años 2030, 2040 y 2050 por sector.

Figura 6-2: Masa anual de ULIB que llega al final de su vida útil (EoL) – Escenario base



Fuente: Elaboración propia



Los volúmenes de baterías tienen una tendencia creciente, explicada por el aumento asociado al número de vehículos eléctricos (EV) que ingresan al mercado y al aumento de la capacidad instalada para energía eólica, se ha estimado que entre 660.000 y 730.000 toneladas de baterías llegarán al final de su vida útil en la región de ALC en el año 2050.

Tabla 6-1: Masa de ULIB que llega al EoL al año (toneladas) – Escenario base

| Año | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Energía solar fotovoltaica | 900 | 4,500 | 7,400 | 11,400 | 10,100 | 17,000 |
| Energía eólica | 108,600 | 153,700 | 171,500 | 211,500 | 174,100 | 235,300 |
| Vehículos Eléctricos | 1,800 | 1,800 | 41,100 | 53,900 | 372,000 | 476,700 |
| Total | 111,200 | 160,000 | 232,800 | 276,800 | 660,800 | 728,900 |

Fuente: Elaboración propia

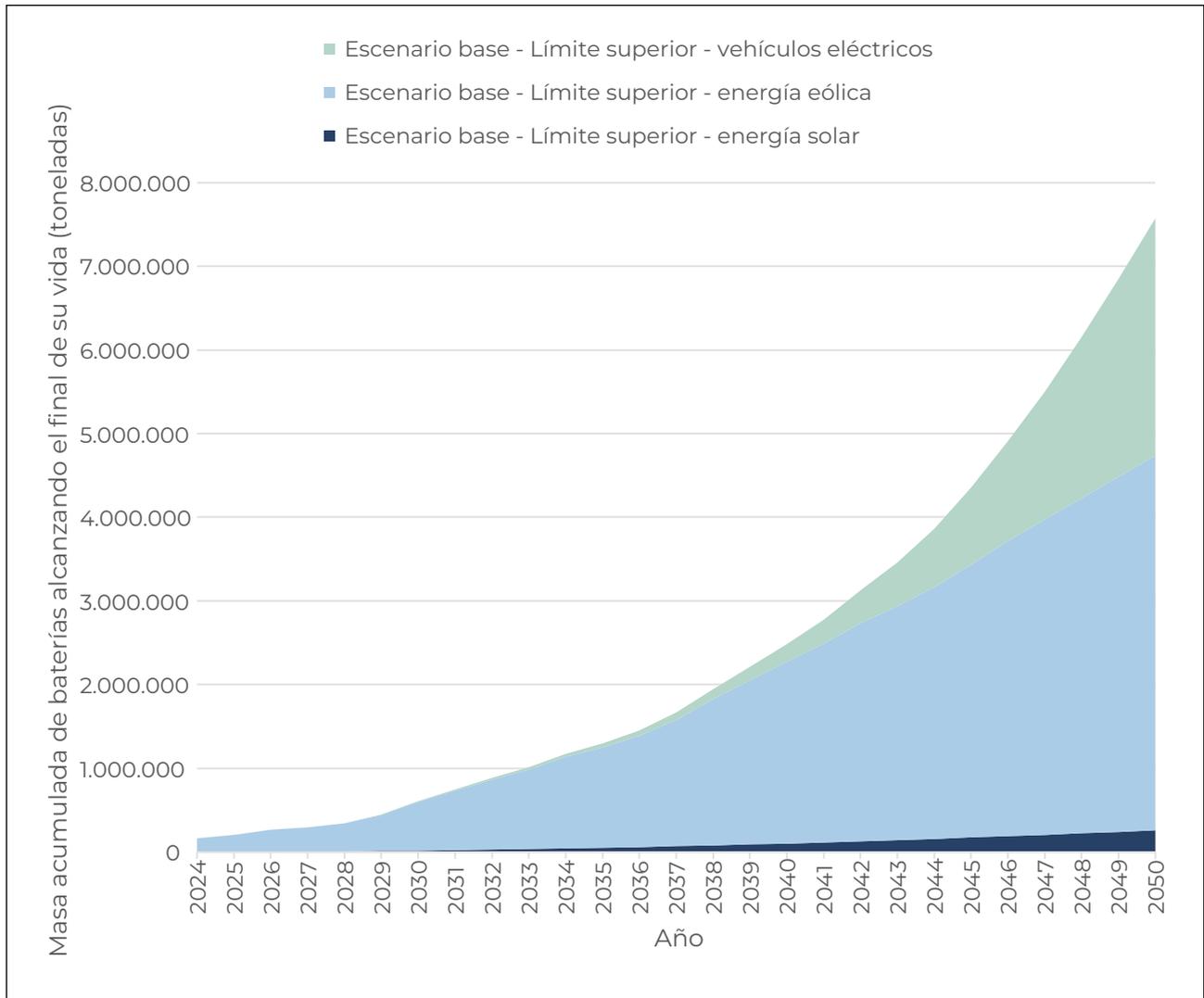
La disminución de la masa de baterías que alcanza el fin de su vida en determinados años puede explicarse debido al comportamiento de los datos disponibles de los sectores importadores (generadores) de baterías seleccionados. Por ejemplo, la disminución en los años 2025 y 2027 está asociada a una menor capacidad instalada adicional de energía eólica añadida en la región en los años 2017 y 2019, lo que se traduce en menores volúmenes de baterías entrando en el mercado en esos años, y alcanzando así su EoL en 2025 y 2027. Los picos al alza en las estimaciones, como los observados en 2034, 2038 y 2042, están asociados a la gestión de EoL de baterías que entraron en el mercado como sustitución de baterías que alcanzaban su EoL. Por

ejemplo, el pico de 2034 corresponde a los volúmenes adicionales de baterías que alcanzaron su EoL y que entraron en el mercado en 2026, como sustitución de baterías instaladas para sistemas de energía eólica en 2018.

Para el año 2050, se ha estimado que la región de América Latina y el Caribe tendría potencialmente un aproximado de entre 6,6 millones y 7,5 millones de toneladas métricas de baterías de iones de litio de los sectores de energía renovable y vehículos eléctricos que habrían llegado al final de su vida útil. La gestión de estos volúmenes requerirá -ya mucho antes de 2050- intervenciones que garanticen su gestión ambientalmente responsable y segura.



Figura 6-3: Masa acumulada de ULIB que alcanza el EoL - Escenario base



Fuente: Elaboración propia



6.1.2 Escenario 1

El escenario 1 es el menos ambicioso de los tres escenarios formulados, este escenario asume una tasa de recolección de ULIB usadas más baja, el 10%. Sin ninguna aplicación para el reúso de estas baterías, se asume que el 10% de las baterías recolectadas serán recicladas. Esto significa que el número de baterías que llegan al final de su vida útil seguirá siendo el mismo que en el escenario de referencia. La Tabla 6-2 y la Tabla 6-3 proporcionan las cantidades de baterías que estarán disponibles para el reciclaje en los años 2030, 2040 y 2050, tanto anual como acumulativamente.

Tabla 6-2: Masa de ULIB disponible para reciclaje por año (toneladas) - Escenario 1

| Año | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Límite | | | | | | |
| Total (toneladas) | 1,100 | 1,600 | 2,300 | 2,800 | 6,600 | 7,300 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-3: Masa de ULIB acumulada disponible para reciclaje (toneladas) - Escenario 1

| Año | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Límite | | | | | | |
| Total (toneladas) | 4,400 | 4,900 | 20,200 | 23,700 | 65,000 | 74,600 |

Fuente: Elaboración propia

Según las estimaciones, la cantidad de material de baterías que estaría disponible para someterse a un proceso de reciclaje en el año 2050 oscila entre 65.000 y 74.600 toneladas. Tras estimar la masa total de baterías disponible para reciclar y asumir los porcentajes típicos de contenido metálico en cada batería (teniendo en cuenta las químicas de las pilas) para los metales más relevantes en una LIB (Al, Cu, Co, Ni y Li) junto con las eficiencias de reciclaje para cada uno de estos metales, es posible estimar el contenido metálico de las baterías disponibles para reciclar. Las hipótesis sobre el contenido de metal y las eficiencias de reciclaje pueden consultarse en el Anexo IV. El contenido estimado de material en las baterías disponibles para el reciclaje en los años 2030, 2040 y 2050 se muestran en la Tabla 6-4 abajo.



Tabla 6-4: Contenido acumulado de metal de las UULIB disponible para reciclaje (toneladas) - Escenario 1

| Año | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Límite | | | | | | |
| Al (toneladas) | 100 | 110 | 430 | 510 | 1,240 | 1,610 |
| Cu (toneladas) | 200 | 220 | 910 | 1,080 | 2,610 | 3,400 |
| Co (toneladas) | 60 | 70 | 270 | 320 | 780 | 1,020 |
| Ni (toneladas) | 40 | 50 | 180 | 220 | 520 | 680 |
| Li (toneladas) | 40 | 50 | 170 | 200 | 480 | 630 |

Fuente: Elaboración propia

Hay que señalar que las cantidades facilitadas anteriormente indican el contenido material y no se traducen directamente en cantidades recuperables, especialmente en el caso del litio, cuya recuperación, en las condiciones actuales, no suele ser recuperado.

6.1.3 Escenario 2

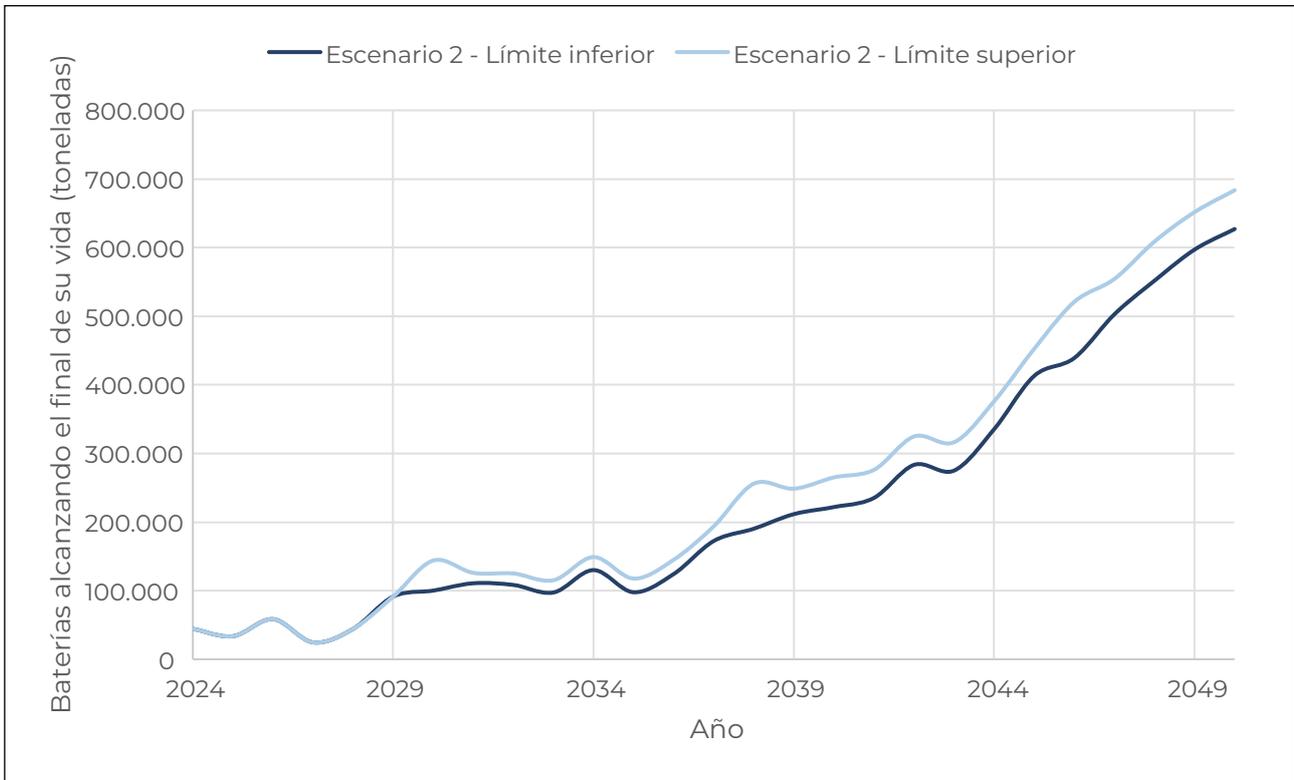
Este escenario supone:

- Un mayor índice de recolección en comparación con el Escenario 1 - 50% (Comparado con el 10% del Escenario 1)
- La tasa de reúso de las baterías es baja: el 20% de las baterías de iones de litio recolectadas que alcanzan el fin de su vida cada año
- Una mayor tasa de reciclaje en comparación con el Escenario 1 - 40% de las ULIB que alcanzan el final de su vida útil cada año

El uso de baterías reutilizadas reducirá la demanda de baterías nuevas, teniendo en cuenta que el uso en aplicaciones de segunda vida puede prolongar la vida útil de una batería hasta diez años (NITI Aayog and Green Growth Equity Fund Technical Cooperation Facility 2022). Sin embargo, en este caso, como las tasas de recolección y reutilización son relativamente bajas, su efecto no es muy significativo. La Figura 6-4 y la Figura 6-5 muestran la masa anual y acumulada de las baterías que alcanzan el final de su vida útil en este escenario, incluidos los límites inferior y superior.



Figura 6-4: Masa anual de ULIB que alcanza el EoL - Escenario 2



Fuente: Elaboración propia

En relación con los volúmenes potenciales de baterías disponibles para reciclaje, la Tabla 6-5 muestra el contenido acumulado de metal en la masa de pilas disponible para reciclaje en los años 2030, 2040 y 2050. Se ha estimado que en el Escenario 2 para 2050 habrá un contenido máximo de 68.000 toneladas de cobre en las baterías disponibles para reciclaje, seguido de 32.200 toneladas de aluminio.

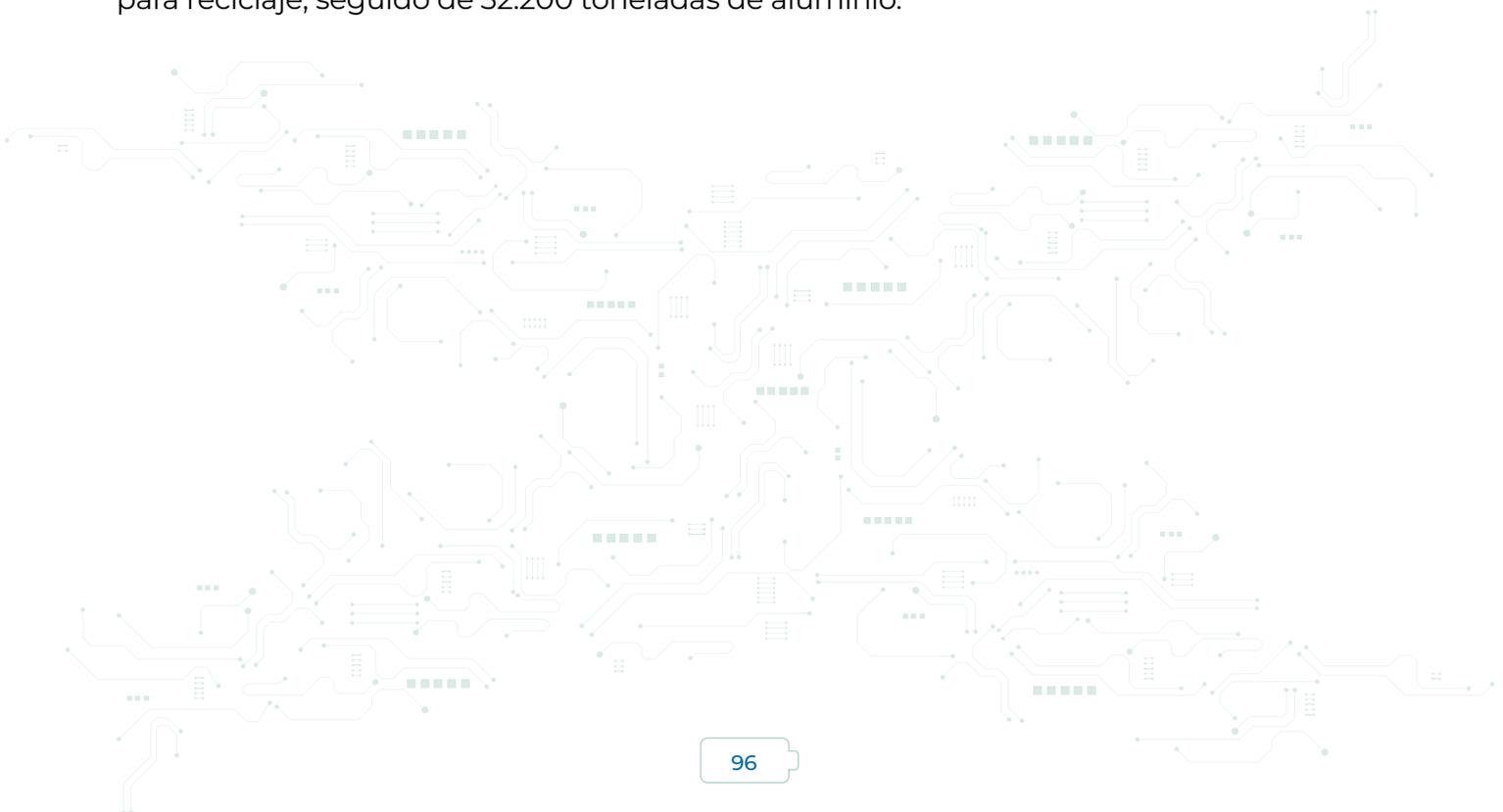


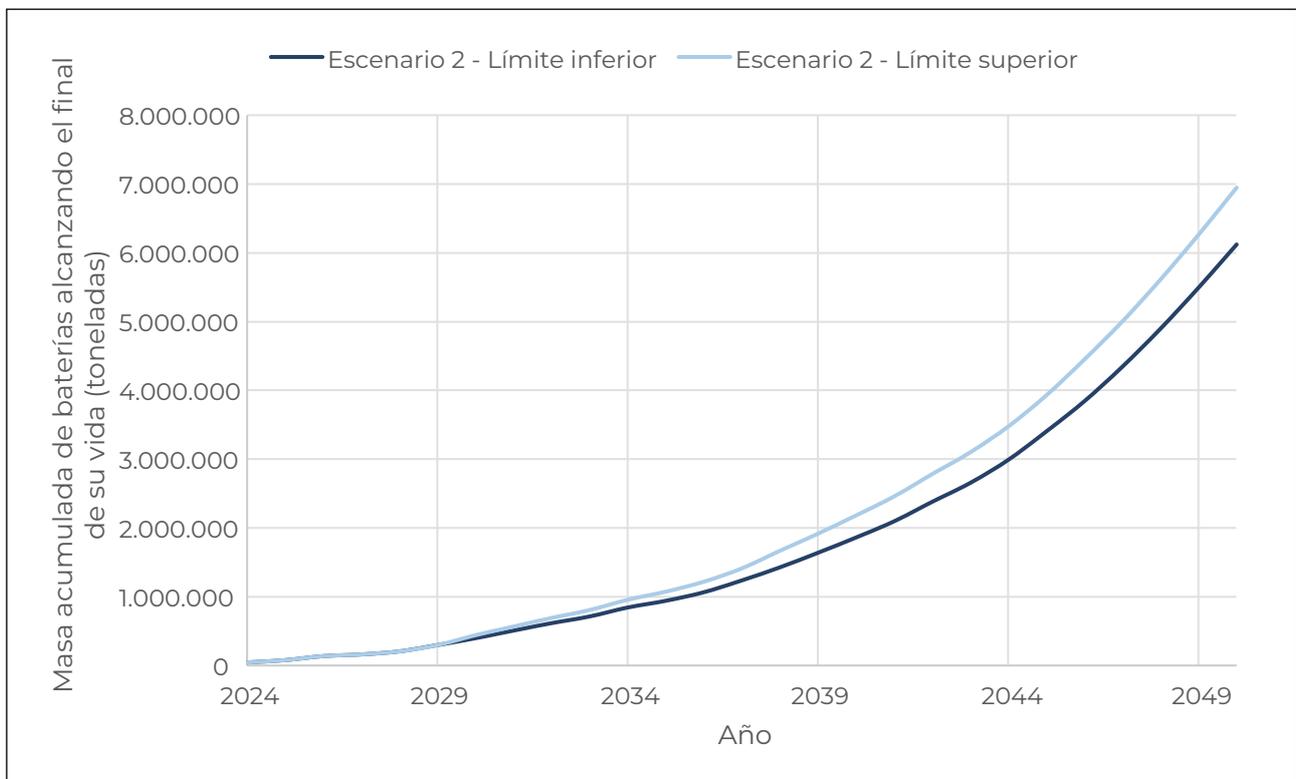


Tabla 6-5: Contenido acumulado de metal de las ULIB disponibles para reciclaje (toneladas) - Escenario 2

| Año | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|----------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Al (toneladas) | 1,900.00 | 2,100.00 | 8,600.00 | 10,200.00 | 24,700.00 | 32,200.00 |
| Cu (toneladas) | 4,000.00 | 4,500.00 | 18,100.00 | 21,600.00 | 52,200.00 | 68,000.00 |
| Co (toneladas) | 1,200.00 | 1,300.00 | 5,400.00 | 6,500.00 | 15,700.00 | 20,400.00 |
| Ni (toneladas) | 800.00 | 900.00 | 3,600.00 | 4,300.00 | 10,400.00 | 13,600.00 |
| Li (toneladas) | 700.00 | 800.00 | 3,300.00 | 4,000.00 | 9,600.00 | 12,500.00 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 6-5: Masa acumulada de ULIB que alcanza el EoL - Escenario 2



Fuente: Elaboración propia



La Tabla 6-6 y la Tabla 6-7 muestran la cantidad estimada de masa de batería acumulada que puede utilizarse para aplicaciones secundarias (reúso) cada año, así como la cantidad (en términos de masa) de baterías disponible para su reúso en los años 2030, 2040 y 2050, mientras que la Figura 6-6 muestra la masa de baterías disponibles para aplicaciones secundarias cada año. En el año 2050 habrá una cantidad (masa) acumulada de baterías disponibles para aplicaciones de segunda vida de entre 572.800 y 745.800 toneladas.

Tabla 6-6: Masa anual de ULIB disponible para reutilización (toneladas) - Escenario 2

| Año | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Límite | | | | | | |
| Total (toneladas) | 11,100 | 16,000 | 22,000 | 27,700 | 55,600 | 72,900 |

Fuente: Elaboración propia

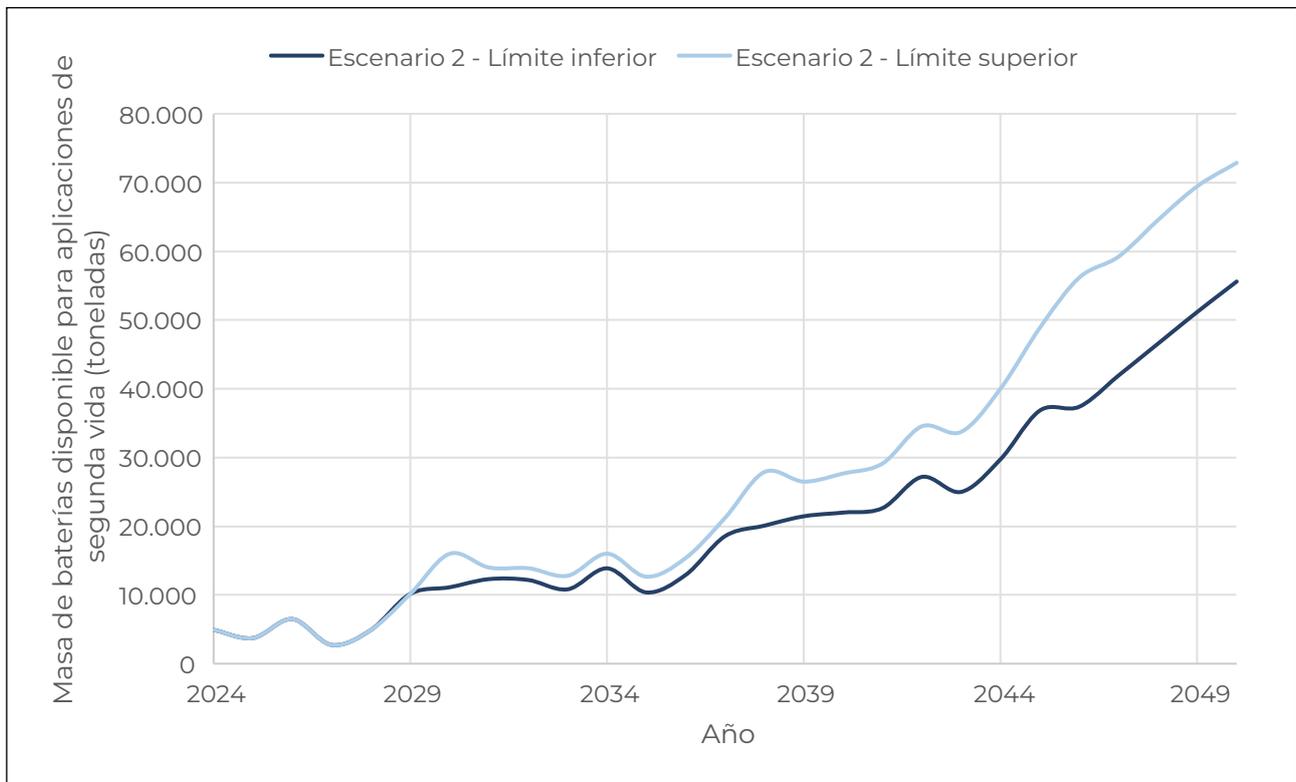
Tabla 6-7: Masa ULIB acumulada disponible para reutilización (toneladas) - Escenario 2

| Año | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Límite | | | | | | |
| Total (toneladas) | 44,100 | 49,000 | 198,700 | 237,000 | 572,800 | 745,800 |

Fuente: Elaboración propia



Figura 6-6: Masa anual de ULIB disponible para reuso - Escenario 2



Fuente: Elaboración propia

6.1.4 Escenario 3

Este escenario supone:

- Un índice de recolección del 90% de las ULIB que llegan a su EoL
- Una tasa de reuso del 44% de las ULIB recolectadas que llegan cada año a EoL
- Una tasa de reciclaje del 42% de las ULIB recolectadas que alcanzan el final de su vida útil cada año

Este es el más ambicioso de los tres escenarios, en el que se aplican las mejores prácticas de recolección, reuso y reciclaje de baterías de iones de litio en la región de ALC.

En términos de potencial de reciclaje, Tabla 6-8 muestra el contenido acumulado de metal en las baterías disponibles para reciclar en los años 2030, 2040 y 2050. Se ha estimado que en el Escenario 3 para 2050 habrá un contenido potencial máximo de 127.520 toneladas de cobre en las baterías disponibles para reciclar, seguido de 60.410 toneladas de aluminio.



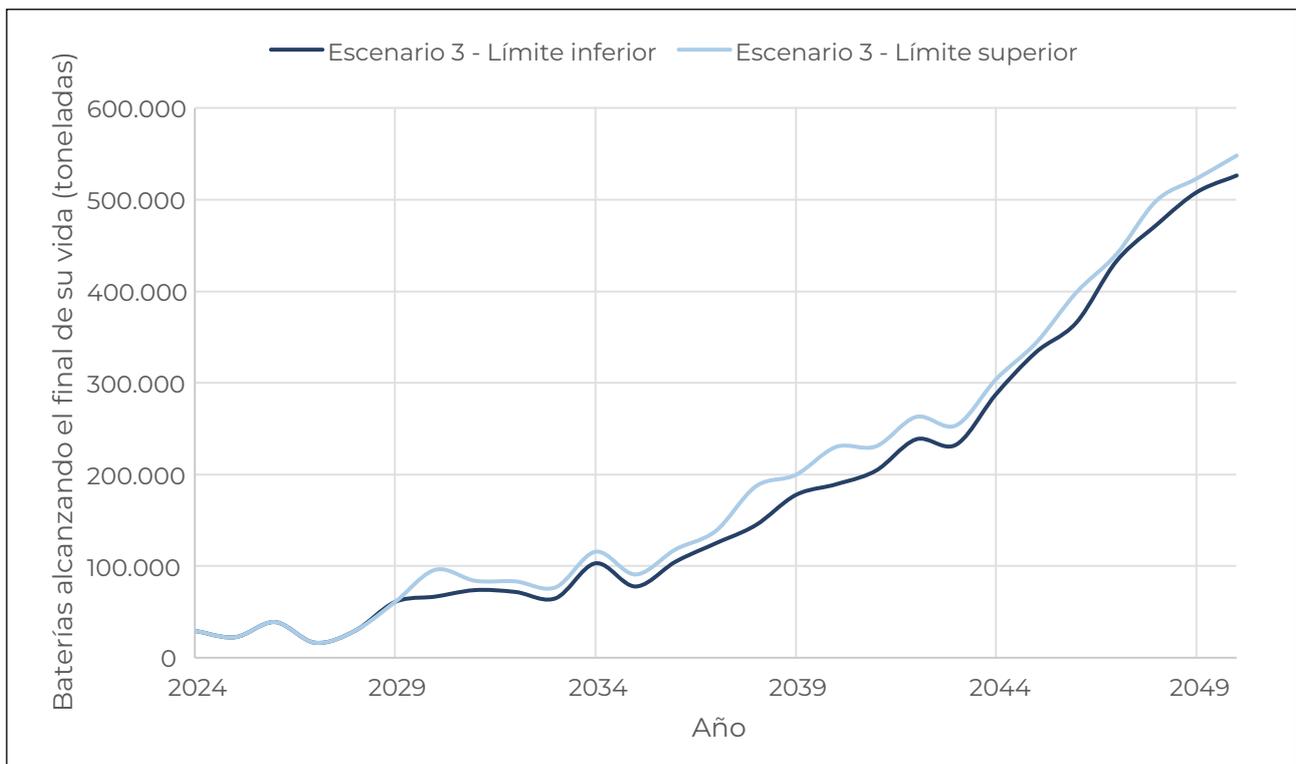
Tabla 6-8: Contenido acumulado de metal de las ULIB disponibles para reciclaje (toneladas) - Escenario 3

| Año | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Límite Superior | Límite Inferior | Límite Superior | Límite Inferior | Límite Superior | Límite Inferior |
| Al (toneladas) | 3,570 | 3,970 | 16,090 | 19,200 | 46,400 | 60,410 |
| Cu (toneladas) | 7,540 | 8,370 | 33,980 | 40,530 | 97,950 | 127,520 |
| Co (toneladas) | 2,260 | 2,510 | 10,190 | 12,160 | 29,390 | 38,260 |
| Ni (toneladas) | 1,510 | 1,670 | 6,800 | 8,110 | 19,590 | 25,500 |
| Li (toneladas) | 1,390 | 1,540 | 6,260 | 7,470 | 18,040 | 23,490 |

Fuente: Elaboración propia

La Figura 6-7 y la Figura 6-8 muestran la masa anual y acumulada de baterías que llegan al final de su vida útil en el periodo 2024 - 2050.

Figura 6-7-: Masa anual de ULIB que alcanza el EoL - Escenario 3



Fuente: Elaboración propia



La Tabla 6-9 y la Tabla 6-10 muestran los valores más relevantes para el Escenario 3 en términos de masa de batería anual y acumulada disponibles para aplicaciones de segunda vida en los años 2030 2040 y 2050.

Tabla 6-9: Masa anual de ULIB disponible para reuso (toneladas) - Escenario 3

| Año | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Límite | | | | | | |
| Total | 44,500 | 64,000 | 88,000 | 110,700 | 222,500 | 291,600 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-10: Masa ULIB acumulada disponible para reuso (toneladas) - Escenario 3

| Año | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|--------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Límite | | | | | | |
| Total | 176,400 | 195,900 | 794,800 | 948,100 | 2,291,300 | 2,983,000 |

Fuente: Elaboración propia

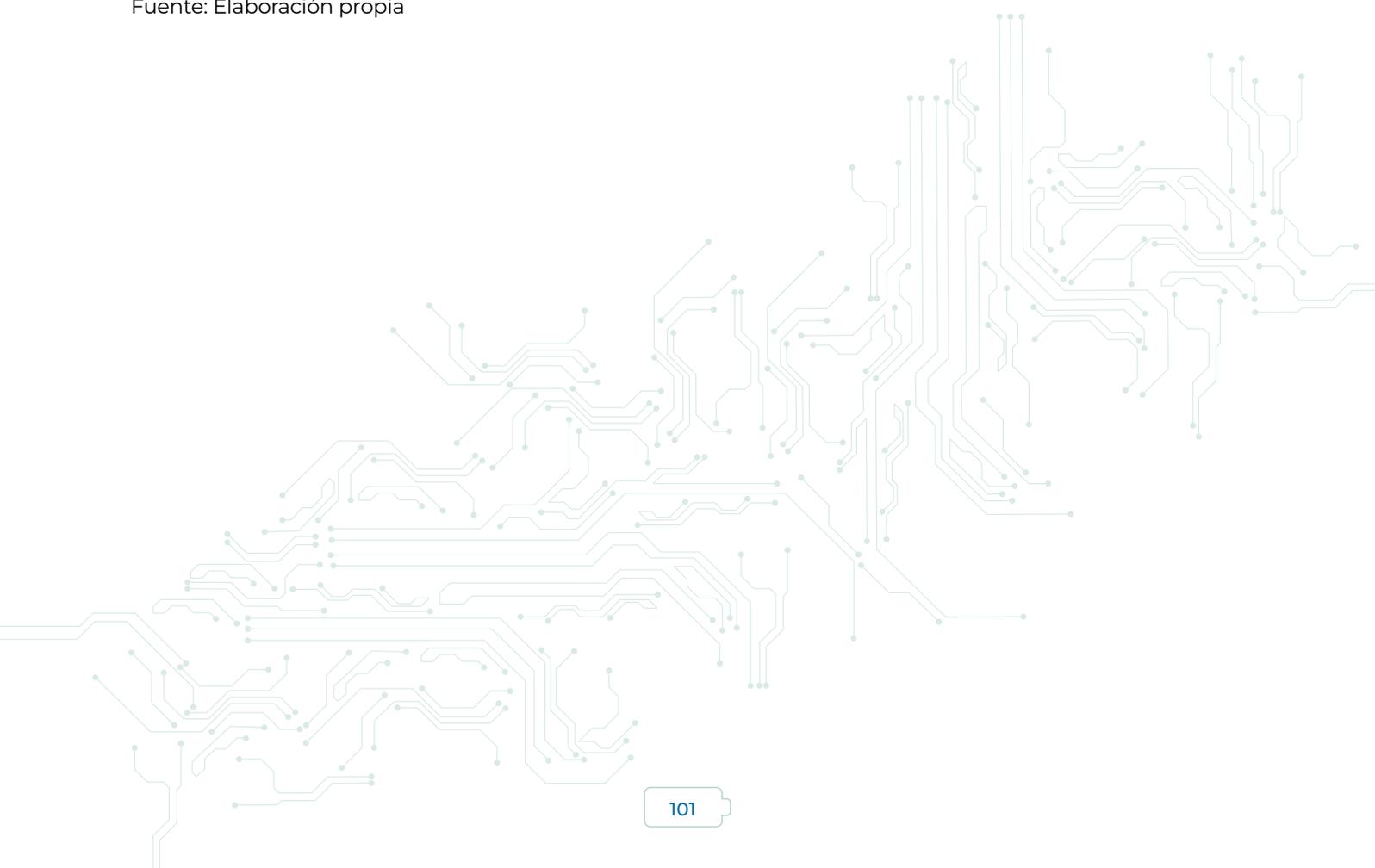
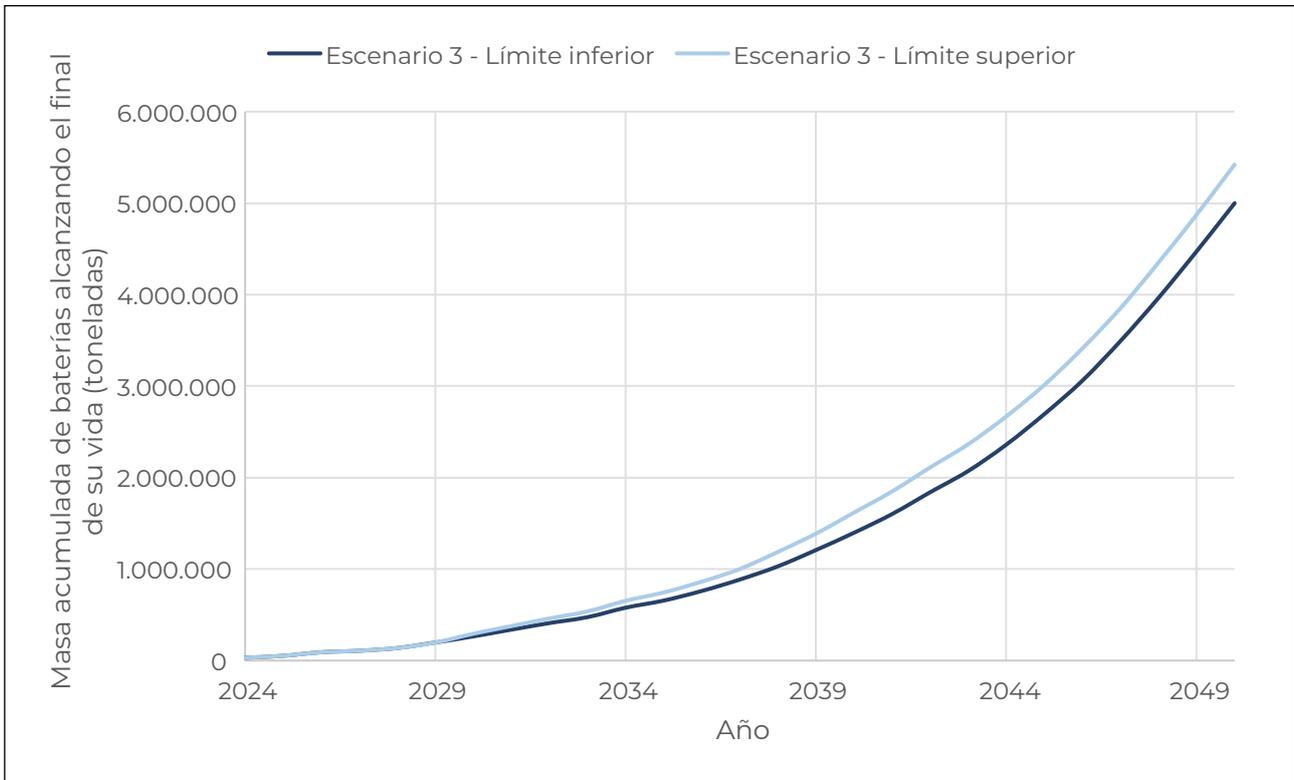




Figura 6-8: Masa acumulada que llega a la EoL - Escenario 3



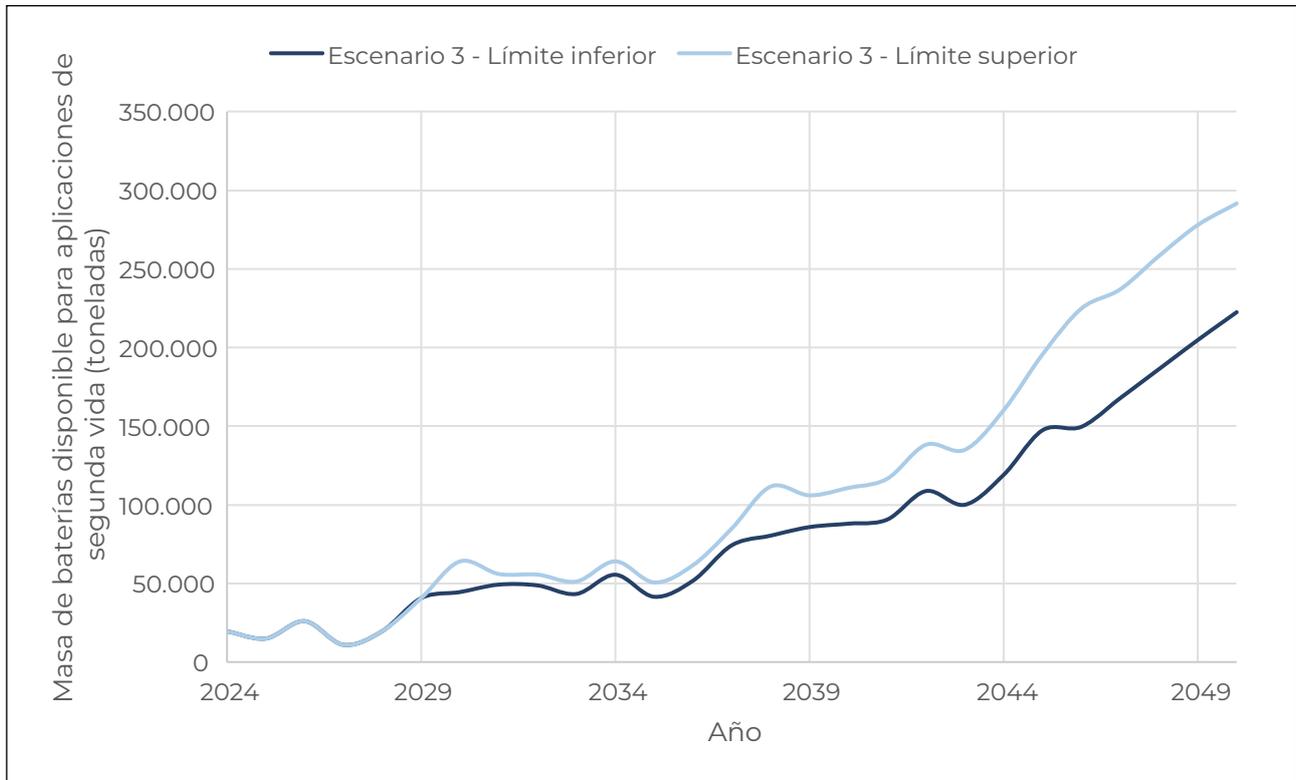
Fuente: Elaboración propia

La Figura 6-9 muestra la cantidad (masa) de batería disponibles para aplicaciones de segunda vida cada año.

En el Escenario base se ha estimado que en el periodo 2024-2050 entre 6,5 y 7,5 millones de toneladas de baterías procedentes de los sectores de la energía solar fotovoltaica, la energía eólica y los vehículos eléctricos alcanzarán el final de su vida útil. En el Escenario 3, mediante el fomento de buenas prácticas de recolección, reciclaje y reuso, entre 2,3 y 2,9 millones de toneladas de estas baterías tendrían el potencial de ser reutilizadas en aplicaciones de segunda vida, lo que a su vez reduciría la demanda de baterías nuevas, resultando en el Escenario 3 un volumen acumulado reducido de baterías que alcanzarían su EoL en el periodo 2024-2050, dentro de un rango entre 5,0 y 5,4 millones de toneladas.



Figura 6-9: Masa ULIB disponible para reuso cada año - Escenario 3



Fuente: Elaboración propia

6.1.5 Comparación de escenarios

Las tablas Tabla 6-11 a Tabla 6-14 presentadas a continuación ofrecen una comparación entre el Escenario base y los tres escenarios formulados, en términos de masa de ULIB que llega el EoL, masa de baterías potencialmente disponible para recolección, masa de baterías disponible para reciclaje y masa de baterías disponible para reuso. Los valores son acumulativos hasta los años 2030, 2040 y 2050 y consideran los límites superiores de las estimaciones.



Tabla 6-11: Comparación de la masa de la ULIB que alcanza el EoL en los distintos escenarios (toneladas)

| Año | 2030 | 2040 | 2050 |
|----------------------------|---------|-----------|-----------|
| Escenario base (toneladas) | 606,700 | 2,487,400 | 7,574,500 |
| Escenario 1 (toneladas) | 606,700 | 2,487,400 | 7,574,500 |
| Escenario 2 (toneladas) | 440,700 | 2,182,300 | 6,948,800 |
| Escenario 3 (toneladas) | 293,800 | 1,618,100 | 5,422,600 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-12: Comparación de la masa de ULIB potencialmente disponible para recolección en los distintos escenarios (toneladas)

| Año | 2030 | 2040 | 2050 |
|----------------------------|---------|-----------|-----------|
| Escenario base (toneladas) | - | - | - |
| Escenario 1 (toneladas) | 60,700 | 248,700 | 757,500 |
| Escenario 2 (toneladas) | 195,900 | 948,100 | 2,983,000 |
| Escenario 3 (toneladas) | 244,800 | 1,185,200 | 3,728,800 |

Fuente: Elaboración propia



Tabla 6-13: Comparación de la masa de ULIB disponible para el reciclaje en los distintos escenarios (toneladas)

| Año | 2030 | 2040 | 2050 |
|----------------------------|---------|---------|-----------|
| Escenario base (toneladas) | - | - | - |
| Escenario 1 (toneladas) | 4,900 | 23,700 | 74,600 |
| Escenario 2 (toneladas) | 97,900 | 474,100 | 1,491,500 |
| Escenario 3 (toneladas) | 183,600 | 888,900 | 2,796,600 |

Fuente: Elaboración propia

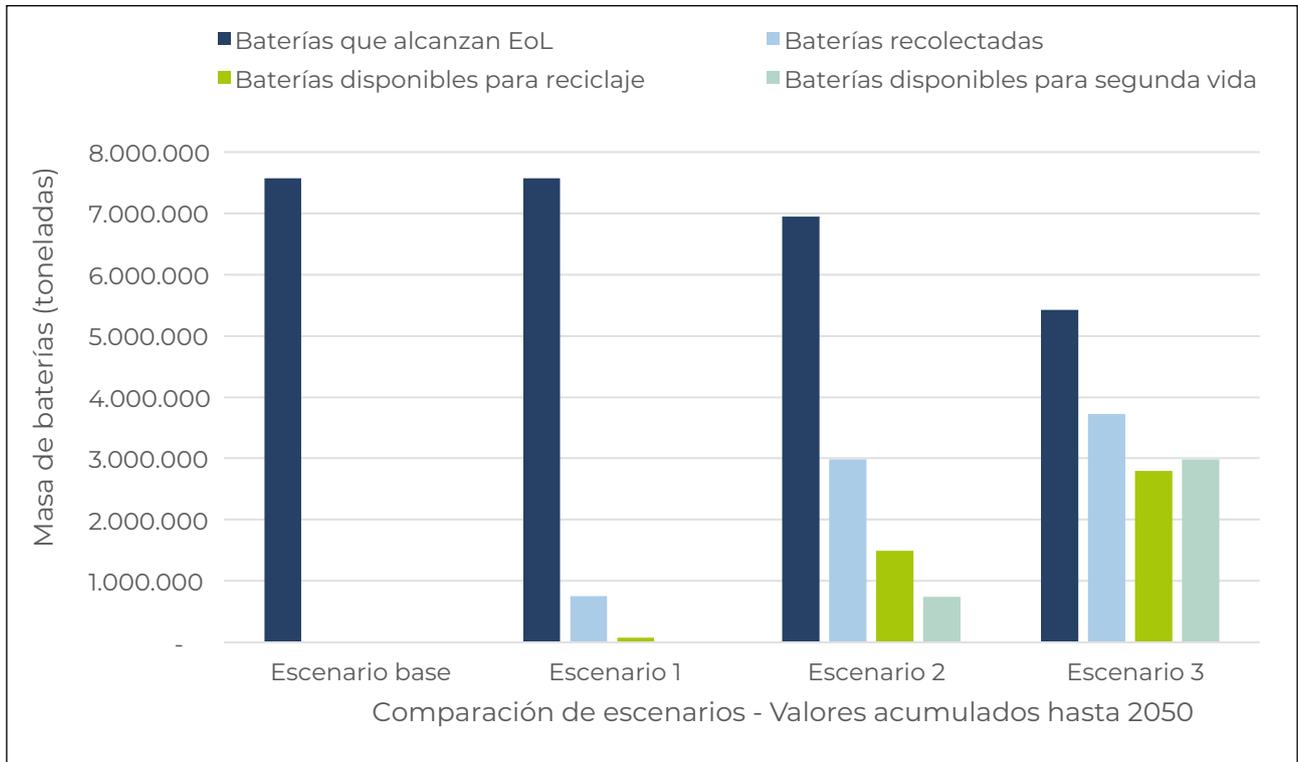
Tabla 6-14: Comparación de la masa de ULIB disponible para reúso en los distintos escenarios (toneladas)

| Año | 2030 | 2040 | 2050 |
|----------------------------|---------|---------|-----------|
| Escenario base (toneladas) | - | - | - |
| Escenario 1 (toneladas) | - | - | - |
| Escenario 2 (toneladas) | 49,000 | 237,000 | 745,800 |
| Escenario 3 (toneladas) | 195,900 | 948,100 | 2,983,000 |

Fuente: Elaboración propia



Figura 6-10: Comparación de escenarios



Fuente: Elaboración propia

La Figura 6-10 arriba presenta una comparación gráfica de los volúmenes acumulados de ULIB que llegan a la EoL, los volúmenes disponibles para recolección, reciclaje y reúso para el año 2050 en la región.

Los resultados muestran que la adopción de buenas prácticas para el reúso y el reciclaje de ULIB en la región de ALC (Escenario 3) puede conducir a una reducción de 2,1 millones de toneladas de ULIB que llegan al final de su vida útil para el año 2050. Además, las mismas prácticas permitirán potencialmente a la región reciclar hasta 2,3 millones de toneladas de ULIB durante el periodo 2024-2050.



6.2 Estimación de las necesidades de inversión en ULIB

Los valores obtenidos en la sección 6.1 constituyen la base para estimar las necesidades de inversión; en concreto, la masa anual de ULIB disponible para reciclaje y reuso en los años 2030, 2040 y 2050 representa la capacidad de reciclaje y reuso necesarias en la región para cada escenario. Estas capacidades de reciclaje y reuso se utilizaron, junto con datos bibliográficos, para estimar los costes necesarios para establecer la infraestructura requerida.

6.2.1 Requisitos de inversión para el reciclaje de ULIB

En el caso de los costes de inversión necesarios para el reciclaje de baterías, los valores se estimaron tomando como referencia valores estimados a través de encuestas de unidades de reciclaje de ULIB en la India realizadas por el Consejo Indio de Investigación sobre Relaciones Económicas Internacionales (ICRIER) y el Instituto Internacional de Desarrollo Sostenible (IISD) para instalaciones con una capacidad de entre 5.000 y 7.000 toneladas al año en las que se lleva a cabo el reciclaje hidrometalúrgico de ULIB. Se estableció que una unidad de reciclaje de estas características requiere un gasto de capital (CAPEX) de aproximadamente 10,15 millones de USD (Dai et al. 2023). El mismo estudio proporcionó una estimación de los gastos operativos anuales (OPEX) de aproximadamente 1.560 USD por tonelada de material de cátodo procesado. (Moerenhout et al. 2022; Neometals 2021) La Tabla 6-15 y la Tabla 6-16 proporcionan los CAPEX y OPEX necesarios para reciclar la masa de baterías estimada en la sección 6.1.

Tabla 6-15: CAPEX necesario para alcanzar la capacidad potencial de reciclaje de ULIB (USD)

| Año | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|-------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Escenario 1 (USD) | 1,882,000 | 2,706,800 | 3,937,600 | 4,683,200 | 11,178,900 | 12,331,000 |
| Escenario 2 (USD) | 37,639,400 | 54,135,600 | 74,416,300 | 93,663,800 | 188,156,800 | 246,619,100 |
| Escenario 3 (USD) | 70,573,800 | 101,504,200 | 139,530,600 | 175,619,600 | 352,793,900 | 462,410,800 |

Fuente: Elaboración propia



Tabla 6-16: OPEX anuales necesarios para alcanzar la capacidad potencial de reciclaje de ULIB (USD)

| Año | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Escenario 1 (USD) | 416,500 | 599,100 | 871,500 | 1,036,500 | 2,474,100 | 2,729,100 |
| Escenario 2 (USD) | 8,330,400 | 11,981,300 | 16,469,800 | 20,729,700 | 41,642,900 | 54,581,800 |
| Escenario 3 (USD) | 15,619,400 | 22,464,900 | 30,881,000 | 38,868,200 | 78,080,400 | 102,340,800 |

Fuente: Elaboración propia

En el escenario con las tasas de recolección y reciclaje más elevadas (Escenario 3), la inversión necesaria en infraestructura de reciclaje para 2050 oscila entre 353 y 462 millones de dólares, con unos costes operativos totales estimados para ese año que oscilan entre 78 y 102 millones de dólares. Estos valores se calcularon teniendo en cuenta los costes de 2022 y son sólo indicativos, ya que es muy probable que las necesidades de inversión cambien a largo plazo.

6.2.2 Requisitos de inversión para el reúso de ULIB

En cuanto a la estimación de los requerimientos de inversión para la reutilización de baterías, estos se calcularon teniendo en cuenta los valores obtenidos de consultas con la industria sobre los costes promedio de recolección, transporte y reúso de baterías por tonelada de batería (Element Energy Ltd 2019). Dichos valores se pueden observar en la Tabla 6-17 abajo.

Tabla 6-17: Valores de referencia para los requerimientos de inversión en reúso de ULIB (USD)

| Valores para el cálculo de las inversiones – Reúso de ULIB | | |
|--|-----|--------------|
| Gastos de recolección de ULIB | 333 | USD/tonelada |
| Gastos de transporte de ULIB | 333 | USD/tonelada |
| Costes de reúso de ULIB (para baterías LFP) | 20 | USD/kWh |

Fuente: Element Energy Ltd (2019)



Utilizando los valores de referencia anteriores y la masa anual de baterías disponible para su reuso en aplicaciones de segunda vida, se estimaron los costes de inversión necesarios para gestionar estos volúmenes de ULIB en cada escenario, como puede verse en la Tabla 6-18 a continuación

Tabla 6-18: Costes de inversión necesarios para gestionar las ULIB disponibles para reuso (USD)

| Año | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| | Límite | | Límite | | Límite | |
| Escenario | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Escenario 1 (USD) | - | - | - | - | - | - |
| Escenario 2 (USD) | 47,459,000 | 68,258,800 | 93,830,600 | 118,099,400 | 237,244,400 | 310,958,700 |
| Escenario 3 (USD) | 189,836,000 | 273,035,300 | 375,322,300 | 472,397,700 | 948,977,500 | 1,243,834,800 |

Fuente: Elaboración propia

Según estas estimaciones, y teniendo en cuenta la capacidad necesaria para el reuso de la masa de baterías que lleguen al final de su vida útil en 2050, el coste total de la inversión necesaria para la reutilización (repurposing) de las baterías oscilará entre 950 y 1.240 millones de dólares en el escenario más ambicioso (Escenario 3). Como en el caso del coste de reciclaje de las baterías, se trata de una estimación indicativa basada en datos de 2023 y es muy probable que varíe a largo plazo.



6.3 Evaluación de los posibles beneficios económicos de la adopción de una gestión segura y responsable con el medio ambiente de las ULIB al final de su vida

6.3.1 Beneficios económicos potenciales del reciclaje de ULIB

La estimación de los beneficios económicos del reciclaje de las ULIB se realizó asumiendo eficiencias de reciclaje para cada uno de los metales relevantes presentes en las ULIB: Al, Cu, Co, Ni y Li y el contenido medio de estos metales en las ULIB (Ver Anexo IV). Utilizando estos valores, fue posible estimar el contenido de metal recuperable en las baterías disponibles para reciclar en cada escenario. Estos valores se multiplicaron por los valores de mercado de cada metal, presentados en la Tabla 6-19 debajo, para estimar su valor total.

Hay que tener en cuenta que estas estimaciones son indicativas, basadas en datos obtenidos en 2023, y sólo reflejan el valor de los metales contenidos y potencialmente recuperables en las baterías. Hay que tener en cuenta que los precios de las materias primas pueden variar significativamente con el tiempo, al igual que el contenido de metales en las baterías, que se han supuesto constantes para estas estimaciones. Además, actualmente no es común que se recupere litio mediante procesos de reciclaje de baterías.

Tabla 6-19: Precio de mercado de los metales presentes en el ULIB (USD)

| Metal | Precio (USD/tonelada) (2021) |
|------------------|------------------------------|
| Al | 2,658 |
| Cu | 9,688 |
| Co | 61,550 |
| Ni | 20,171 |
| Li ³¹ | 30,930 |

Fuente: Lima et al. (2022)

Las estimaciones del valor acumulativo del contenido metálico potencialmente recuperable de la masa de ULIB disponible para el reciclaje en los años 2030, 2040 y 2050 pueden verse de la Tabla 6-20 a la Tabla 6-22 debajo. Cada tabla representa uno de los escenarios propuestos.

³¹ Bajo condiciones actuales no es común que se recupere litio mediante procesos de reciclaje.



Tabla 6-20: Valor acumulado de los metales en las ULIB disponibles para reciclaje (USD) - Escenario 1

| Metal | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|--------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Al | 253,100 | 281,100 | 1,140,700 | 1,360,900 | 3,288,800 | 4,281,600 |
| Cu | 1,947,700 | 2,163,100 | 8,777,600 | 10,471,500 | 25,306,000 | 32,945,300 |
| Co | 3,709,000 | 4,122,800 | 16,726,700 | 19,958,400 | 48,229,100 | 62,792,500 |
| Ni | 811,000 | 900,700 | 3,655,100 | 4,360,500 | 10,537,700 | 13,718,800 |
| Li | 1,145,500 | 1,272,100 | 5,162,200 | 6,158,400 | 14,882,800 | 19,375,500 |
| Total (USD) | 7,866,400 | 8,739,900 | 35,462,400 | 42,309,700 | 102,244,300 | 133,113,700 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-21: Valor acumulado de los metales en las ULIB disponibles para reciclaje (USD) - Escenario 2

| Metal | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Al | 5,062,500 | 5,622,300 | 22,814,800 | 27,217,600 | 65,775,300 | 85,631,300 |
| Cu | 38,954,000 | 43,261,900 | 175,552,700 | 209,430,500 | 506,119,600 | 658,905,100 |
| Co | 74,244,900 | 82,455,700 | 334,597,500 | 399,167,400 | 964,646,900 | 1,255,850,800 |
| Ni | 16,220,900 | 18,014,800 | 73,102,300 | 87,209,400 | 210,754,300 | 274,376,000 |
| Li | 22,909,300 | 25,442,800 | 103,244,700 | 123,168,600 | 297,655,200 | 387,510,200 |
| Total (USD) | 157,391,600 | 174,797,500 | 709,311,900 | 846,193,400 | 2,044,951,300 | 2,662,273,500 |

Fuente: Elaboración propia



Tabla 6-22: Valor acumulado de los metales en las ULIB disponibles para reciclaje (USD) - Escenario 3

| Metal | 2030 | | 2040 | | 2050 | |
|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Superior | Inferior | Superior | Inferior | Superior | Inferior |
| Al | 9,492,100 | 10,541,800 | 42,777,800 | 51,033,000 | 123,328,700 | 160,558,700 |
| Cu | 73,038,700 | 81,116,000 | 329,161,300 | 392,682,100 | 948,974,300 | 1,235,447,100 |
| Co | 139,209,300 | 154,604,400 | 627,370,300 | 748,438,800 | 1,808,712,900 | 2,354,720,300 |
| Ni | 30,414,200 | 33,777,700 | 137,066,700 | 163,517,600 | 395,164,400 | 514,455,100 |
| Li32 | 42,954,900 | 47,705,300 | 193,583,800 | 230,941,200 | 558,103,400 | 726,581,600 |
| Total (USD) | 295,109,200 | 327,745,400 | 1,329,959,900 | 1,586,612,600 | 3,834,283,800 | 4,991,762,700 |

Fuente: Elaboración propia

Estos valores muestran que en el escenario más ambicioso (Escenario 3). El valor económico total de los metales potencialmente recuperables en la ULIB disponibles para el reciclaje en el periodo 2024-2050 oscila entre 3.800 y 5.000 millones de dólares, basándose en el precio de mercado de estos metales en 2021.

6.3.2 Posibles beneficios económicos del reuso de las ULIB

La evaluación de los beneficios económicos del reuso de las baterías de iones de litio se calculó exclusivamente para las baterías de los vehículos eléctricos al final de su vida útil, ya que estas baterías son el tipo de batería más utilizado para aplicaciones de segunda vida. Los beneficios económicos se calcularon evaluando el valor de mercado de las baterías disponibles para aplicaciones de segunda vida y comparándolo con los costes de adquisición de una cantidad equivalente de baterías al precio de mercado de una batería nueva. Para cada uno de los escenarios en el que se consideró el reuso de las ULIB (Escenario 2 y Escenario 3) se estimaron cuatro parámetros:

- **Costes de reutilización de baterías:** obtenidos multiplicando la capacidad total de las baterías de EV disponibles para su reutilización (obtenida a partir de la masa de la baterías y la densidad energética de las baterías de EV) y el coste de reutilización de la batería de cada kWh de almacenamiento de ULIB. Estos costes incluyen las pruebas, el montaje, el transporte y las inversiones de capital en infraestructura de las baterías de litio usadas.
- **Valor de mercado de las baterías de segunda vida:** Obtenido multiplicando la capacidad total de las baterías de EV disponibles para aplicaciones de segunda vida y el precio de venta de una batería de segunda vida.



- **Valor de mercado de las baterías nuevas:** Obtenido multiplicando la capacidad total de las baterías de EV disponibles para aplicaciones de segunda vida y el precio de venta de una batería de EV nueva.
- **Valor adicional de la reutilización de baterías de EV:** Obtenido a partir de la diferencia entre el valor de mercado de las baterías nuevas y el valor de mercado de las baterías de segunda vida tras considerar los costes de reutilización.

Estos cuatro parámetros se estimaron para los volúmenes acumulados de baterías de EV disponibles para aplicaciones de segundo uso en los años 2040 y 2050. Esta evaluación se basó en los datos de costes del año 2019 y proporcionados por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL) Battery Second-Use Repurposing Cost Calculator (NREL 2023; Ambrose 2020). Los valores de costes asumidos pueden consultarse en la Tabla 6-23 abajo.

Según esta evaluación, para 2050, en el escenario más ambicioso (Escenario 3), las baterías de EV disponibles para aplicaciones de segunda vida en América Latina y el Caribe tendrán un valor de mercado de 16.800 millones USD, incurriendo en costes de reutilización de 4.100 millones USD.

En comparación, el valor de mercado de una cantidad equivalente de baterías de EV nuevas en este periodo sería de 32.100 millones USD, en estas circunstancias, la promoción del reúso de las baterías de EV tendrá un valor adicional de aproximadamente 11.300 millones USD. Debe tenerse en cuenta que estos valores son indicativos y se calcularon sobre la base de valores de referencia de 2019. Por lo tanto, es muy probable que estos valores cambien a largo plazo.

La Tabla 6-24 a continuación presenta los resultados más relevantes de la evaluación de los beneficios económicos de la reutilización de baterías de iones de litio provenientes de vehículos eléctricos en la región de ALC. Los valores de los parámetros clave se proporcionan en USD y son acumulativos hasta los años 2040 y 2050 para los escenarios 2 y 3. La Figura 6-11 ilustra los mismos parámetros hasta el año 2050. Los valores presentados se basan en el límite superior de los escenarios formulados.

Tabla 6-23: Valores de referencia para estimar los beneficios económicos de la reutilización de ULIB (USD)

| Valores para la evaluación de los beneficios económicos de la reutilización de ULIB | | |
|---|-----|---------|
| Precio de una batería nueva para EV | 157 | USD/kWh |
| Precio de venta de una batería de segunda vida | 82 | USD/kWh |
| Costes de reutilización (para baterías LFP) | 20 | USD/kWh |

Fuente: (NREL 2023; Ambrose 2020)



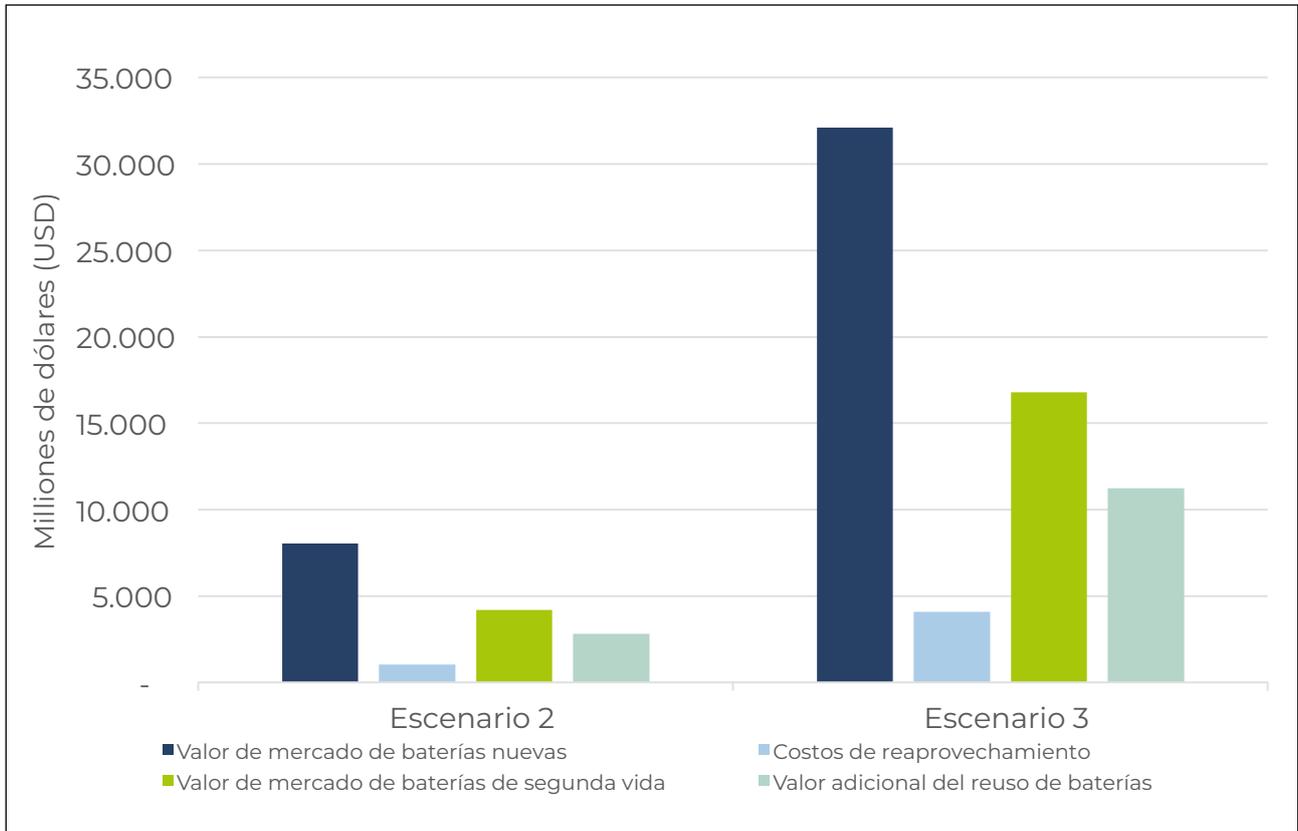
Tabla 6-24: Evaluación de los beneficios económicos acumulados producto del reuso de ULIB en la región de ALC (USD)

| Año | Parámetro | Valor | |
|------|--|----------------------|-----------------------|
| | | Escenario 2 | Escenario 3 |
| 2030 | Valor de mercado de las baterías nuevas (USD) | 14,144,200 | 56,576,800 |
| | Costes de reutilización de baterías (USD) | 1,801,800 | 7,207,200 |
| | Valor de mercado de las baterías de segunda vida (USD) | 7,387,400 | 29,549,700 |
| | Valor adicional de la reutilización de baterías de EV (USD) | 4,955,000 | 19,819,900 |
| 2040 | Valor de mercado de las baterías nuevas (USD) | 590,872,300 | 2,363,489,300 |
| | Costes de reutilización de baterías (USD) | 75,270,400 | 301,081,400 |
| | Valor de mercado de las baterías de segunda vida (USD) | 308,608,500 | 1,234,433,900 |
| | Valor adicional de la reutilización de baterías de EV (USD) | 206,993,500 | 827,974,000 |
| 2050 | Valor de mercado de las baterías nuevas (USD) | 8,029,517,100 | 32,118,068,300 |
| | Costes de reutilización de baterías (USD) | 1,022,868,400 | 4,091,473,700 |
| | Valor de mercado de las baterías de segunda vida (USD) | 4,193,760,500 | 16,775,042,000 |
| | Valor adicional de la reutilización de baterías de EV (USD) | 2,812,888,100 | 11,251,552,600 |

Fuente: Elaboración propia



Figura 6-11: Resumen de los beneficios económicos potenciales de la reutilización de la ULIB en 2050



Fuente: Elaboración propia

6.4 Posibles beneficios medioambientales y sociales de una buena gestión medioambiental y ambiental de las ULIB al final de su vida

La gestión adecuada de las baterías de iones de litio al final de su vida útil tiene diversos beneficios medioambientales y socioeconómicos que no pueden cuantificarse en términos económicos. Esto afecta sobre todo a los siguientes campos:



6.4.1 Mitigación de los costes sociales y medioambientales derivados de la contaminación y los riesgos de incendio

Las baterías de iones de litio contienen diversas sustancias preocupantes que, en caso de ser liberadas de las baterías de forma incontrolada, pueden causar daños a la salud humana y al medio ambiente (Sojka et al. 2020; Stahl et al. 2018). Además, diversas reacciones químicas dentro de las baterías pueden dar lugar a la formación y emisión de gases altamente corrosivos con un importante potencial de toxicidad ecológica y humana. Una buena gestión de la vida útil de las baterías de litio con una prevención eficaz de las emisiones a lo largo de toda la cadena de valor de la gestión de la vida útil puede reducir notablemente estos riesgos.

Además, las ULIB con carga residual pueden sufrir fugas térmicas³² provocando incendios o incluso explosiones (Dragonfly Energy 2022). Las fugas térmicas suelen estar causadas por daños en las celdas de la batería, por ejemplo, por sobrecarga, descarga profunda, sobrecalentamiento u otras tensiones físicas, y pueden producirse inmediatamente o con retrasos de varias horas, días o incluso semanas. Por consiguiente, las ULIB and final de su vida son un flujo de residuos de alto riesgo y pueden causar daños importantes (incendios) si no se gestionan adecuadamente.

Aunque no se dispone de datos globales sobre los riesgos relacionados, numerosas pruebas anecdóticas indican que las ULIB fuera de uso son una de las principales preocupaciones de los gestores de residuos de todo el mundo y causan repetidamente brotes de incendio y daños en las instalaciones de transporte y gestión de residuos. Los riesgos suelen ser mayores en situaciones en las que las baterías usadas no se recogen y gestionan por separado, sino que se mezclan con otros flujos de residuos, de modo que la manipulación específica de las pilas y el tratamiento de los residuos resultan difíciles o incluso imposibles.

En el Reino Unido, las ULIB provocan anualmente alrededor de 201 conatos de incendio, causando importantes daños a las instalaciones de manejo de residuos. Además, el 48% de los incendios anuales de residuos en el Reino Unido son causados por ULIB, lo que cuesta al país más de 200 millones de dólares cada año (Eunomia 2021). En 2018, La Consumer Product Safety de Estados Unidos informó de más de 25.000 incidentes de sobrecalentamiento o incendio en el período 2013-2018, con al menos 40 incendios conocidos dentro de sistemas de almacenamiento de energía ULIB a gran escala (TÜV SÜD).

Los efectos secundarios de estos incendios son la pérdida de otros materiales reciclables, importantes emisiones de gases de efecto invernadero y la formación y emisión de una amplia gama de contaminantes a la atmósfera, el suelo y el agua. Además, los incendios de ULIB y la liberación de gases tóxicos son una amenaza directa para la salud de los seres humanos y otros organismos, las zonas circundantes pueden verse afectadas por el transporte aéreo de los restos del incendio y los contaminantes (Mrozik et al. 2021).

Por lo tanto, la gestión eficaz del fin de la vida de las ULIB, incluida la separación de las baterías de otros tipos de residuos en origen, la introducción de buenas prácticas para el almacenamiento de las baterías junto con medidas de seguridad contra incendios y de control de emisiones son intervenciones necesarias para mitigar los riesgos sanitarios y medioambientales asociados a la gestión deficiente de las ULIB, especialmente a la luz del aumento de los volúmenes de LIB en la región de ALC.

³² Reacción en cadena dentro de una célula LIB que se produce cuando la temperatura en el interior de una batería alcanza el punto que hace que se produzcan reacciones químicas dentro de la batería y se produzca más calor.



6.4.2 Desarrollo de cadenas de valor asociadas y generación de empleo

Más allá de los beneficios económicos derivados de la promoción del reuso y el reciclaje de las ULIB, la adopción de las mejores prácticas mundiales para la gestión de las ULIB proporcionará beneficios adicionales a la región en términos de desarrollo de las cadenas de valor asociadas a las ULIB y de creación de empleo.

El despliegue de la infraestructura necesaria para la gestión de las baterías de litio en la región generará empleo directo e indirecto para los recolectores de baterías, las empresas recicladoras y las empresas de gestión de residuos y aplicaciones de reciclaje y reutilización de baterías de litio. A nivel mundial, se espera que el empleo en la cadena de valor de las LIB aumente a un total de 10 millones de puestos de trabajo para 2030, con más de la mitad de estos puestos de trabajo en los países en desarrollo (Global Battery Alliance; WEF 2019). Además, la cadena de valor asociada a la fase de uso y reciclaje (incluyendo vehículos eléctricos y aplicaciones estacionarias) de las LIB tiene un potencial de creación de empleo de 5 a 10 veces superior al número de puestos de trabajo asociados directa o indirectamente a la producción de baterías (desde la obtención de materiales hasta la elaboración de celdas y paquetes de baterías) (Fraunhofer; EIT Raw Materials 2021).

Las estimaciones de Tesla y del Instituto Europeo de Innovación y Tecnología (EIT) indican que, por cada GWh de producción de baterías, se crearán 140 puestos de trabajo en la fabricación de celdas y baterías, incluida la cadena de valor anterior (producción de materiales). (Fraunhofer; EIT Raw Materials 2021; Tesla 2020) lo que lleva a estimar entre 700 y 1.400 puestos de trabajo asociados a las fases de uso y reciclaje de las baterías de litio por cada GWh de capacidad de fabricación de baterías.

Más allá de 2030, el número de puestos de trabajo necesarios en aplicaciones asociadas a la fase de uso y reciclaje de las ULIB aumentará por encima de los 10 millones, mientras que la fabricación de LIB (desde los materiales hasta la fabricación de células y paquetes) alcanzará entre 2 y 3 millones de puestos de trabajo.

La introducción del reciclaje y la reutilización de ULIB aumentará la demanda de mano de obra cualificada en las áreas de conocimientos académicos y técnicos, incluidos economistas, expertos medioambientales, personal técnico e ingenieros en áreas que incluyen amplias aplicaciones de electromovilidad, aplicaciones de almacenamiento estacionario, sistemas de gestión de baterías (BMS), control de baterías e integración de sistemas, pruebas de baterías, aplicación de baterías, manipulación de baterías y seguridad. (Fraunhofer; EIT Raw Materials 2021).

El número de empleos en áreas no académicas y no técnicas también está creciendo, estos incluyen la venta y comercialización de aplicaciones y productos finales asociados a las LIB. En el año 2021, la tasa de personal empleado se dividía en un 20% de personal académico y un 80% de personal técnico y no técnico. Como resultado, es probable que haya una demanda a largo plazo de profesionales en el campo de las baterías, en Europa se necesitarán entre 100.000 y 200.000 expertos con formación académica y experiencia a largo plazo en el sector de las baterías (Fraunhofer; EIT Raw Materials 2021).



Comparación de los beneficios del reciclaje y la reutilización de ULIB con los generados por la extracción de yacimientos de litio

Este panorama puede contrastarse con la creación de empleos asociados a la industria minera en la región de ALC, particularmente en la región del triángulo del litio. La mano de obra necesaria para la minería requiere tanto personal no cualificado como altamente cualificado. La demanda de personal cualificado ha aumentado debido a un incremento en el número de start-ups surgidas del sector minero en aplicaciones como el uso de la biotecnología para la extracción de minerales y la automatización de procesos (Geref et al. 2016).

En el caso de Chile, los servicios de ingeniería para la industria minera se están transformando en consultoría de ingeniería y prestación de servicios para el sector minero, centrados en la mejora de la productividad y la reducción de costes. Ejemplos de estos servicios son el mantenimiento de equipos, reparaciones y revisión de maquinaria minera. Además, la demanda de mano de obra ha aumentado a medida que las empresas mineras tienen sus propios centros de reparación para el mantenimiento de equipos y los han extendido a los países vecinos (Geref et al. 2016).

La demanda de mano de obra calificada en la región se ha visto beneficiada por la Investigación y Desarrollo (I+D) en nuevos procesos, junto con la tendencia de las empresas mineras a cambiar su enfoque hacia su negocio principal, mientras se apoyan en alianzas estratégicas con fabricantes de equipos, proveedores y centros de investigación para el desarrollo de soluciones innovadoras y el desarrollo de nuevas tecnologías (Sánchez and Hartlieb 2020).

Además, estudios del Banco Mundial han confirmado el impacto socioeconómico positivo de la minería a nivel regional. En 2018, la tasa de crecimiento económico y la renta per cápita en la región minera de Antofagasta duplicaron la media nacional y contribuyeron a la creación de puestos de trabajo, contribuyendo al aumento de los ingresos y a la reducción de la pobreza (Consejo Internacional de Minería y Metales 2018).

La promoción del reciclaje y el reúso de ULIB también tiene el potencial de reducir la presión en los mercados de materias primas mineras, en particular el litio, apoyando así el alivio de los problemas ligados a los conflictos sociales asociados a las actividades mineras.



7. Recomendaciones y capacidades necesarias



Los retos asociados a la gestión del final de la vida útil de las baterías de iones de litio (LIB) en la región de ALC se han dividido en cuatro categorías principales: i) políticas y normativas; ii) sensibilización; iii) infraestructura de reciclaje y capacidades de reutilización locales; y iv) desarrollo de capacidades. Basándose en estos retos y en las mejores prácticas identificadas en la revisión global, se han elaborado varias recomendaciones para contribuir a la gestión sostenible y responsable a largo plazo de las ULIB.

Las recomendaciones propuestas se han clasificado en dos grupos: intervenciones primarias, que deben aplicarse a corto plazo y pretenden sentar las bases para la aplicación de las intervenciones secundarias, que se proponen a medio y largo plazo y pretenden consolidar las mejores prácticas en la región y requieren un marco regulatorio más sólido y un mercado más maduro.

A modo de resumen, las recomendaciones pertinentes incluyen la incorporación de disposiciones específicas para la gestión de las baterías de litio como parte de las políticas nacionales y las normativas existentes en la región; la introducción de sistemas obligatorios de Responsabilidad Extendida del Productor (REP); la sensibilización general sobre la importancia de una gestión ambientalmente racional del final de la vida útil de las baterías de litio; el establecimiento de la cooperación entre los principales actores a nivel nacional y regional y la creación de capacidades locales a lo largo de la cadena de valor de las baterías de iones de litio. Las recomendaciones específicas dentro de las cuatro categorías se desarrollan con más detalle en las siguientes subsecciones 7.1 a 7.4 a continuación.

7.1 Política y normativa

Problema:

En la región de ALC, muchos países cuentan con leyes y reglamentos para el manejo y gestión de residuos peligrosos y desechos electrónicos, que son aplicables indirectamente a las baterías³³. Sin embargo, sólo unos pocos países como Colombia, Ecuador y Chile han desarrollado disposiciones que abordan la gestión de las baterías de litio, e incluso en estos países, los requisitos tales como los sistemas de recolección, son principalmente voluntarios. Aún no se han introducido disposiciones para la recolección y gestión de las baterías de los vehículos eléctricos.

³³ En estos casos, la normativa se aplica a varios grupos de productos, y a menudo con pocos/limitados requisitos específicos para la LIB



Además, las normativas vigentes carecen de mecanismos de ejecución que garanticen su cumplimiento. Sin un conjunto de requisitos claros, coherentes y obligatorios, la mayoría de los actores carecen de motivación para comprometerse e invertir en operaciones sólidas de gestión del fin de la vida útil. Dado que la reutilización y el reciclaje de las ULIB no constituyen en sí mismos un argumento comercial, las empresas no desarrollan una estrategia eficaz para la recolección, el transporte, el reciclaje y el reuso de las ULIB. En este contexto, es importante introducir normas obligatorias que obliguen a los productores e importadores de baterías y equipos e instalaciones que funcionan con baterías (entidades que introducen baterías en un mercado nacional por primera vez) a organizar y financiar la recolección y gestión ambientalmente responsable de dichas baterías, en concordancia con el concepto de Responsabilidad Extendida del Productor.

Retos específicos:

Hasta hace poco no existía en la región una normativa específica que abordara la correcta gestión del fin de vida de las baterías de litio. Esto ha dado lugar a una gestión deficiente del fin de su vida útil, especialmente en países como México, que carecen de una normativa sobre la gestión de las baterías al final de su vida útil en su conjunto. Además, aún no se han implantado instrumentos importantes como los sistemas nacionales o regionales de REP obligatorios, mientras que en otros países, como Costa Rica, Colombia y Chile, ya se han introducido parcialmente sistemas voluntarios de REP como parte de sus leyes de gestión de residuos.

Las aplicaciones de baterías de segunda vida suponen retos adicionales, ya que estos enfoques son nuevos en el mercado regional y su uso en aplicaciones como el almacenamiento de energía carece aún de regulación y normalización, lo que dificulta el desarrollo de modelos de negocio que impliquen su uso. Además, la obtención de los permisos necesarios es un obstáculo importante para una solución regional de gestión de baterías en la región, ya que muchos operadores locales de gestión de residuos carecen de la capacidad legal para solicitarlos.



Recomendaciones - Intervenciones primarias:

- Apoyar a los actores del sector público en la integración de los requisitos para las baterías de litio en el marco normativo nacional existente para la gestión de residuos, incluido el desarrollo de estrategias nacionales para la gestión segura y responsable con el medio ambiente a largo plazo de las baterías de litio.
- Apoyar a los actores principales (productores de baterías, organismos gubernamentales, minoristas, empresas de gestión de residuos, empresas recicladoras y organizaciones ecologistas) en el establecimiento y mejora de sistemas obligatorios de REP para baterías, con responsabilidades claramente definidas y objetivos cuantificables de recolección, reutilización/reuso y reciclaje. Este proceso requiere la consulta de los actores y el establecimiento de incentivos, sanciones y disposiciones para la aplicación práctica de los sistemas de recolección.



Recomendaciones - Intervenciones secundarias:

- Apoyar la aplicación y el cumplimiento del marco regulatorio para baterías, incluidas las disposiciones para la supervisión de los sistemas de REP, la elaboración de normas técnicas para el reúso y el reciclaje de ULIB y la consecución de los objetivos nacionales.
- Creación de disposiciones específicas para regular el uso de baterías de segunda vida que garanticen que estas se sometan a pruebas para comprobar que cumplen las normas de calidad antes de ser revendidas. Esta regulación garantizará a los usuarios finales que las baterías de segunda vida cumplen con requisitos mínimos de calidad.
- Apoyar a las partes interesadas públicas en la introducción de tasas de recuperación obligatorias y en la elaboración de normativas que garanticen que las nuevas baterías comercializadas en la región de LAC contengan una determinada proporción de materias primas recicladas.

7.2 Sensibilización

Problema:

El creciente número de baterías de litio que llegan al final de su vida útil en América Latina exige el desarrollo urgente de enfoques nacionales y regionales para garantizar que estas baterías se recojan y gestionen de forma segura y respetuosa con el medio ambiente. Abordar este problema y aplicar soluciones adecuadas requiere la actuación de actores a lo largo de toda la cadena de valor de las baterías de litio, incluidos los productores (importadores) de baterías, los reguladores y los usuarios finales, que deben comprender la naturaleza de la situación y la necesidad de tomar medidas.

Colombia y Costa Rica son ejemplos de buenas prácticas para la concientización sobre la necesidad de una gestión ambientalmente responsable de las baterías de litio, con la creación de un grupo de trabajo nacional sobre soluciones de economía circular para las baterías en Colombia y el establecimiento de un comité ejecutivo para la gestión integral de los residuos electrónicos integrado por las autoridades locales en Costa Rica. Estas iniciativas pueden reproducirse en otros países para facilitar la cooperación entre las partes interesadas y desarrollar un marco normativo sólido.

Además, la cooperación regional es un factor relevante en el desarrollo de soluciones para la gestión de las baterías, ya que tiene el potencial de facilitar el intercambio de lecciones aprendidas y el desarrollo de enfoques regionales para la gestión del final de la vida útil de las ULIB. Ya existen iniciativas regionales a las que se puede brindar apoyo, como E-waste LATAM, que reúne a gestores de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y pretende mejorar las prácticas de gestión de residuos a través de un grupo de trabajo colaborativo dedicado a las ULIB.



Retos específicos:

La introducción de soluciones sostenibles para la gestión de las baterías de litio requiere una sensibilización general de los actores principales sobre la situación actual de la gestión de las baterías de litio en la región, así como la necesidad de una estrategia a largo plazo y de instrumentos políticos bien definidos para abordar esta cuestión.

En el caso concreto de los usuarios finales de baterías, es necesario concientizarlos sobre las opciones disponibles para deshacerse de sus baterías usadas. Esta situación debe abordarse a través de campañas sociales llevadas a cabo por partes interesadas responsables, como las Organizaciones de Productores Responsables (PRO) que gestionan las baterías usadas³⁴. Estas campañas deben sensibilizar a los usuarios finales sobre la necesidad de deshacerse adecuadamente de las ULIB, además de los riesgos y consecuencias de una gestión inadecuada de las baterías y las opciones disponibles para su recolección.



Recomendaciones - Intervenciones primarias:

- Realización de conferencias y talleres regionales dedicados a la gestión del final de la vida útil de las ULIB. Estos eventos facilitarán la introducción de mejores prácticas y nuevas tecnologías, junto con el debate de los retos y la creación de plataformas regionales de colaboración e intercambio de conocimientos.
- Diseño de una estrategia de comunicación para introducir la importancia de la gestión adecuada de las baterías de litio y los sistemas de recolección posconsumo disponibles y otras opciones para su recolección a través de campañas sociales. Esta estrategia puede aplicarse en primer lugar en aquellos países en los que el marco normativo ya se ocupa de las baterías y en los que ya existen sistemas de REP (por ejemplo, Colombia) utilizando canales como redes sociales, sitios web y otros materiales de comunicación. En el caso de los países en los que aún no existe un marco normativo, los gobiernos nacionales deberán diseñar y financiar estrategias de comunicación.



Recomendaciones - Intervenciones secundarias:

- Fomentar la creación de grupos nacionales de soluciones de economía circular para baterías y grupos de trabajo sobre políticas locales. Estos grupos son especialmente relevantes en aquellos países en los que la cantidad de ULIB aumentará significativamente en los próximos años y el marco normativo para la gestión es insuficiente. Estos grupos nacionales deben promover discusiones y facilitar la cooperación entre el sector público y privado, incluyendo ministerios y autoridades nacionales, en las áreas de medio ambiente, tecnología, modelos de negocio, salud y trabajo, entre otras, lo que promoverá el intercambio de conocimientos, sentará las bases para la cooperación de los actores relevantes a lo largo de toda la cadena de valor de las baterías de litio y apoyará el desarrollo de normativas específicas para la gestión de las ULIB.

³⁴ Los PRO sólo serán responsables de la sensibilización si la normativa aplicable en materia de REP incluye los requisitos obligatorios correspondientes.



7.3 Infraestructura de reciclaje y capacidades de reutilización locales

Problema:

Los países de la región cuentan con una infraestructura limitada para el reúso y el reciclaje de ULIB. Hay pocos actores activos en el mercado local del reciclaje y la reutilización, algunos de los cuales son nuevos en el mercado, mientras otros se encuentran todavía en fase piloto. Como consecuencia, las baterías usadas deben transportarse largas distancias, lo que resulta en costes de transporte adicionales que aumentan los costes totales de reciclaje y reutilización, o exportarse para su procesamiento en otros países.

Además, faltan sistemas de recolección que funcionen, lo que representa un reto para alcanzar los índices de recolección de los países que ya los han establecido. Colombia es un ejemplo de este reto, y aunque la tasa de recolección de baterías portátiles en el país aumentó un 20% en el periodo de 2012 a 2021, no se alcanzaron las tasas mínimas de recolección obligatorias.

La recolección de baterías sigue siendo un reto para la región debido a varias razones, como la falta de aplicación de tasas de recolección obligatorias y, en otros casos, la ausencia de tasas de recolección (en el caso de las baterías a gran escala, como las baterías para la movilidad eléctrica, los objetivos de recolección se están apenas introduciendo); Además, hay un número limitado de actores activos en el reciclaje y reutilización de ULIB, que se enfrentan al reto de obtener suficientes volúmenes de ULIB, lo que aumenta las distancias que las baterías necesitan ser transportadas, junto con los costes de transporte.

Retos específicos:

Aunque en cada uno de los países estudiados (México, Costa Rica, Colombia y Chile) al menos una empresa ya recicla o reutiliza ULIB, a largo plazo se necesitará capacidad adicional para satisfacer las necesidades de la región, sobre todo teniendo en cuenta los objetivos de la región para la introducción de vehículos eléctricos y la capacidad adicional de energía solar y eólica.

Algunas de los actores entrevistadas destacaron como un reto la falta de inversión para ampliar las plantas piloto o de pequeña escala existentes.



Recomendaciones - Intervenciones primarias

- Apoyar proyectos piloto nuevos y existentes de reuso y reciclaje de baterías en la región. El alcance del apoyo puede incluir la prestación de asistencia técnica para la transferencia de conocimientos y el desarrollo de capacidades, estas iniciativas pueden llevarse a cabo en colaboración con socios de cooperación nacionales e internacionales, universidades y actores del sector privado.
- Apoyar la movilización de inversiones y financiación hacia las instalaciones existentes de pequeña y mediana escala que hayan demostrado ser capaces de llevar a cabo operaciones de reciclaje o reuso respetuosas con el medio ambiente, con el fin de ampliar su funcionamiento. Al mismo tiempo, debe proporcionarse asistencia técnica para garantizar la transferencia de tecnología y conocimientos sobre las mejores prácticas operativas para la gestión del final de la vida útil de las baterías.



Recomendaciones - Intervenciones secundarias

- Apoyar las redes regionales existentes para el intercambio de conocimientos, como e-waste LATAM, incluida la prestación de asistencia técnica para aprovechar los recursos, ampliar su alcance y seguir promoviendo la creación de asociaciones público-privadas y la cooperación con las comunidades locales y las organizaciones no gubernamentales.
- Establecer normas obligatorias que describan las operaciones sólidas de reciclaje y reutilización. La elaboración y aplicación de normas garantizará que sólo se aprueben y apoyen las instalaciones que funcionen correctamente. Lo ideal sería que estas normas se diseñaran y aplicaran en una fase temprana, cuando la infraestructura aún está en fase de desarrollo.

7.4 Desarrollo de capacidades

Problema:

Las baterías destinadas a la generación de energía renovable a gran escala y a los vehículos eléctricos son relativamente nuevas en el mercado regional y aún no han llegado al final de su vida útil, además el reciclaje y la reuso de las ULIB todavía se encuentran en sus primeras fases de implementación. Por lo tanto, la capacitación de actores relevantes desempeña un papel importante en la elaboración de normativas adecuadas y el desarrollo de procedimientos para la recolección, el transporte y la gestión del fin de la vida útil de las baterías y el establecimiento de dichos sistemas.



Retos específicos:

Muchos agentes de la cadena de valor inversa de las baterías de iones de litio usadas carecen de conocimientos suficientes sobre las baterías de litio y las medidas necesarias para garantizar un almacenamiento y transporte seguros. Esto ha dado lugar a una serie de ideas erróneas y es uno de los retos que impiden que las baterías sean recolectadas y transportadas a instalaciones de reciclaje o reúso.

Además, el desarrollo, la aplicación y la supervisión de un marco normativo para las baterías de iones de litio usadas requiere un importante desarrollo de capacidades entre actores del sector público, como las agencias medioambientales, los ministerios y los organismos encargados de hacer cumplir la normativa, sobre las mejores prácticas para la gestión de la vida útil de las baterías de iones de litio usadas y sobre cómo supervisar su cumplimiento. El desarrollo de capacidades entre los reguladores es fundamental para el diseño de una regulación adecuada y de las capacidades para hacerla cumplir.



Recomendaciones - Intervenciones primarias

- Organización de conferencias y sesiones regionales con las principales actores de los sectores público, privado y de la sociedad civil a lo largo de la cadena de valor de las baterías de iones de litio usadas para presentar los fundamentos de las baterías de litio y buenas prácticas para una gestión segura y al final de su vida útil.
- Ofrecer formación específica a los actores involucrados en la recolección y el transporte de baterías de litio sobre directrices y procedimientos para un transporte seguro.
- Apoyo a las iniciativas de investigación y desarrollo y a los proyectos piloto que permitan identificar mecanismos, metodologías y enfoques innovadores para la gestión ambientalmente responsable y segura de las LIB.



Recomendaciones - Intervenciones secundarias

- Formación de las autoridades nacionales y de las agencias medioambientales sobre las mejores prácticas para la gestión del medio ambiente, la biodiversidad y el cambio climático y sobre cómo evaluar y aplicar estas mejores prácticas en los marcos normativos nacionales, incluidos los criterios de supervisión y notificación.
- Capacitación de los recolectores, transportadores y actores del sector público sobre la diligencia debida y los requisitos del Convenio de Basilea para el movimiento transfronterizo de residuos, con el objetivo de agilizar y apoyar el proceso y facilitar el traslado de las baterías usadas a las instalaciones de la región.

Lista de Referencias

- Ailen Pedrotti (8 Nov 2021): Dendou Bikes abrirá la primera planta de reciclado de baterías de vehículos eléctricos en México. In: *Portal Movilidad*, 8 Nov 2021. Online available at <https://portalmovilidad.com/dendou-bikes-abrira-la-primera-planta-de-reciclado-de-baterias-de-vehiculos-electricos-en-mexico/>, last accessed on 5 Dec 2022.
- Allred, S. (2021): Electric Vehicle Battery Reuse and Recycling. Online available at <https://www.advancedenergy.org/2021/11/16/electric-vehicle-battery-reuse-and-recycling/>, last updated on 16 Nov 2021, last accessed on 6 Dec 2022.
- Altamirano, J. (18 Aug 2022): Lista hacia fin de año: Así será la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica de México. In: *Portal Movilidad*, 18 Aug 2022. Online available at <https://portalmovilidad.com/lista-hacia-fin-de-ano-asi-sera-la-estrategia-nacional-de-movilidad-electrica-de-mexico/>, last accessed on 10 Feb 2023.
- Ambrose, H. (2020): The Second-Life of Used EV Batteries, Union of Concerned Scientists. Online available at <https://blog.ucsusa.org/hanjiro-ambrose/the-second-life-of-used-ev-batteries/>, last updated on 13 Apr 2023:40:44.
- Angliviél, S.; Betz, J.; Manhart, A.; Sahni, A.; Soomro, S. (2021): Closing the Loop on Energy Access in Africa. World Economic Forum and Global Battery Alliance (ed.). Online available at https://www3.weforum.org/docs/WEF_Closing_Loop_Energy_Access_2021.pdf, last accessed on 6 Dec 2022.
- ANIR - Asociación Nacional de la Industria del Reciclaje en Chile (2021): Estudio del Material Disponible País (MDP) y el reciclado de las Baterías Fuera de Uso (BFU) en Chile.
- APERC - Asia Pacific Energy Research Centre and The Institute of Energy Economics, Japan (2019): APEC Energy Demand and Supply Outlook | 7th Edition | Vol. II. Asia Pacific Economic Cooperation (APEC). Singapore.
- ArenaEV (2022): NCM, NCA, LFP, solid-state - EV battery chemistry explained. Online available at https://www.arenaev.com/ncm_nca_lfp_solidstate__ev_battery_chemistry_explained-news-343.php, last updated on 20 Mar 2023:44:06.
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica (2012): Ley para la Gestión Integral de Residuos No. 8839 del 13 de julio de 2010 (Anotada, concordada y comentada), Ley N° 8839. Online available at https://www.munialajuela.go.cr/cms/api/File/DownloadFile/OtherFiles/ley_comentada_final_06-12-2018_11_14_25.pdf.
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica (2021): Reforma Ley para la Gestión Integral de Residuos, N° 10031. Online available at http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=95507, last accessed on 16 Jun 2023.
- Balasubramaniam, B.; Singh, N.; Verma, S.; Gupta, R. K. (2020): Recycling of Lithium From Li-ion Batteries. In: *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*: Elsevier, pp. 546–554. Online available at <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128035818107647>.
- Battery University (2010): BU-205: Types of Lithium-ion, Battery University. Online available at <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>, last updated on 2 Apr 2023:51:12.

- Battery University (2021): Types of Lithium-ion. Online available at <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>, last updated on 22 Oct 2021, last accessed on 24 Nov 2022.
- BattV (1998): Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren (Batterieverordnung - BattV). Online available at https://www.batteriegesetz.de/wp-content/uploads/verordnung_battv_fassung_bis_20091130.pdf, last accessed on 08.02.202208.02.2022.
- Becerra, J. (21 Apr 2022): Gobierno extraerá el litio y empresas fabricarán baterías de autos. In: *EL CEO*, 21 Apr 2022. Online available at <https://elceo.com/negocios/gobierno-extraera-el-litio-y-empresas-fabricaran-baterias-de-autos/>, last accessed on 24 Mar 2023.
- Bej, S.; Zhimomi, T.; Hochfeld, C.; Riehle, E.-B.; Rather, Z. Prof.; Bradiya, M. R.; Maity, S. (2022): International review on Recycling Ecosystem of Electric Vehicle Batteries. GIZ; Agora Verkehrswende; Indian Institute of Technology, Bombay. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH (ed.). Bonn, Eschborn.
- Berger, K.; Schöggel, J.-P.; Baumgartner, R. J. (2022): Digital battery passports to enable circular and sustainable value chains: Conceptualization and use cases. In: *Journal of Cleaner Production* 353, p. 131492. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131492.
- Betz, J.; Amera, T.; Atiemo, T.; Omido, P.; Adogame, L. (2022): Donating used Lithium-ion batteries to Africa? Clear rules urgently needed. Online available at <https://www.oeko.de/en/press/archive-press-releases/press-detail/2022/donating-used-lithium-ion-batteries-to-africa-clear-rules-urgently-needed>, last accessed on 12 Dec 2022.
- Bird, R.; Baum, Z. J.; Yu, X.; Ma, J. (2022): The Regulatory Environment for Lithium-Ion Battery Recycling. *ACS Energy Letters* (ed.). Online available at <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsenenergylett.1c02724>, last accessed on 5 Dec 2022.
- Blakemore, R.; Ryan, P.; Tobin, W. (2022): Alternative Battery Chemistries and Diversifying Clean Energy Supply Chains (Issue Brief). Atlantic Council - Global Energy Center (ed.). Online available at <https://www.atlanticcouncil.org/wp-content/uploads/2022/09/Alternative-Battery-Chemistries-and-Diversifying-Clean-Energy-Supply-Chains.pdf>.
- BloombergNEF (2022): Electric Vehicles Start Gaining Traction in Latin America. Online available at <https://about.bnef.com/blog/electric-vehicles-start-gaining-traction-in-latin-america/>, last updated on 6 Apr 2022.
- Brückner, L.; Frank, J.; Elwert, T. (2020): Industrial Recycling of Lithium-Ion Batteries—A Critical Review of Metallurgical Process Routes. In: *Metals* 10 (8), p. 1107. DOI: 10.3390/met10081107.
- C40 Cities; P4G; ICCT - International Council on Clean Transportation (2023): E-BUS RADAR, E-BUS RADAR, C40 Cities; P4G; International Council on Clean Transportation. Online available at <https://www.ebusradar.org/es/>, last updated on 20 Mar 2023:50:41.
- Circular Economy Practitioner Guide (2023): Strategies and examples, Circular Economy Practitioner Guide. Online available at <https://www.ceguide.org/Strategies-and-examples>, last updated on 21 Apr 2023, last accessed on 21 Apr 2023.
- Citizens Information (2022): EU law. Citizens Information (ed.). Online available at https://www.citizensinformation.ie/en/government_in_ireland/european_government/eu_law/european_laws.html, last updated on 12 Dec 2022, last accessed on 12 Dec 2022.

- Costa, C. M.; Barbosa, J. C.; Gonçalves, R.; Castro, H.; Del Campo, F. J.; Lanceros-Méndez, S. (2021): Recycling and environmental issues of lithium-ion batteries: Advances, challenges and opportunities. In: *Energy Storage Materials* 37, pp. 433–465. DOI: 10.1016/j.ensm.2021.02.032.
- Curtis, T.; Smith, L.; Buchanan, H.; Heath, G. (2021): A Circular Economy for Lithium-Ion Batteries Used in Mobile and Stationary Energy Storage: Drivers, Barriers, Enablers, and U.S. Policy Considerations (Technical Report, NREL/TP-6A20-77035). National Renewable Energy Laboratory (ed.). Golden, CO (United States).
- Dai, Q.; Spangenberg, J.; Ahmed, S.; Gaines, L.; Kelly, J. C.; Wang, M. (2023): EverBatt: A Closed-loop Battery Recycling Cost and Environmental Impacts Model (ANL-19/16, 1530874). Online available at <http://www.osti.gov/servlets/purl/1530874/>.
- Domenech Cots, J. R. and Guillén Miranda, R. (2021): Elaboración de un estudio sobre la existencia de baterías de litio usadas en Costa Rica y América Central, que estarían disponibles para ser valorizadas, Proyecto de desarrollo PPP. Towards a secure and eco-friendly circular economy of lithium batteries.
- Dragonfly Energy (2022): What Is Thermal Runaway In Batteries? Online available at <https://dragonflyenergy.com/thermal-runaway/>, last accessed on 20 Apr 2023.
- Dunn, J. B.; Gaines, L.; Sullivan, J.; Wang, M. Q. (2012): Impact of Recycling on Cradle-to-Gate Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Automotive Lithium-Ion Batteries. In: *Environ. Sci. Technol.* 46 (22), pp. 12704–12710. DOI: 10.1021/es302420z.
- electrive.net (1 Apr 2022): Gotion High-Tech baut LFP-Zellen mit 210 Wh/kg in Serie, 1 Apr 2022. Online available at <https://www.electrive.net/2022/04/01/gotion-high-tech-baut-lfp-zellen-mit-210-wh-kg-in-serie/>, last accessed on 30 Nov 2022.
- Element Energy Ltd (2019): Batteries on wheels: the role of battery electric cars in the EU power system and beyond, Technical Appendix, Element Energy Ltd. Element Energy Ltd (ed.). Online available at https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/2019_06_Element%20Energy_Batteries_on_wheels_Technical_appendix.pdf, last updated on 2019.
- EPA - United States Environmental Protection Agency and OLEM (2019): Used Lithium-Ion Batteries, United States Environmental Protection Agency; OLEM. Online available at <https://www.epa.gov/recycle/used-lithium-ion-batteries>, last updated on 1 Feb 2023:40:35.
- Eunomia (2021): Cutting Lithium-ion Battery Fires in the Waste Industry. Online available at https://www.circularonline.co.uk/wp-content/uploads/2021/01/Waste-Fires-Caused-by-Li-ion-Batteries_v3.0.pdf, last accessed on 23 Jan 2023.
- European Commission (2006): Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators and repealing Directive 91/157/EEC. Online available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02006L0066-20131230&rid=1>, last accessed on 8 Feb 2022.
- European Parliament; Council of the European Union (2023): Regulation (EU) 2023/1542 concerning batteries and waste batteries, amending Directive 2008/98/EC and Regulation (EU) 2019/1020 and repealing Directive 2006/66/EC, Version of 12 Jul 2023. In: *Official Journal of the European Union* L191 (1). Online available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1542>, last accessed on 4 Dec 2023.

- Florencia Guglielmetti (15 Jun 2021): Inauguran la primera planta de tratamiento de baterías de litio en México. In: *Portal Movilidad*, 15 Jun 2021. Online available at <https://portalmovilidad.com/inauguran-la-primer-planta-de-tratamiento-de-baterias-de-litio-en-mexico/>, last accessed on 14 Dec 2022.
- Fraunhofer; EIT Raw Materials (2021): Future expert needs in the battery sector.
- Gaines, L. L. and Dunn, J. B. (2014): Lithium-ion battery environmental impacts. In: *Lithium-ion Batteries*: Elsevier, pp. 483–508.
- Geref, G.; Bamber, P.; Fernandez-Stark, K. (2016): Promoting Decent Work in Global Supply Chains in Latin America and the Caribbean. International Labour Organization (ed.).
- Global Battery Alliance; WEF - World Economic Forum (2019): A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030 - Unlocking the Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation. Geneva.
- Government of the Netherlands (2016): A Circular Economy in the Netherlands by 2050: The Ministry of Infrastructure and the Environment and the Ministry of Economic Affairs.
- Graham, N.; Malagón, E.; Viscidi, L.; Yépez, A. (2021): State of Charge: Energy Storage in Latin America and the Caribbean: Inter-American Development Bank. Online available at <https://publications.iadb.org/en/node/30110>.
- Hampel, C. (2022): Battery reuse & recycling expand to scale in China, Beijing recently issued a series of directives for the battery reuse and recycling industries. *electrive.com* (ed.). Online available at <https://www.electrive.com/2022/01/29/battery-reuse-recycling-expands-to-scale-in-china/>, last updated on 24 Oct 2022, last accessed on 6 Dec 2022.
- IEA - International Energy Agency (2020): Innovation in batteries and electricity storage. Paris. Online available at <https://www.iea.org/reports/innovation-in-batteries-and-electricity-storage>.
- IEA - International Energy Agency (2022a): Grid-Scale Storage, Grid-Scale Storage, International Energy Agency. Online available at <https://www.iea.org/reports/grid-scale-storage>, last updated on 20 Mar 2023:09:37.
- IEA - International Energy Agency (2023): Global EV Outlook 2021.
- IHK Karlsruhe (2020): Änderungen im Batteriegelgesetz ab Anfang 2021. IHK Karlsruhe (ed.). Online available at <https://www.karlsruhe.ihk.de/fachthemen/umwelt/abfall/batterien/aenderungen-im-batteriegelgesetz-ab-anfang-2021-4986628>, last accessed on 8 Feb 2022.
- International Energy Agency (2022b): Global Electric Vehicle Outlook 2022: International Energy Agency.
- International Renewable Energy Agency (2022a): Renewable Energy Statistics 2022: International Renewable Energy Agency.
- IRENA - International Renewable Energy Agency (2022b): Energy Transformation - Latin America and the Caribbean (Global Renewables Outlook).
- IRENA - International Renewable Energy Agency (2022c): World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway. Abu Dhabi. Online available at www.irena.org/publications.
- Islamovic, M. and Lind, T.: Development of a new forecasting equation simulating EV sales globally.

- Jacoby, M. (2019): It's time to get serious about recycling lithium-ion batteries, Chemical & Engineering News. Online available at <https://cen.acs.org/materials/energy-storage/time-serious-recycling-lithium/97/i28>, last updated on 10 Jan 2023:18:14.
- Kampker, A.; Wessel, S.; Fiedler, F.; Maltoni, F. (2021): Battery pack remanufacturing process up to cell level with sorting and repurposing of battery cells. In: *Jnl Remanufactur* 11 (1), pp. 1–23. DOI: 10.1007/s13243-020-00088-6.
- Kenji, A. (2022): China introduces new measures to promote traction battery recycling | Enviliance ASIA. Enviliacne ASIA (ed.). Online available at https://enviliance.com/regions/east-asia/cn/report_4437, last updated on 6 Dec 2022, last accessed on 6 Dec 2022.
- Kohli, S.; Khan, T.; Yang, Z.; Miller, J. (2022): Zero-emission vehicle deployment: Latin America (ICCT Briefing). The international Council on Clean Transportation (ed.). Online available at <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/04/EMDE-Latin-America-briefing-A4-v2.pdf>.
- Kordesch, K. and Taucher-Mautner, W. (2009): HISTORY | Primary Batteries. In: Garche, J. and Dyer, C. K. (ed.): Encyclopedia of electrochemical power sources. Amsterdam, Oxford: Elsevier, pp. 555–564. Online available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527455000034>.
- Kyburz (2022): Kyburz battery recycling - How it works. Online available at <https://battery-recycling.kyburz-switzerland.ch/>, last accessed on 12 Dec 2022.
- Lazard (ed.) (2018): Lazard's Levelized Cost of Storage Analysis, Version 4.0, 2018. Online available at <https://www.lazard.com/media/450774/lazards-levelized-cost-of-storage-version-40-vfinal.pdf>.
- Li-Cycle (2022): Li-ion battery recycling. Online available at <https://li-cycle.com/de/technology/>, last accessed on 12 Dec 2022.
- LII - Legal Information Institute (2023): Resolution, Cornell Law School. Online available at <https://www.law.cornell.edu/wex/resolution>, last updated on 11 Apr 2023, last accessed on 21 Apr 2023.
- Lima, M. C. C.; Pontes, L. P.; Vasconcelos, A. S. M.; Araujo Silva Junior, W. de; Wu, K. (2022): Economic Aspects for Recycling of Used Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles. In: *Energies* 15 (6), p. 2203. DOI: 10.3390/en15062203.
- López Soto, D.; Mejdalani, A.; Chueca Monteruga, E.; Hallack, M. (2022): La Ruta Energética de América Latina y El Caribe. Inter-American Development Bank (IDB). Online available at <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/La-ruta-energetica-de-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>.
- López, A.; Obaya, M.; Pascuini, P.; Ramos, A. (2019): Litio en la Argentina: Oportunidades y desafíos para el desarrollo de la cadena de valor: Inter-American Development Bank.
- MAN Truck & Bus (2023): Electric Long-distance Runners, Electric Long-distance Runners. Online available at <https://www.mantruckandbus.com/en/electrifying-europe-day-2/battery-use-and-range-in-man-buses.html>, last updated on 20 Mar 2023:12:59.
- Manhart, A.; Betz, J.; Schleicher, T.; Hilbert, I.; Smit, R.; Jung, H.; Adogame, L.; Olagunju, I.; Clews, A.; Adegun, O. (2022): Management of End-of-life Li-ion Batteries through E-waste Compensation in Nigeria. Online available at https://prevent-waste.net/wp-content/uploads/2022/05/Management-of-End-of-life-Li-ion-Batteries-through-E-waste-Compensation-in-Nigeria_Feasibility-Study_ECoN.pdf, last accessed on 2 Dec 2022.

- Manhart, A.; Hilbert, I.; Magalini, F. (2018): End-of-Life Management of Batteries in the Off-Grid Solar Sector. GIZ (ed.).
- Melin, H. E. (2022): The lithium-ion battery end-of-life market, A baseline study, Circular Energy Storage. Online available at https://www3.weforum.org/docs/GBA_EOL_baseline_Circular_Energy_Storage.pdf, last updated on 22 Dec 2022.
- MINAE - Ministerio de Ambiente y Energía (2018): Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030. San José, CR. Online available at <http://www.pgrweb.go.cr/DocsDescargar/Normas/No%20DE-41579/Version1/PlanTranspElect.pdf>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017): Resolución No. 2246: Por la cual se modifica el artículo 10 de la Resolución 1297 de 2010 y se dictan otras disposiciones, MADS.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022): Resolución 851 de 2022 (52.121).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (ed.) (2020): Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Minas y Energía; Ministerio de Transporte; Unidad de Planeación Mineroenergética. Bogotá D.C. Colombia. Online available at <https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/ENME.pdf>.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010): Resolución Número 1297: Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Pilas y/o Acumuladores y se adoptan otras disposiciones, MAVDT.
- Ministerio de Energía (2020): Energía 2050: Política Energética de Chile. Santiago de Chile. Online available at https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/energia_2050_-_politica_energetica_de_chile.pdf.
- Ministerio de Energía (2021): Estrategia Nacional de Electromovilidad. Santiago de Chile. Online available at https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia-nacional-electromovilidad_ministerio-de-energia.pdf.
- Ministerio de Salud (2004): Decreto 148: Aprueba Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos, Decreto 148. Online available at <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=226458>, last accessed on 17 Mar 2023.
- Ministerio del Medio Ambiente (2016): Ley 20920: Establece Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje, Ley 20920. Online available at <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894>.
- Ministerio del Medio Ambiente (2022): Resolución 207 Exenta: Anteproyecto de Decreto Supremo que establece Metas de Recolección y Valorización y Obligaciones Asociadas de Pilas y Aparatos Eléctricos y Electrónicos, Resolución 207. Online available at <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1173525>, last accessed on 1 Mar 2023.
- MINSA - Ministerio de Salud; MINAE - Ministerio de Ambiente y Energía (2022): Entregable 2: Diagnóstico de la situación en Costa Rica de la gestión de baterías de vehículos eléctricos. Segundo informe parcial de la consultoría "Elaboración de una hoja de ruta para la gestión eficiente y ambiental de las baterías de los vehículos eléctricos en Costa Rica". Online available at <https://energia.minae.go.cr/wp-content/uploads/2022/07/hoja-de-ruta.pdf>.
- Moerenhout, T.; Goldar, A.; Goel, S.; Agarwal, P.; Jain, S.; Thakur, V. (2022): Understanding Investment, Trade, and Battery Waste Management Linkages for a Globally Competitive Ev Manufacturing Sector. Indian Council for Research on International Economic Relations (ICRIER). New Delhi. Online available at https://icrier.org/pdf/Understanding_Investment_Trade_BatteryWaste_Management.pdf.

- Mordor Intelligence (2023): Latin America Electric Bus Market Analysis - Industry Report - Trends, Size & Share. Online available at <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/latin-america-electric-bus-market>, last updated on 20 Mar 2023:00:27.
- MOVE (2022): Costa Rica traza la primera hoja de ruta para la gestión de baterías de vehículos eléctricos en la región – MOVE, Movilidad Eléctrica Latinoamérica y el Caribe. Online available at <https://movelatam.org/costa-rica-traza-la-primera-hoja-de-ruta-para-la-gestion-de-baterias-de-vehiculos-electricos-en-la-region/>, last updated on 5 Dec 2022, last accessed on 5 Dec 2022.
- Mrozik, W.; Rajaeifar, M. A.; Heidrich, O.; Christensen, P. (2021): Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. In: *Energy Environ. Sci.* 14 (12), pp. 6099–6121. DOI: 10.1039/D1EE00691F.
- Neometals (2021): A Minerals and Advanced Materials Project Development Company. Neometals (ed.). Online available at https://www.neometals.com.au/wp-content/uploads/2021/10/17238-Neometals-2021-Annual-Report_Web.pdf.
- Neumann, J.; Petranikova, M.; Meeus, M.; Gamarra, J. D.; Younesi, R.; Winter, M.; Nowak, S. (2022): Recycling of Lithium-Ion Batteries—Current State of the Art, Circular Economy, and Next Generation Recycling. In: *Advance Energy Materials* 12 (2102917). DOI: 10.1002/aenm.202102917.
- NITI Aayog and Green Growth Equity Fund Technical Cooperation Facility (2022): Advanced Chemistry Cell Battery Reuse and Recycling Market in India. Green Growth Equity Fund Technical Cooperation Facility. Online available at https://www.niti.gov.in/sites/default/files/2022-07/ACC-battery-reuse-and-recycling-market-in-India_Niti-Aayog_UK.pdf.
- NREL (2023): Battery Second-Use Repurposing Cost Calculator, Transportation and Mobility Research, NREL. Online available at <https://www.nrel.gov/transportation/b2u-calculator.html>, last accessed on 13 Apr 2023.
- Obaya, M. and Céspedes, M. (2021): Análisis de las redes globales de producción de baterías de ion de litio: implicaciones para los países del triángulo del litio. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (ed.). Online available at https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46943/1/S2100250_es.pdf, last accessed on 6 Dec 2022.
- Ober, J. A. (2018): Mineral Commodity Summaries 2018 (Mineral Commodity Summaries).
- OECD - Organisation for Economic Cooperation and Development (2022): Extended producer responsibility. Organisation for Economic Cooperation and Development (ed.). Online available at <https://www.oecd.org/env/tools-evaluation/extendedproducerresponsibility.htm>, last accessed on 28 Feb 2022.
- PREAL - Proyecto Residuos Electrónicos América Latina (2022): Boletín N°9, Proyecto Residuos Electrónicos América Latina. Online available at <https://residuoselectronicosal.org/2022/09/boletin-no9/>, last updated on 14 Feb 2023, last accessed on 18 Apr 2023.
- Presidencia de la República; Ministerio de Salud (ed.) (2014): Reglamento para la declaratoria de residuos de manejo especial, Decreto N° 38272-S.
- Presidencia de la República; Ministerio de Salud; Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (ed.) (2010): Reglamento para la Gestión Integral de los Residuos Electrónicos Costa Rica, Decreto N° 35993-S.

- PREVENT Waste Alliance (ed.) (2020): EPR Toolbox. Factsheet 02: How can a PRO be established? In collaboration with Cyclos. Online available at <https://prevent-waste.net/en/epr-toolbox/>, last accessed on 31 Jan 2023.
- PV magazine (2022): SQM fabricará y reciclará baterías de litio en Chile, pv magazine. Online available at <https://www.pv-magazine-latam.com/2022/04/13/sqm-fabricara-y-reciclar-baterias-de-litio-en-chile/>, last updated on 13 Apr 2022, last accessed on 7 Dec 2022.
- Qiao, H. and Wei, Q. (2012a): 10 - Functional nanofibers in lithium-ion batteries. In: Wei, Q. (ed.): *Functional nanofibres and their applications*. Oxford, Philadelphia: Woodhead Publishing Ltd (Woodhead Publishing series in textiles, no. 134), pp. 197–208. Online available at <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857090690500100>.
- Qiao, H. and Wei, Q. (2012b): Functional nanofibers in lithium-ion batteries. In: *Functional Nanofibers and their Applications*: Elsevier, pp. 197–208.
- Rahman, A.; Afroz, R.; Safrin, M. (2017): Recycling and Disposal of Lithium Batteries: An Economical and Environmental Approach. In: *IJUM Engineering Journal* 18 (2), p. 15. DOI: 10.31436/iiumej.v18i2.773.
- Reddy, T. B. (2011): *Linden's handbook of batteries*: McGraw-Hill Education.
- Reneos (2022): Safe transport: end-of-life EV batteries in the right packaging. Online available at <https://www.reneos.eu/case/safe-transport-end-of-life-ev-batteries-in-the-right-packaging>, last accessed on 12 Dec 2022.
- RRC (2019): Shipping Guidelines for Lithium Ion Batteries. Online available at https://www.rrc-ps.com/fileadmin/Dokumente/Shipment/Shipping_Guidelines_Lithium_Ion_Batteries_EN.pdf, last accessed on 12 Dec 2022.
- Sánchez, F. and Hartlieb, P. (2020): Innovation in the Mining Industry: Technological Trends and a Case Study of the Challenges of Disruptive Innovation. In: *Mining, Metallurgy & Exploration* 37 (5), pp. 1385–1399. DOI: 10.1007/s42461-020-00262-1.
- Secretaría de Relaciones Exteriores; University of California (ed.) (2022): Grupo de Trabajo para la Electrificación del Transporte: Diagnóstico y Recomendaciones para la Transición de la Industria Automotriz en México. Online available at https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/798195/Electrificacio_n_del_Transporte.pdf.
- SEGOB - Secretaría de Gobernación (2022): DECRETO por el que se crea el organismo público descentralizado denominado Litio para México. Secretaría de Gobernación. Online available at https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5662345&fecha=23/08/2022#gsc.tab=0, last updated on 18 Apr 2023, last accessed on 18 Apr 2023.
- SEMARNAT - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012): Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Online available at <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/1055/SEMARNA/SEMARNA.htm>, last accessed on 23 Mar 2023.
- SEMARNAT - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2020): Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos (Primera edición). Ciudad de México. Online available at <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>.

- SEMARNAT - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2022): Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de Residuos de Manejo Especial 2022-2024, PNPGIRME. Online available at https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2022/PNPGIR_2022.pdf, last accessed on 21 Apr 2023.
- Sojka, R.; Pan, Q.; Billmann, L. (2020): Comparative study of Lithium-ion battery recycling processes. ACCUREC Recycling GmbH (ed.). Online available at <https://accurec.de/wp-content/uploads/2021/04/Accurec-Comparative-study.pdf>, last accessed on 2 Dec 2022.
- Soler Guzmán, A.; van Oldeneel, I.; Jæger, J.; Lecoque, D.; Cuervo, J. (2021): Status of the off-grid renewable energy market in Latin America & the Caribbean. Inter-American Development Bank; Alliance for Rural Electrification. Özkan, O. and Ng, L. (ed.). Online available at <https://www.ruralelec.org/sites/default/files/Status%20of%20the%20off-grid%20renewable%20energy%20market%20in%20Latin%20America%20%26%20the%20Caribbean%202021.pdf>.
- SQM Media Center (2022): SQM y LG Energy Solution firman acuerdo para fomentar litio. Online available at <https://www.sqmlithium.com/sqm-y-lg-energy-solution-firman-acuerdo-para-fomentar-litio/>, last updated on 5 Jun 2022, last accessed on 14 Dec 2022.
- Stahl, H.; Baron, Y.; Hay, D.; Hermann, A.; Mehlhart, G.; Baroni, L.; Rademaekers, K.; Williams, R.; Pahel, S. (2018): Study report in support of evaluation of the Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators, Final Evaluation Report. European Commission (ed.). Online available at <https://op.europa.eu/o/opportal-service/download-handler?identifier=d2141777-dc01-11e8-afb3-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part=>, last accessed on 12 Dec 2022.
- Statista (2023): Estimated average battery capacity in electric vehicles worldwide from 2017 to 2025, by type of vehicle, Statista. Online available at <https://www.statista.com/statistics/309584/battery-capacity-estimates-for-electric-vehicles-worldwide/>, last updated on 20 Mar 2023:41:24.
- Tankou, A.; Bieker; Georg; Hall, D. (2023): Scaling up reuse and recycling of electric vehicle batteries: Assessing challenges and policy approaches (White Paper). International Council on Clean Transportation (ed.). Online available at <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/recycling-electric-vehicle-batteries-feb-23.pdf>, last accessed on 21 Apr 2023.
- Tarascon, J.-M. and Armand, M. (2001): Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. In: *nature* 414 (6861), pp. 359–367.
- Tesla (2020): Battery Day Presentation 2020. Tesla 2020 Annual Meeting of Stockholders and Battery Day, Sept 2020.
- TUMI E-Bus Mission (2022a): Baranquilla Colombia. Deep Dive City.
- TUMI E-Bus Mission (2022b): Bogotá Colombia, Deep dive City. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH (ed.).
- TUMI E-Bus Mission (2022c): Valledupar Colombia, Deep dive city. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH (ed.).
- TÜV SÜD: Lithium-Ion Battery Fires: Myth vs. Reality. Online available at <https://www.tuvsud.com/en-us/resource-centre/stories/lithium-ion-battery-fires-myth-vs-reality>, last accessed on 20 Apr 2023.
- Tycorun Energy (2022): 12v 100ah lithium ion battery, The Best lithium ion battery suppliers | lithium ion battery Manufacturers - TYCORUN ENERGY. Online available at <https://www.takomabattery.com/product/12v-100ah-lithium-ion-battery/>, last accessed on 20 Mar 2023.

- Tycorun Energy (2023): The role of wind turbine battery and FAQs guide. Online available at <https://www.takomabattery.com/the-role-of-wind-turbine-battery-and-faqs-guide/>, last accessed on 20 Mar 2023.
- U.S. Department of Transportation (2022): Transporting Lithium Batteries, Lithium Battery Safety. Online available at <https://www.phmsa.dot.gov/lithiumbatteries>, last updated on 23 Mar 2023:33:09.
- UBA - Umwelt Bundesamt (2022): Altbatterien, Umwelt Bundesamt. Online available at <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altbatterien#im-jahr-2020-hat-deutschland-alle-von-der-eu-geforderten-mindestziele-erreicht>, last accessed on 12 Dec 2022.
- UBA - Umwelt Bundesamt (ed.) (2011): Batterierecycling in Deutschland: Rücknahme- und Verwertungsergebnisse 2009. Online available at https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/publikationen/batterierecycling_in_deutschland_2009.pdf, last accessed on 8 Feb 2022.
- UNEP - United Nations Environment Programme (2016): Movilidad eléctrica: Oportunidades para Latinoamérica. Online available at <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/26304>.
- UNEP - United Nations Environment Programme (2019): Technical guidelines on transboundary movements of electrical and electronic waste and used electrical and electronic equipment, in particular regarding the distinction between waste and non-waste under the Basel Convention. Online available at <http://www.basel.int/Portals/4/download.aspx?d=UNEP-CHW.14-7-Add.6-Rev.1.English.pdf>, last accessed on 12 Dec 2022.
- Urcuyo Solórzano, R.; González Flores, D.; Fernández Sánchez, A.; Madrigal Rodríguez, P.; Pérez Mora, A.; Reyes Gatjens, V.; Vega Garita, V. (2022): Plan de Trabajo: Elaboración de una hoja de ruta para la gestión eficiente y ambiental de las baterías de los vehículos eléctricos en Costa Rica. Centro de Investigación en Electroquímica y Energía Química CELEQ. MINSA; MINAE; AFD and Asociación Costa Rica por Siempre (ed.). Online available at <https://energia.minae.go.cr/wp-content/uploads/2022/07/hoja-de-ruta.pdf>, last accessed on 6 Mar 2023.
- USGS (2021): Mineral commodity summaries 2021 (Mineral Commodity Summaries). U.S. Geological Survey. Reston, VA. Online available at <http://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2021>.
- Velázquez-Martinez, O.; Valio, J.; Santasalo-Aarnio, A.; Reuter, M.; Serna-Guerrero, R. (2019): A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. In: *Batteries* 5 (68). DOI: 10.3390/batteries5040068.
- Wenbo Li; Muyi Yang; Ruyin Long; Kristy Mamaril; Yuanying Chi (2021): Treatment of electric vehicle battery waste in China: A review of existing policies. In: *129* (2), pp. 111–122. DOI: 10.3846/jeelm.2021.14220.
- Weyhe, R. and Yang, X. (2018): Investigation about Lithium-Ion Battery Market Evolution and future Potential of Secondary Raw Material from Recycling. ACCUREC Recycling GmbH (ed.).
- Wunderlich-Pfeiffer, F. (12 Oct 2022): Die Revolution der Natrium-Akkus wird absehbar. In: *golem.de*. 2022, 12 Oct 2022. Online available at <https://www.golem.de/news/akkutechnik-die-revolution-der-natrium-akkus-wird-absehbar-2210-168344.html>, last accessed on 19 Oct 2022.

- Xu, J.; Thomas, H. R.; Francis, R. W.; Lum, K. R.; Wang, J.; Liang, B. (2008): A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries. In: *Journal of Power Sources* 177 (2), pp. 512–527. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2007.11.074.
- Zachary J. Baum; Robert E. Bird; Xiang Yu; and Jia Ma (2022): Lithium-Ion Battery Recycling—Overview of Techniques and Trends. In: *ACS Energy Letters* (7), pp. 712–719. DOI: 10.1021/acsenergylett.1c02602.
- Zheng, X.; Zhu, Z.; Lin, X.; Zhang, Y.; He, Y.; Cao, H.; Sun, Z. (2018): A Mini-Review on Metal Recycling from Spent Lithium Ion Batteries. In: *Engineering* 4 (3), pp. 361–370. DOI: 10.1016/j.eng.2018.05.018.
- Zhu, J.; Mathews, I.; Ren, D.; Li, W.; Cogswell, D.; Xing, B.; Sedlatschek, T.; Kantareddy, S. N. R.; Yi, M.; Gao, T.; Xia, Y.; Zhou, Q.; Wierzbicki, T. et al. (2021): End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries. In: *Cell Reports Physical Science* 2 (8), p. 100537. DOI: 10.1016/j.xcrp.2021.100537.

Anexos

Anexo I. Lista de entrevistas y contactos con actores regionales

| ENTREVISTAS | |
|---|---------------------------------|
| Nombre de la organización / empresa | Fecha de la entrevista |
| Colombia | |
| Altero S.A.S. | 18 de enero , 2023 |
| Orinoco | 20 de febrero , 2023 |
| Grupo Retorna | 20 de febrero , 2023 |
| Recobatt | 21 de febreros , 2023 |
| Costa Rica | |
| Fortech | 28 de noviembre , 2022 |
| Soluciones Integrales en Reciclaje S.A. (Solirsa) | 31 de enero , 2023 |
| Chile | |
| Kyklos | 31 de enero , 2023 |
| Andes Electrónica | 1 de febrero, 2023 |
| Relitia | 9 de febrero, 2023 |
| México | |
| Cámara Mexicana de Litio (CAMEXLI) | 30 de enero, 2023 |
| Regional | |
| Grupo de Logística Inversa LATAM (RLGA) | 25 de enero, 2023 |
| OTRAS COMUNICACIONES PERSONALES | |
| Nombre de la organización / empresa | Por correo electrónico/teléfono |
| Recicla Electrónicos México (REMSA) | teléfono |
| Inversiones Ecominería SPA (Chile) | teléfono |
| e-Waste LATAM | correo electrónico |

Anexo II. Mapeo de actores - Lista completa de todos los actores identificados en cuatro países seleccionados

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|--|-----------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------|
| COLOMBIA | | | | | |
| Comisión Intersectorial de Cambio Climático | CCPI | Gobierno / sector público | Normativa | | |
| Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible | Minambiente CO | Gobierno / sector público | Normativa | | |
| Ministerio de Energía y Minas | Minenergía CO | Gobierno / sector público | Normativa | | |
| Ministerio de Transportes | Mintransporte CO | Gobierno / sector público | Normativa | | |
| Ecocómputo | Ecocómputo | Sociedad civil / ONG | Reciclaje de RAEE | Colección | Miembro del Grupo Retorna |
| Pilas con el ambiente | Pilas con el ambiente | Sociedad civil / ONG | PRO | Colección | Miembro del Grupo Retorna |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|--|-------------|----------------|-----------------------------------|---------------------------------|--|
| Tronex | Tronex | Sector privado | Otros | | Principal fabricante de baterías; socio de Innova y Recobatt; fundador de Recopila |
| Asociación Nacional de Empresarios de Colombia | ANDI | Sector privado | Otros | | |
| Altero | Altero | Sector privado | Reciclaje LIB | Reciclaje (nivel de masa negra) | Para más información, consulte el ejemplo práctico 2 |
| Auteco Movilidad | Auteco | Sector privado | Otros | | |
| BATx | BATx | Sector privado | Reutilización/segunda vida | Reutilización | Puesta en marcha de la segunda vida de ULIB |
| Empresa de Energía de Bogotá (ENEL) | ENEL X | Sector privado | Fomento de la movilidad eléctrica | | |
| Gaia Vitare | Gaia Vitare | Sector privado | Reciclaje ULIB | Clasificación | Socio de Ecomineria (CL) |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|----------------------------|-------------|----------------|--------------------------------|---------------------------------|--|
| Innova Ambiental | Innova | Sector privado | Reciclaje ULIB | Reciclaje (nivel de masa negra) | Socio de Tronex y Recobatt. Para más información, véase el ejemplo práctico 1. |
| Lito Colombia | Lito CO | Sector privado | Reciclaje de RAEE | | |
| Orinoco | Orinoco | Sector privado | Reciclaje de RAEE | | |
| Pcshek | Pcshek | Sector privado | Reciclaje de RAEE | Clasificación | |
| Recobatt | Recobatt CO | Sector privado | Reutilización/ segunda vida | Reutilización | Socio de Tronex e Innova. Para más información, véase Ejemplo práctico 1 |
| Reconergy | Recoenergy | Sector privado | PRO | | Miembro del Grupo Retorna |
| Recopila | Recopila | Sector privado | PRO | Colección | Fundada por Tronex |
| Tecnologías Ecológicas SAS | Ecotec | Sector privado | Reciclaje de RAEE | Clasificación | Proveedor de Altero |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|--|---------------|---------------------------|-------------------|-------------------------|---|
| Comité Nacional de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) | ACORRAE | Red | Reciclaje de RAEE | | |
| Grupo Retorna | Grupo Retorna | Red | PRO | Colección | Incluye Pilas con el Ambiente, Recoenergy, Ecocomputo |
| Mesa Baterías de Litio Colombia | Mesa LIB COL | Red | Promoción | | |
| COSTA RICA | | | | | |
| Instituto Costarricense de Electricidad | ICE | Gobierno / sector público | Normativa | | |
| Instituto Nacional de Aprendizaje | INA | Gobierno / sector público | Investigación | Reutilización | Investigación sobre proyectos de segunda vida para baterías de vehículos eléctricos |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|--|----------------|---------------------------|---------------|-------------------------|---|
| Ministerio de Medio Ambiente y Energía | MINAE CR | Gobierno / sector público | Reglamento | | Miembro del proyecto: "hoja de ruta para gestión de baterías en CR" |
| Ministerio de Obras Públicas y Transportes | MINOT CR | Gobierno / sector público | Reglamento | | |
| Ministerio de Sanidad | MINS CR | Gobierno / sector público | Reglamento | | Miembro del proyecto: "hoja de ruta para gestión de baterías en CR" |
| LabVolta, Universidad de Costa Rica | LabVolta | Académico / Investigación | Investigación | Reutilización | Investigación sobre proyectos de segunda vida para baterías de vehículos eléctricos |
| Asociación Costa Rica por Siempre | CR por Siempre | Sociedad civil / ONG | Promoción | | Miembro del proyecto: "hoja de ruta para gestión de baterías en CR" |
| Agencia Francesa de Desarrollo | AFD | | Financiación | | Miembro del proyecto: "hoja de ruta para gestión de baterías en CR" |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|----------------------------------|-------------------------|----------------|-------------------|---------------------------------|---|
| Fortech | Fortech | Sector privado | Reciclaje ULIB | Reciclaje (nivel de masa negra) | Para más información, consulte el ejemplo práctico 3 |
| Instituto Automotriz ECACtrónica | CEAC | Sector privado | Investigación | Reutilización | Investigación sobre proyectos de segunda vida para baterías de vehículos eléctricos |
| Recursos de iluminación LLC | Recursos de iluminación | Sector privado | Reciclaje ULIB | Reciclaje (nivel de masa negra) | RLGA empresa de transformación en CR |
| Socios de Quantum Lifecycle | Quantum | Sector privado | Reciclaje de RAEE | | Empresa canadiense que compró una planta en CR. Hace pretratamiento de baterías |
| Servicios Ecológicos MBBSA | MBBSA | Sector privado | Reciclaje de RAEE | Clasificación | |
| Solirsa | Solirsa | Sector privado | Reciclaje ULIB | Clasificación | |



| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|---|---------------|---------------------------|---------------|-------------------------|--|
| CHILE | | | | | |
| Ministerio de Energía | MinEnergia CL | Gobierno / sector público | Reglamento | | |
| Ministerio de Medio Ambiente | MMA CL | Gobierno / sector público | Reglamento | | |
| Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones | MTT CL | Gobierno / sector público | Reglamento | | |
| Pontificia Universidad Católica de Chile (PECLAB) | PECLAB | Académico / Investigación | Investigación | | Investigación relacionada con la ULIB a través del Laboratorio de Potencia y Conversión de Energía (PECLAB). |
| Universidad Católica del Norte | UCN | Académico / Investigación | Investigación | | Proyecto "Creación de un polo de investigación y desarrollo en la cadena de valor de las baterías de litio" con SQM. |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|---|-------------------|----------------|----------------------------|--|--|
| Andes Electrónica | Andes Electrónica | Sector privado | Reutilización/segunda vida | Reutilización | Para más información, consulte el ejemplo práctico 6 |
| Empresa Nacional de Telecomunicaciones S.A. | ENTEL | Sector privado | Otros | Colección | Campaña "Reutiliza" con Kyklos |
| Inversiones Ecominería SPA | Ecominería | Sector privado | Reciclaje ULIB | Reciclaje (recuperación de materiales) | Para más información, consulte el ejemplo práctico 4 |
| Kyklos | Kyklos | Sector privado | Otros | Colección | Colabora con Entel en la campaña de recolección; ha puesto en marcha el CIR (Centro Inclusivo de Reciclaje), donde se realiza un tratamiento previo. |
| LG Energy Solution | LG | Sector privado | Financiación | | Proyecto de inversión en reciclaje con SQM |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|---|-------------|----------------|-------------------|--|---|
| Midas | Midas | Sector privado | Reciclaje de RAEE | Reciclaje (clasificación / pretratamiento) | |
| Recobatt | Recobatt CL | Sector privado | Reciclaje de RAEE | Clasificación | Gestor autorizado de RAEE que recibe ULIB |
| Relitia | Relitia | Sector privado | Reciclaje ULIB | Reciclaje (recuperación de materiales) | Para más información, consulte el ejemplo práctico 5 |
| Sociedad Química y Minera de Chile S.A. | SQM | Sector privado | Financiación | | Uno de los mayores productores de sales de litio de CL; quiere promover el reciclaje de litio en CL |
| SustrendLab | SustrendLab | Sector privado | Financiación | | Una empresa de innovación de materiales apoya financieramente a Relitia |
| Tianqi Litio | Tianqi | Sector privado | Financiación | | Corporación minera china que compró parte de SQM |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|---|-------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------|--|
| Asociación Nacional de Reciclaje | ANIR | Red | Promoción del reciclaje ULIB | | Colabora con Kyklos |
| MÉXICO | | | | | |
| Dirección General de Políticas para el Cambio Climático MX | DGPCC | Gobierno / sector público | Normativa | | |
| Gobierno de Hidalgo | Gob Hidalgo | Gobierno / sector público | Normativa | | Infraestructura de reciclaje ULIB proyectada en este estado |
| Gobierno de la Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente | SEDEMA | Gobierno / sector público | PRO | Colección | Responsable de la campaña "Ponte Pilas con tu Ciudad", las pilas se entregan a SITRASA para su tramitación |
| Gobierno de Puebla | Gob Puebla | Gobierno / sector público | Normativa | | Infraestructura de reciclaje ULIB proyectada en este estado; financiada por Renova Labs. |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|---|---------------|---------------------------|-----------|-------------------------|---|
| Gobierno de Querétaro | Gob Querétaro | Gobierno / sector público | Normativa | | Proyecto de infraestructura de reciclaje de baterías de electromovilidad con CAMEXLI, ANVES e inversión privada |
| Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático | INECC | Gobierno / sector público | Normativa | | |
| Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano MX | SEDATU | Gobierno / sector público | Normativa | | |
| Secretaría de Economía MX | SEC | Gobierno / sector público | Normativa | | |
| Secretaría de Energía MX | SENER | Gobierno / sector público | Normativa | | |
| Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales MX | SEMARNAT | Gobierno / sector público | Normativa | | |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|--|----------|----------------------|-----------------------------------|-------------------------|--|
| Asociación Mexicana de Empresas de Gestión Energética | AMEXGEN | Sociedad civil / ONG | Promoción del reciclaje ULIB | | Grupo promotor de la planta de reciclaje ULIB |
| Asociación Nacional de Vehículos Eléctricos y Sustentables | ANVES | Sociedad civil / ONG | Fomento de la movilidad eléctrica | | Grupo promotor de la planta de reciclaje ULIB |
| Cámara Mexicana de Litio | CAMEXLI | Sociedad civil / ONG | Promoción del reciclaje ULIB | | Grupo promotor de la planta de reciclaje ULIB |
| Bicicletas Dendou | Dendou | Sector privado | Financiación | | Se anuncia una planta de reciclaje de baterías de vehículos eléctricos |
| Dian Procesos Metalúrgicos S.A. de C.V. | Dian | Sector privado | Reciclaje de RAEE | Clasificación | RLGA empresa downstream en MX |
| Ganfeng Litio | Ganfeng | Sector privado | Financiación | | Empresa china que anunció un proyecto de planta de reciclaje de ULIB en México |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|--|---------------------|----------------|-----------------------------------|---------------------------------|---|
| Junta Entrega y Recicla | JER | Sector privado | PRO | Colección | App para la recolección de RAEE que posteriormente son procesados por REMSA |
| Recicla Electrónicos México | REMSA | Sector privado | Reutilización/segunda vida | | Para más información, consulte el ejemplo práctico 7 |
| Laboratorios Renova | Laboratorios Renova | Sector privado | Financiación | | Colaboración con el Gobierno de Puebla para inaugurar una planta de reciclaje |
| Sistema Inteligente de Movilidad Sustentable | SIMS | Sector privado | Fomento de la movilidad eléctrica | | Grupo promotor de la planta de reciclaje ULIB |
| SITRASA | | Sector privado | Reciclaje ULIB | Reciclaje (nivel de masa negra) | |
| Telefónica Movistar México | Movistar | Sector privado | Otros | Colección | Recolección de RAEE en alianza con REMSA |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|---|----------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-------------|
| REGIONAL / OTROS PAÍSES DE AMÉRICA LATINA | | | | | |
| Banco Interamericano de Desarrollo | BID | Organizaciones intergubernamentales | Promoción | | |
| Comisión Económica para América Latina y el Caribe | CEPAL | Organizaciones intergubernamentales | Promoción | | |
| Foro Económico Mundial | FEM | Organizaciones intergubernamentales | Promoción | | |
| Foro Internacional del Transporte | ITF | Organizaciones intergubernamentales | Promoción | | |
| Movilidad Eléctrica Latinoamérica y el Caribe | MOVER | Organizaciones intergubernamentales | Fomento de la movilidad eléctrica | | |
| Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial | ONUDI | Organizaciones intergubernamentales | Promoción | | |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|--|------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente | PNUMA | Organizaciones intergubernamentales | Promoción | | |
| Programa Ciclos Sostenibles | CICLO | Organizaciones intergubernamentales | Investigación | | |
| Centro y Red de Tecnología del Clima | CTCN | Científico / Técnico | Investigación | | |
| Fundación Ellen Mac Arthur | CEM | Sociedad civil / ONG | Promoción | | |
| Fundación Konrad Adenauer | KAS | Sociedad civil / ONG | Promoción | | |
| BID Invest | BID Invest | Sector financiero | Financiación | | |
| Fondo para el Medio Ambiente Mundial | FMAM | Sector financiero | Financiación | | |
| Degraf | Degraf | Sector privado | Reciclaje de RAEE | | Miembro de eWaste LATAM |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|--|--------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|
| NewLife | NewLife | Sector privado | Reciclaje de RAEE | | Miembro de eWaste LATAM |
| Recicla Panamá | Recicla Panamá | Sector privado | Reciclaje de RAEE | | Miembro de eWaste LATAM |
| Grupo de Logística Inversa de América Latina | RLGA | Sector privado | Logística inversa | Logística inversa completa | Presencia regional en AR, CL, CO, MX y PE |
| Chatarra y Rezagos | Chatarra y Rezagos | Sector privado | Reciclaje de RAEE | | Miembro de eWaste LATAM |
| Vertmonde | Vertmonde | Sector privado | Reciclaje de RAEE | | Miembro de eWaste LATAM |
| Coalición de Economía Circular de América Latina y el Caribe | CECAL | Red | Promoción | | |
| eWaste Latam | eWaste Latam | Red | Reciclaje de RAEE | | Red regional de empresas de gestión de RAEE en ALC |
| Consejo Internacional de Transporte Limpio | ICCT | Sociedad civil / ONG | Fomento de la movilidad eléctrica | | |

| Nombre | Acrónimo | Sector | Actividad | Nivel de proceso (ULIB) | Comentarios |
|---|----------|--------|-----------------------------------|-------------------------|-------------|
| Plataforma para la Aceleración de la Coalición de Economía Circular | PACE | Red | Promoción | | |
| Iniciativa para una Movilidad Urbana Transformadora | TUMI | Red | Fomento de la movilidad eléctrica | | |
| Acelerador de despliegue rápido de autobuses de emisiones cero | ZEBRA | Red | Fomento de la movilidad eléctrica | | |

Anexo III. Cuestionario de entrevista (original - español; adaptado para los interlocutores individuales)

| Tema | Subtema | Preguntas |
|---|--------------------------|--|
| <p>Prácticas de gestión al final de la vida útil</p> | <p>Reciclaje</p> | <p>¿Qué tipo de proceso de reciclaje se aplica en la instalación?</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Qué etapas tienen lugar (<i>pretratamiento / tratamiento</i>)? <ol style="list-style-type: none"> 1.1 ¿Qué tipo de pilas se reciclan en la instalación? ¿Cuál es el tipo más común? 2. ¿Se procesa en la instalación un número significativo de baterías procedentes de vehículos eléctricos o de almacenamiento de energías renovables? <ol style="list-style-type: none"> 2.1 ¿Cuál es su capacidad de procesamiento actual? ¿Existen planes para mejorar o ampliar la instalación? 3. ¿Existe demanda suficiente para la creación de más instalaciones de reciclaje de baterías de litio en la región en los próximos años? 4. ¿Los materiales reciclados se venden localmente o se exportan? Si se exportan, ¿a dónde? 5. ¿Existen más instalaciones de reciclaje de baterías de litio en el país? |
| <p>Prácticas de gestión al final de la vida útil</p> | <p>Reaprovechamiento</p> | <ol style="list-style-type: none"> 6. ¿Existen otras iniciativas en la región (MX, CO, CL, CR) para la reutilización o reaprovechamiento de las baterías de litio? <ol style="list-style-type: none"> 6.1 En caso afirmativo: ¿Qué reutilización/reaprovechamiento se lleva a cabo? (¿Qué baterías se reutilizan y para qué aplicación?) 6.2 ¿Qué escala/tamaño tienen estas iniciativas (piloto/empresa establecida, etc.)? 6.3 ¿Podría facilitarnos un contacto con la iniciativa? |

| Tema | Subtema | Preguntas |
|---|--|--|
| Prácticas de gestión al final de la vida útil | Otros | 7. ¿Qué ocurre con las baterías que no se reciclan / reutilizan? (Eliminación inadecuada, exportación, desconocimiento, etc.) |
| Marco regulador | Estado de aplicación y eficacia de las normativas nacionales y los sistemas de REP para baterías | 8. ¿Cuál es el marco normativo actual para la gestión de las baterías recargables (reciclaje + reutilización) en el país? <ul style="list-style-type: none"> - REP para baterías - objetivos de recolección/reciclaje existentes - requisitos de seguridad para la reutilización, etc. 8.1 ¿Qué retos de implementación (más allá del marco regulatorio) obstaculizan actualmente la implementación de negocios de reciclaje / reutilización (mejores prácticas)? |
| Condiciones favorables y requisitos de inversión | | 9. ¿Qué le falta al actual marco normativo de la región para promover la implantación de las mejores prácticas de reutilización y reciclaje de baterías de litio? |
| Otros contactos | | 10. ¿Tiene contactos (para el resto de nuestras entrevistas) que nos pueda recomendar? |

Anexo IV. Metodología y enfoque para la elaboración de las perspectivas regionales de ULIB

Se realizó una evaluación de las cantidades de baterías de iones de litio (ULIB) que llegarán al final de su vida útil (EoL) recopilando cifras pasadas y proyectadas que reflejan el comportamiento de los sectores clave seleccionados para las estimaciones: energía solar fotovoltaica, energía eólica y vehículos eléctricos (EV). En el caso de los valores proyectados, se les asignó un límite inferior y superior para tener en cuenta la incertidumbre y, a continuación, se convirtieron en capacidad y masa de batería (en toneladas) en función de la densidad energética de un tipo específico de batería.

1. Estimación del comportamiento de sectores clave asociados a la generación de baterías

Se seleccionaron tres sectores clave como impulsores de la demanda de baterías de gran tamaño (energía solar fotovoltaica, energía eólica y vehículos eléctricos). Los datos históricos de estos sectores se obtuvieron de distintas fuentes, como la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), la Agencia Internacional de la Energía (AIE) y la plataforma de radar E-bus (IEA 2022b; IRENA 2022a; C40 Cities; P4G; ICCT 2023) y se recolectaron para toda la región.

► Energías renovables

El enfoque adoptado para estimar los datos correspondientes al periodo 2023-2050 para las aplicaciones de las energías renovables varió en función de la aplicación. Se utilizaron datos de fuentes como la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) y la Cooperación Económica Asia-Pacífico (APEC) para los años 2030, 2040 y 2050 junto con datos históricos para crear una regresión polinómica.

Esta regresión se utilizó después para calcular el crecimiento anual de la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica y eólica. Para tener en cuenta la incertidumbre asociada a estos valores, se proporcionaron límites inferiores y superiores para los valores basados en diferentes escenarios (IRENA 2022b; APERC and The Institute of Energy Economics, Japan 2019) En concreto, los escenarios desarrollados por IRENA en el informe Perspectivas de las energías renovables en el mundo, el Escenario de energía planificada (PES) y el Escenario de transformación de la energía (TES).

A continuación se presentan las ecuaciones polinómicas que describen el crecimiento anual de la capacidad instalada de energía solar y eólica; debido a la sensibilidad de la ecuación, es necesario utilizar un alto número de decimales para obtener valores precisos.

- Capacidad instalada de energía solar - límite inferior
 $y = -4,9299930363E+00x^3 + 3,0061640354E+04x^2 - 6,1095379690E+07x + 4,1384184896E+10$
- Capacidad instalada de energía solar - límite superior
 $y = -8,2115686604E+00x^3 + 5,0121581109E+04x^2 - 1,0196527137E+08x + 6,9136871505E+10$
- Capacidad instalada de energía eólica - límite inferior
 $y = -2,5074478249E+00x^3 + 1,5267081488E+04x^2 - 3,0980274555E+07x + 2,0951798080E+10$
- Capacidad instalada de energía eólica - límite superior
 $y = -4,4576172250E+00x^3 + 2,7162001001E+04x^2 - 5,5162402633E+07x + 3,7337760666E+10$

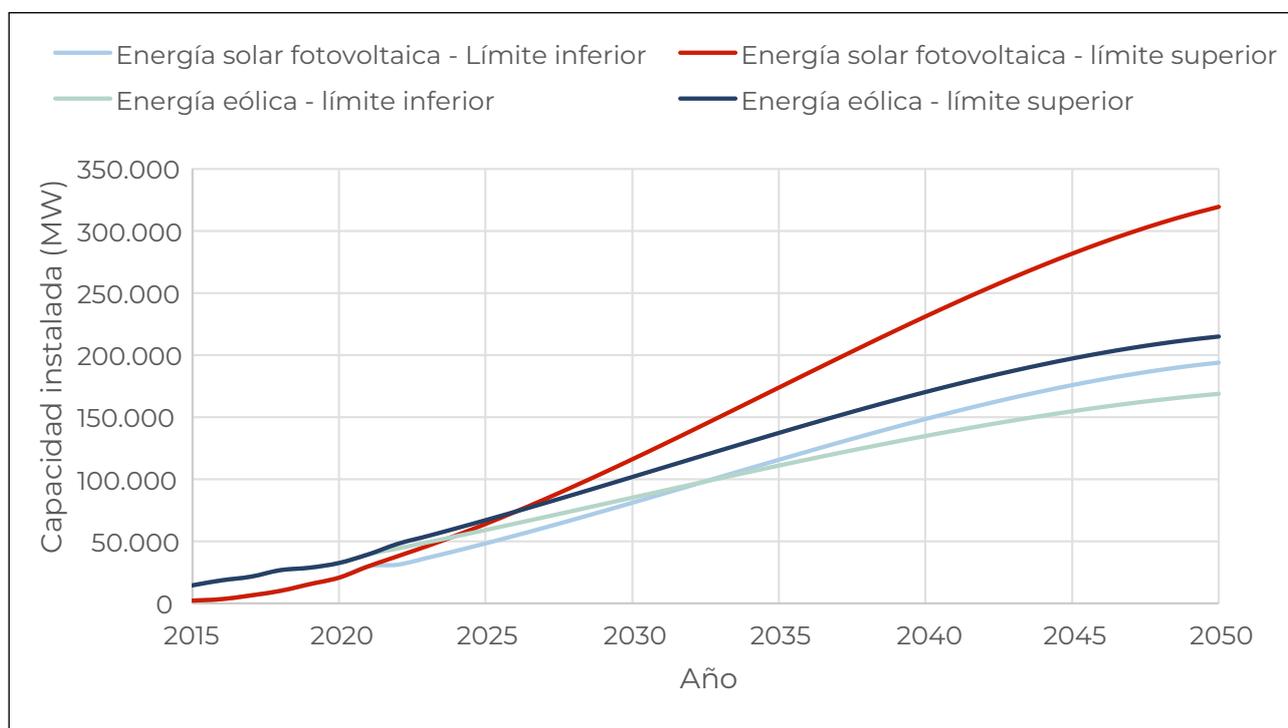
Los valores de capacidad instalada resultantes se presentan a continuación proporcionando la capacidad instalada estimada hasta 2050 para la eólica y la solar fotovoltaica, considerando los límites inferior y superior.

Capacidad instalada estimada de energía solar fotovoltaica y eólica en la región de ALC

| Año | 2030 | 2040 | 2050 |
|---|---------|---------|---------|
| Capacidad solar fotovoltaica instalada (MW) - límite inferior | 87.700 | 143.000 | 195.300 |
| Capacidad solar fotovoltaica instalada (MW) - límite superior | 126.300 | 224.300 | 321.000 |
| Capacidad instalada de energía eólica (MW) - límite inferior | 90.700 | 131.000 | 169.700 |
| Capacidad instalada de energía eólica (MW) - límite superior | 111.300 | 164.300 | 216.300 |

Fuente: Elaboración propia

Capacidad instalada estimada de energía solar fotovoltaica y eólica en la región de ALC



Fuente: Elaboración propia

► Vehículos eléctricos

En el caso de los vehículos eléctricos, los valores estimados se dividieron en dos sectores: vehículos ligeros y autobuses eléctricos. Los vehículos ligeros incluyen los vehículos eléctricos de batería (BEV) y los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV). El enfoque para estimar los comportamientos sectoriales fue similar al implementado para las energías renovables, utilizando datos históricos y datos previstos disponibles para estimar el crecimiento anual. En este caso, las ventas de EV ligeros en toda la región para 2050 se prevén en 45 millones según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP 2016). La investigación llevada a cabo muestra que en el 2021 había aproximadamente 33.300 vehículos eléctricos en la región

El crecimiento anual de las ventas de EV ligeros se estimó mediante un método que combina una regresión de los datos de referencia con una ecuación de previsión que utiliza una función de curva en S³⁵, este método se diseñó específicamente para estimar la adopción de EV, ya que considera tanto la regresión de los datos históricos como el enfoque de la función de curva en S, que prevé la adopción de tecnologías que son nuevas en el mercado, como es el caso de los vehículos eléctricos (Islamovic and Lind). A continuación se presenta la forma general de la ecuación, junto con los parámetros clave que conlleva:

$$FC(t) = ((T_f - t) / (T_f - 2017))^5 * FC_{pol}(t) + (1 - ((T_f - t) / (T_f - 2017))^5) * Sales_{tot} / (1 + e^{-a(t - T_0)})$$

³⁵ Una curva en forma de S (o curva de adopción) representa la tasa acumulativa a la que una población adopta un producto, servicio o tecnología a lo largo del tiempo.



Dónde:

- $FC(t)$ = valor previsto de un determinado año t
- T_f = último año (2050)
- t = año de previsión concreto (es decir, 2022-2050)
- 2017: el primer año de datos históricos registrados
- $FC_{pol}(t)$ = la ecuación de la línea de tendencia de la función polinómica de la serie temporal obtenida a partir de los datos históricos de 2017-2021 $y = 5,42222222222E+02x^3 - 3,2817713452E+06x^2 + 6,6209167444E+09x - 4,4525287943E+12$
- $Ventas_{tot}$ = Ventas previstas para el último año (2050) - 45 millones supuestos
- α = el aumento de las ventas cuando se alcanza el 50% de las ventas totales, lo que equivale al gradiente de la función curva en S .
- T_0 = El año en que las ventas alcanzan el 50% del valor de $Ventas_{tot}$.
- Esta ecuación requiere asumir el comportamiento de dos parámetros clave, a y T_0 .
- α representa el aumento de las ventas cuando se alcanza el 50% de las ventas totales y
- T_0 es el año en que las ventas alcanzan el 50% del valor total,

Se asumieron distintos valores para estos parámetros a fin de representar el límite superior e inferior de los valores estimados que se presentan en el cuadro siguiente.

Parámetros utilizados para definir el límite inferior y superior de la estimación del número de EV

| Límite | T_0 | a |
|----------|-------|------|
| Inferior | 2042 | 0.29 |
| Superior | 2040 | 0.33 |

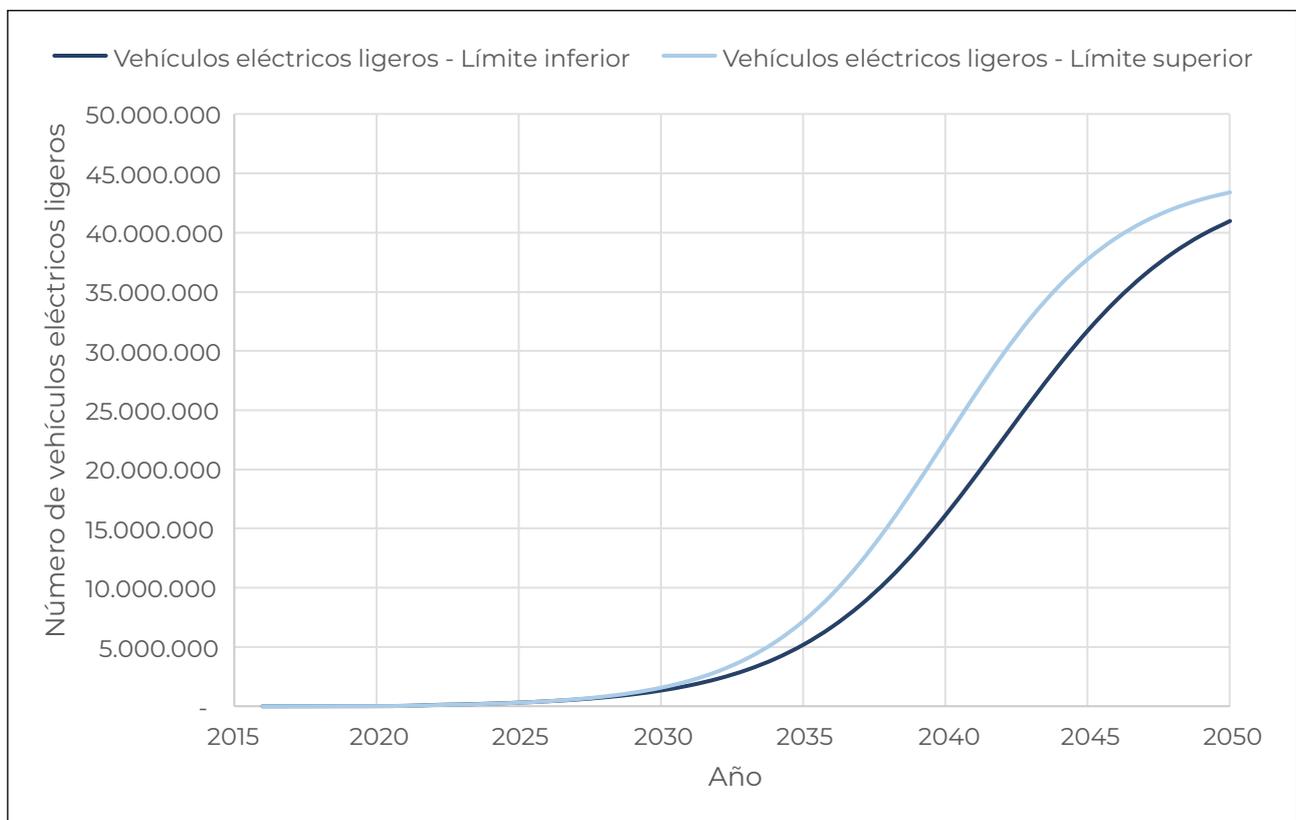
Fuente: Elaboración propia

La siguiente figura muestra el límite superior e inferior del número estimado de EV ligeros en el mercado de ALC.

En el caso de los autobuses eléctricos, debido a la falta de información consolidada a nivel regional, los valores se estimaron asumiendo diferentes tasas de crecimiento anual compuesto (*compound annual growth rates - CAGR*) basadas en la información disponible sobre el mercado y en los objetivos disponibles por país para la introducción de EV en la flota de transporte público (Mordor Intelligence 2023).

- El límite inferior supone una CAGR de los autobuses eléctricos en la región del 15% en el periodo 2022-2028, basándose en la CAGR prevista para la región en el periodo 2018-2028. (Mordor Intelligence 2023). El crecimiento anual se debe principalmente a que Colombia y Chile, los líderes regionales en la introducción de autobuses eléctricos, alcanzarán sus objetivos nacionales (véanse los capítulos 4.2.1 y 4.2.3). Sin embargo, una vez alcanzados estos objetivos, la CAGR disminuye hasta el 10% en el periodo 2028-2040, y hasta el 5% en el periodo 2040-2050. Suponiendo que después de que los líderes del mercado alcancen sus objetivos el crecimiento anual disminuirá y será impulsado por otros países, como México, y para 2040, cuando la mayoría de los países hayan alcanzado sus objetivos el crecimiento disminuirá aún más.
- El límite superior supone que la CAGR del 15% dura más (hasta el año 2037), ya que otros países modifican sus objetivos hacia una introducción más ambiciosa de los autobuses eléctricos, seguida de una reducción más pronunciada hacia una CAGR del 5% en el periodo 2037-2050.

Estimación del número de EV ligeros en la región ALC



Fuente: Elaboración propia

2. Estimación de la masa de baterías de los sectores clave

Después de estimar el comportamiento de los tres sectores principales durante el periodo 2022-2050, se calculó el cambio anual en cada uno de los sectores clave. Este cálculo se basó en la nueva capacidad instalada de energía solar fotovoltaica y eólica añadida anualmente y en el número de nuevos vehículos eléctricos introducidos en el mercado. A continuación, estos datos se convirtieron en las capacidades respectivas de las baterías y, en función del tipo de batería (química), se convirtieron en cantidades expresadas en masa de baterías (en toneladas).

► Masa de batería a partir de energía solar fotovoltaica

Para convertir la nueva capacidad instalada solar fotovoltaica proyectada en necesidades de almacenamiento de LIB, se asumió que las baterías se utilizarán principalmente como almacenamiento a escala de la red, proporcionando varios servicios al sistema, incluyendo balance a corto plazo, reservas operativas y servicios auxiliares para la estabilidad de la red. (IEA 2022a).

Como siguiente paso, se calculó la proporción entre la nueva capacidad fotovoltaica instalada en todo el mundo y el almacenamiento adicional de LIB instalado en la red (IEA 2022a; IRENA 2022a). Esta tasa dio como resultado aproximadamente 0,02395 megavatios (MW) de almacenamiento en la red LIB por MW de capacidad solar añadida en todo el mundo, incluido un factor del 90 % para tener en cuenta la parte del almacenamiento de energía añadido recientemente que corresponde a las baterías de litio a partir de 2018 (excluido el almacenamiento hidroeléctrico). (IEA 2020) A continuación, se supuso que esta tasa se mantendría constante hasta 2050.

A continuación, los MW totales de almacenamiento en batería³⁶, expresados en términos de tamaño del sistema se convirtieron en megavatios-hora (MWh) de capacidad de almacenamiento en batería³⁷ utilizando una relación de 4 MWh de capacidad de batería por MW de tamaño del sistema de baterías para el almacenamiento en batería a escala de servicios públicos (Lazard 2018).

A continuación, el almacenamiento de la batería en MWh se convirtió en masa utilizando una densidad energética de 180 Wh/Kg, asumida como densidad media para las baterías LFP (Battery University 2010).

³⁶ Potencia nominal del sistema (es decir, tamaño del sistema)

³⁷ Contenido energético de una sola batería al 100% de carga

► Masa de batería a partir de energía eólica

Los volúmenes de LIB asociados a la energía eólica se estimaron utilizando dos enfoques diferentes, ya que las baterías de litio se utilizan con dos fines, uno de ellos es el almacenamiento a escala de red, asociado a la prestación de servicios generales del sistema a la red, como es el caso de la energía solar fotovoltaica, este se estimó usando la proporción global entre la nueva capacidad instalada de energía eólica a nivel mundial y la nueva capacidad de almacenamiento asociada a esta tecnología, asumiendo que este rango también se mantendrá en América Latina.

Sin embargo, las baterías también se emplean a nivel de turbina para almacenar el exceso de energía generado por la turbina, evitar sobrecargas y mantener las turbinas operando dentro de un rango óptimo establecido, la proporción entre requerimientos de almacenamiento con baterías por cada nuevo MW de energía eólica instalado se obtuvieron de un fabricante de baterías (Tycorun Energy 2023).

Para los volúmenes de baterías asociados al almacenamiento a escala de red de las nuevas instalaciones de energía eólica, se utilizó el mismo enfoque que para las estimaciones de energía solar fotovoltaica, con una proporción de 0,0036 MW de almacenamiento LIB necesarios por cada MW de capacidad adicional de energía eólica. A continuación, el almacenamiento de la batería en MWh se convirtió en masa utilizando una densidad energética de 180 Wh/Kg, asumida como densidad media para las baterías LFP (IEA 2020; Battery University 2010).

Para la masa de la batería asociada al funcionamiento de la turbina, la capacidad instalada de energía eólica se convirtió

directamente en masa de la batería, con una relación de 12,5 Kg de masa LIB requerida por cada MW de capacidad de energía eólica instalada para las baterías LFP, según lo proporcionado por un fabricante de baterías (Tycorun Energy 2022).

► Masa de batería a partir de vehículos eléctricos

La estimación de la masa de LIB se dividió en estimaciones para vehículos ligeros y estimaciones para autobuses eléctricos. En el caso de los vehículos ligeros, se llevó a cabo asumiendo que las cuotas de mercado de los vehículos eléctricos de batería (BEV) y los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV) permanecerán constantes hasta 2050 en los mismos valores que tenían durante el periodo 2016-2021, siendo aproximadamente un 43% de BEV y un 57% de PHEV (IEA 2022b).

Tras estimar el número de EV ligeros por tecnología, se multiplicó el número de vehículos por la capacidad media de las baterías de cada tipo de vehículo, 43 kWh para los BEV y 10,6 kWh para los PHEV. (Statista 2023). A continuación, la capacidad de la batería se dividió por una densidad energética de 215 Wh/Kg supuesta para los EV, basada en un valor medio para las baterías NMC y NCA (ArenaEV 2022).

En el caso de los autobuses eléctricos, se partió de la base de que cada autobús requiere una batería de 480 kWh de capacidad (utilizada para un autobús eléctrico de 12 m), obtenida de un fabricante (MAN Truck & Bus 2023). A continuación, la capacidad se dividió por una densidad energética de 180 Wh/Kg.

3. Estimación de las LIB que entran al mercado como baterías de reemplazo

Tras estimar la masa de nuevas baterías de litio que entran en el mercado regional cada año, se calcularon los volúmenes de baterías que llegan al final de su vida útil (EoL) asumiendo los tiempos de vida de las baterías de litio para las diferentes aplicaciones.

Además de convertir los datos de los sectores clave en masa de baterías y estimar la masa de baterías que llega a la EoL cada año, es necesario considerar la sustitución de estas baterías. Esto implica asumir la frecuencia de sustitución de las ULIB para las aplicaciones clave, como se muestra en la siguiente tabla:

Vida útil prevista y número de sustituciones de la LIB utilizada en sectores clave

| Tipo de aplicación de la batería | Duración de la batería antes de sustituirla | Número de sustituciones durante la vida útil de la aplicación | Duración total de la aplicación |
|---------------------------------------|---|---|---------------------------------|
| Almacenamiento de energías renovables | 8 años | 2 | 24 años |
| Vehículos eléctricos (EV) | 10 años ³⁸ | 1 | 20 años |

Fuente: Elaboración propia

A modo de ejemplo, la masa de LIB que entre en el mercado regional para aplicaciones de EV en 2023 se utilizará durante 10 años, hasta 2033, cuando esa masa de baterías alcanzará su EoL, y una masa de baterías equivalente entrará en el mercado para sustituir a las baterías de esos EV, estas baterías, a su vez, alcanzarán su EoL en 2043, después de lo cual se supone que el EV se retirará de la circulación y no se requerirá ninguna otra sustitución de EV.

Una vez que se ha tenido en cuenta la vida útil de la batería y el número de sustituciones, es posible estimar la masa de la batería que alcanza el fin de su vida cada año, así como los volúmenes de material acumulados para cada año. La masa de baterías (en toneladas) que alcanza el fin de su vida cada año en el periodo 2024-2050, suponiendo que no se produzca ninguna reutilización de las ULIB, constituyen los datos de del caso base para las estimaciones y el análisis de escenarios.

³⁸ La vida útil de 10 años se asumió considerando el periodo típico de garantía ofrecido por fabricantes de vehículos eléctricos (8-10 años) y para tener en cuenta las baterías de vehículos eléctricos y vehículos eléctricos híbridos (BEV y PHEV por sus siglas en inglés), debido a que las baterías de vehículos híbridos tienen una vida más corta.

A continuación, se desarrollaron tres escenarios diferentes, cada uno con distintos índices de recolección, reciclaje y reúso de baterías. Esto permitió estimar los volúmenes potenciales de baterías disponibles para aplicaciones de segunda vida (reutilización), así como la masa potencial de material disponible para el reciclaje de baterías.

4. Formulación de escenarios

Tras obtener los datos de referencia, se formularon tres escenarios diferentes para proporcionar distintas estimaciones de la masa de ULIB recolectada, disponible para reciclaje y disponible para reutilización. Para formular los escenarios se partió de los tres parámetros siguientes:

- Tasa de recolección de ULIB: El porcentaje de la **masa total de ULIB** que se recogerá cada año y estará disponible para operaciones de reciclaje y aplicaciones de segunda vida.
- Tasa de reciclaje de la ULIB: El porcentaje de la masa **ULIB recolectada** que estará disponible para reciclaje cada año.
- Tasa de reutilización de la ULIB: El porcentaje de la **masa ULIB recolectada** que estará disponible para aplicaciones de segunda vida (reúso) cada año.

Se ha supuesto que estos parámetros permanecen constantes durante todo el periodo 2024-2050.

Suponiendo valores para los tres parámetros, se formularon tres escenarios y se estimó la masa de baterías recolectada, disponible para reciclaje y disponible para reutilización para cada escenario. La tabla siguiente ofrece una visión general de los supuestos para cada escenario.

Parámetros asumidos para la definición de escenarios

| Escenario | Tasa de recolección (%) del total de ULIB EoL | Porcentaje de reciclaje (%) de las EoL ULIB recolectadas | Tasa de reúso (%) del total de EoL ULIB recolectadas |
|--------------------|---|--|--|
| Escenario 1 | 10% | 10% | 0% |
| Escenario 2 | 50% | 40% | 20% |
| Escenario 3 | 90% | 42% | 44% |

Fuente: Elaboración propia

Los tres escenarios se formularon para ofrecer un conjunto más amplio de estimaciones:

- Escenario 1: estimación de una tasa de recolección inferior, una tasa de reciclaje baja y ninguna aplicación de reuso de baterías
- Escenario 2 con una tasa de recolección intermedia entre los escenarios 1 y 3, considerando tanto el reciclaje como el reuso de las ULIB, con una mayor masa de baterías sometidas a reciclaje que a reuso.
- Escenario 3 con un mayor índice de recolección y una mayor masa de pilas destinadas a aplicaciones de reuso y reciclaje.

5. Estimación del contenido de metal en las ULIB disponibles para reciclaje

Una vez estimada la masa de baterías que llega al final de su vida, se utilizaron los porcentajes de baterías recolectadas y disponibles para reciclar para estimar los volúmenes de baterías que estarían disponibles para reciclar en cada escenario.

La masa de baterías disponible para el reciclaje se obtiene multiplicando la masa de las baterías (en toneladas) y los porcentajes supuestos de recolección y reciclaje de baterías.

Después, conociendo la masa de batería disponible para el reciclaje, es posible estimar el contenido de metales de las baterías asumiendo porcentajes de contenido de metal (según las diferentes químicas de las baterías) y las eficiencias potenciales de reciclaje del proceso de reciclaje. Sin embargo, **estos valores reflejan el contenido de metales potencialmente recuperables en la ULIB, y no los materiales derivados directamente del proceso de reciclaje**. Deberían tenerse en cuenta consideraciones adicionales, como el tipo de método de reciclaje y la viabilidad económica del proceso.

La siguiente tabla muestra los porcentajes asumidos sobre el contenido de metal (en baterías LFP y NMC) y las eficiencias de recuperación de material del proceso de reciclaje.

Contenido de metal en las celdas de ULIB y eficiencia de la recuperación de material en el proceso de reciclaje

| Metal | Contenido en celdas de batería LFP | Contenido en celdas de batería NMC | Eficiencia de la recuperación de materiales |
|-------|------------------------------------|------------------------------------|---|
| Al | 4% | 3% | 100% |
| Cu | 8% | 7% | 100% |
| Co | 0% | 6% | 95% |
| Ni | 0% | 4% | 95% |
| Li | 2% | 2% | 70% |

Fuente: (Weyhe and Yang 2018; Zheng et al. 2018)

6. Estimación de las aplicaciones de reúso ULIB

Una vez calculadas las toneladas anuales de ULIB disponibles para su reutilización, se asumió que estas baterías tendrán una vida útil de diez años, basándose en la vida útil típica de las aplicaciones de baterías de segunda mano (NITI Aayog and Green Growth Equity Fund Technical Cooperation Facility 2022). Tras este periodo, estas baterías alcanzarán su EoL.

Para tener en cuenta las aplicaciones de reúso de baterías en las estimaciones anuales de los escenarios 2 y 3, la masa de baterías disponible para aplicaciones de segunda vida cada año se restó de la masa anual de baterías que alcanzan su EoL en el caso de referencia, lo que da como resultado menores volúmenes de baterías que alcanzan su EoL cada año y refleja la reducción de la demanda de baterías nuevas resultante de las aplicaciones de reúso.

El número anual de baterías reusadas (procedentes de aplicaciones de segunda vida) que alcanzan el EoL se añadió entonces al incluido para tener en cuenta el EoL de las baterías reutilizadas en los escenarios 2 y 3, tal y como se representa en la siguiente ecuación:

$$\text{ULIB que alcanza EoL en los escenarios 2 y 3 (toneladas)} = \text{ULIB que alcanza EoL en el caso base} - \text{ULIB disponible para reúso} + \text{ULIB reusada que alcanza EoL}^{39}$$

³⁹ Todos los valores se expresan en toneladas y para cada año del periodo 2024-2050.

