



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Orizaba

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

**“ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA CADENA
DE SUMINISTRO DE LAS BATERÍAS DE IONES
DE LITIO”**

**PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

PRESENTA

IQ. Franklin López Lezama

DIRECTOR DE TESIS

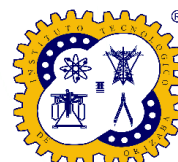
Dr. Alberto Alfonso Aguilar Lasserre

CODIRECTOR DE TESIS

DR. RAMIRO MEZA PALACIOS

ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO

DICIEMBRE 2024





TECNOLOGICO
NACIONAL DE MEXICO



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, **20/noviembre/2024**
Dependencia: **División de Estudios de
Posgrado e Investigación**
Asunto: **Autorización de Impresión**
OPCION: I

C. LOPEZ LEZAMA FRANKLIN
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
INGENIERÍA INDUSTRIAL
PRESENTE

De acuerdo con el reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE LAS BATERÍAS DE IONES DE LITIO"

Comunico a usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



OLE/magh

OG-13-F06



Av. Oriente 9 Núm. 852 Colonia Emiliano Zapata. C.P. 94320 Orizaba Veracruz Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: depi_orizaba@tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx



2024
Felipe Carrillo
PUERTO



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba Veracruz, 29/octubre/2024.

Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. OFELIA LANDETA ESCAMILLA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.:

LOPEZ LEZAMA FRANKLIN

La cual lleva el título de:

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE LAS BATERÍAS DE IONES DE LITIO

y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. ALBERTO ALFONSO AGUILAR LASSERRE

SECRETARIO: DR. RAMIRO MEZA PALACIOS

VOCAL: MII CONSTANTINO G MORAS SANCHEZ

VOCAL SUP.: MII ROBERTO HERNÁNDEZ TORRES

FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

TA-09-F18



Av. Oriente 9 Núm. 852 Colonia Emiliano Zapata. C.P. 94320 Orizaba Veracruz Tel. 01 (272) 1105360
e-mail: depi_orizaba@tecnm.mx www.orizaba.tecnm.mx



2024
Felipe Carrillo
PUERTO

Declaración de originalidad y cesión de derechos

Orizaba, Veracruz, el día 19 del mes de noviembre del año 2024.

El(la) que suscribe

C. Franklin López Lezama

Declaro que esta tesis, que tiene una extensión de (160) cuartillas, ha sido escrita por mí y constituye el registro escrito del trabajo de la tesis titulada

"ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE LAS
BATERÍAS DE IONES DE LITIO"

del programa: "Maestría en ingeniería industrial" bajo la asesoría y dirección del (la) Dr. Alberto Alfonso Aguilar Lasserre y Dr. Ramiro Meza Palacios y no ha sido sometida en ninguna otra institución previamente.

Todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y, en los casos que así lo requieran, cuento con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales. Por lo tanto, me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba.

También declaro que, al presentar esta tesis, cedo los derechos del trabajo al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba para su difusión, con fines académicos y de investigación, bajo las regulaciones propias de la institución y que si existe algún acuerdo de confidencialidad de la información lo haré saber en forma escrita para que se omitan las secciones correspondientes.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: depi_orizaba@tecnm.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

Franklin López Lezama

Nombre y firma

CONTENIDO

CAPITULO I GENERALIDADES	8
1.1 Introducción	8
1. 2 Planteamiento del problema	9
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo general:	10
1.3.2 Objetivos específicos:.....	10
1.4 Hipótesis.....	11
1.5 Justificación.....	11
1.6 Alcance y limitaciones	12
1.7 Conclusiones	13
CAPITULO II MARCO TEÓRICO	14
2.1 Introducción	14
2.2 Cadena de suministro de las baterías de iones de litio	15
2.2.1 Datos técnicos del litio	16
2.2.2 Tipos de yacimientos	17
2.2.2.1 Salmueras.....	17
2.2.2.2 Depósitos pegmatita o depósitos “roca dura”	17
2.2.2.3 Depósitos de arcilla.....	18
2.2.3 Depósitos de litio en México	19
2.2.4 Proyecto sonora Lithium	20
2.2.5 Fabricación de BIL en México	22
2.2.6 Métodos de obtención de litio	23
2.2.6.1 Obtención de litio a partir de salmueras	24
2.2.6.2 Obtención de litio a partir de depósitos de roca dura o pegmatita.....	26
2.2.7 Impactos de la minería del litio	27
2.2.8 ¿Se puede explotar el litio con métodos de menor impacto hídrico?	28
2.2.9 Mercado del litio.....	28
2.2.10 Producción de baterías de litio.....	30
2.2.11 Componentes y funcionamiento	31
2.2.12 Batería de litio, níquel, manganeso y óxido de cobalto (NMC)	32
2.2.13 Batería de litio, níquel, cobalto, óxido de aluminio (nca)	32
2.2.14 Composición general de los sistemas de baterías	33
2.2.15 Regulaciones para el reciclaje de baterías en México	35
2.2.16 Participación de vehículos eléctricos en el mercado automotriz 2023.....	36
2.3 Análisis de ciclo de vida	37
2.3.1 Metodología del ACV	39
2.3.2 Análisis de inventario de ciclo de vida	41
2.3.3 Beneficios del ACV.....	41
2.3.4 Selección del método evaluación impactos	42
2.4 Dinámica de sistemas	43
2.4.1 Componentes básicos de un modelo de Dinámica de Sistemas	44

2.4.2 Anylogic System Dynamics	45
2.4.3 Simbología del Software AnyLogic.	46
2.13 Conclusiones	48
CAPITULO III ESTADO DEL ARTE.....	49
3.1 Introducción	49
3.2 Aportaciones basadas en análisis de ciclo de vida.	50
3.3 Aportaciones basadas en la cadena de suministro.....	52
3.5 Conclusiones del estado del arte	54
CAPITULO IV DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	57
4.1 Introducción	57
4.2 Metodología propuesta.....	57
4.2.1 Selección de las baterías de estudio.....	60
4.2.2 Análisis y límites del sistema	61
4.2.3 Definición del objetivo y alcance	65
4.2.4 Definición de la unidad funcional (UF).....	65
4.2.5 Recolección de datos	66
4.2.6 Inventario de ciclo de vida.....	67
4.2.7 Evaluación de impactos ambientales	72
4.2.7.1 Selección de categorías de impacto.	74
4.2.8 Interpretación de resultados.....	75
4.3 Propósito del modelo de simulación en dinámica de sistemas	76
4.4 Variables críticas y límites del modelo	76
4.5 Construcción del diagrama causal.....	78
4.5.1 Modelado en dinámica de sistemas	79
4.6 Implementación del modelo en el software	79
4.7 Extracción de materias primas	81
4.7.1 Submodelo “Crawford Nickel Sulphide Project”	81
4.7.2 Submodelo “Baptiste Nickel Project”	83
4.7.3 Submodelo Turnagain Nickel Project.....	84
4.7.4 Submodelo Sonora Lithium.....	85
4.8 Refinación para la obtención de precursores del material activo del cátodo.	88
4.9 Submodelo para la fabricación del material activo del cátodo.....	91
4.9.1 Sulfato de níquel necesario para producir 1 kg de óxido de NCA	91
4.9.2 Sulfato de cobalto necesario para producir 1 kg de óxido de NCA.....	92
4.9.3 Hidróxido de litio necesario para producir 1 kg de óxido de NCA.....	93
4.9.4 Sulfato de aluminio necesario para 1 kg de óxido de NCA.....	94
4.9.5 Sulfato de níquel necesario para producir 1 kg de óxido de NMC811.....	95
4.9.6 Sulfato de cobalto necesario para producir 1 kg de óxido de NMC811	96
4.9.7 Sulfato de manganeso necesario para producir 1 kg de óxido de NMC811.....	96
4.9.8 Hidróxido de litio necesario para producir 1 kg de óxido de NMC811	97

4.10 Fabricación del cátodo y electrolito	99
4.11 Fabricación de celdas y ensamblaje de baterías	101
4.12 Demanda, producción y capacidad de baterías	103
4.12.1 Capacidad de las baterías.....	104
4.13 Calculo de impactos	105
4.14 Verificación y validación	107
4.15 Conclusiones	107
CAPÍTULO V RESULTADOS	108
5.1 Introducción	108
5.2 Resultados del Análisis de Ciclo de vida	109
5.2.1 Cambio climático, potencial de calentamiento global (GWP1000).	109
5.2.2 Recursos materiales: metales/minerales, potencial excedente de mineral (SPO)..	111
5.2.3 Uso de la tierra, ocupación de tierras agrícolas (LOP)	112
5.2.4 Consumo potencial de agua	113
5.2.5 Potencial de acidificación terrestre (TAP) Kg SO ₂ -Eq	114
5.2.6 Ecotoxicidad terrestre	115
5.3 Resultados del modelo de Dinámica de sistemas.....	116
5.3.1 Escenario 1 - Producción de baterías sin rebasar las reservas de Cobalto.....	116
5.3.2 Escenario 2 - Producción de baterías con incremento lineal en la producción y respetando las reservas de níquel.....	120
5.3.3 Escenario 3 – Aumento de la densidad energética de la batería.....	124
5.4 Conclusiones y discusión de resultados	136
CONCLUSIONES.....	140
BIBLIOGRAFÍA.....	143
Anexo.....	152
Recomendaciones para trabajos futuros.....	158
Productividad.....	159

Índice de tablas

Tabla 1. Reacciones electroquímicas batería litio, níquel, manganeso y óxido de cobalto (NMC).....	32
Tabla 2. Reacciones electroquímicas batería litio, níquel, cobalto, óxido de aluminio (NCA).....	33
Tabla 3. Composición general de un sistema de baterías	34
Tabla 4. Métodos de evaluación de impacto según su enfoque, número de categorías de impacto, aspectos de normalización, ponderación y ámbito de aplicación.	43
Tabla 5. Fases de los modelos de dinámica de sistemas.....	45
Tabla 6. Cuadro concentrado del estado del arte, aportaciones en el ACV.....	55
Tabla 7. Cuadro concentrado del estado del arte, aportaciones en la CS de LIB's	56
Tabla 8. Battery characteristics by common lithium-ion battery chemistries.	61
Tabla 9. Inventario de materiales para la batería NCA	68
Tabla 10. Inventario de materiales para la batería NMC 811	69
Tabla 11. Factores de emisión de principales materiales (Sonderegger, 2022).....	70
Tabla 12. Consumo de energía y agua para Batería NCA.....	71
Tabla 13. Consumo de energía y agua para Batería NMC 811	72
Tabla 14. Resumen de las categorías de impacto del punto medio	74
Tabla 15. Reservas y extracción de minerales por proyecto	88
Tabla 16. Contenido total de minerales críticos en las reservas	88
Tabla 17. Comparative table of LCA results	141
Tabla 18. Comparative table of simulation results in system dynamics.....	142
Tabla 19. Inventario de materiales para 1 Kg de Baterías NCA y NMC811	152
Tabla 20. Material flow for a 1 kg of nickel sulfate	153
Tabla 21. Material flow for a 1 kg of graphite	154
Tabla 22. Material flow for a 1 kg of aluminium, wrought alloy	155
Tabla 23. Material flow for a 1 kg of copper collector foil, for Li-ion battery	156
Tabla 24. Material flow for a 1 kg of lithium hydroxide	156
Tabla 25. Material flow for a 1 kg of Cobalt sulfate	157
Tabla 26. Material flow for a 1 kg of lithium hexafluorophosphate	157

Índice de figuras

Figura 1. Cadena de suministro de las baterías de iones de litio Fuente: https://www.mangrovelithium.com/decentralizing-the-lithium-supply-chain/	16
Figura 2. Manifestaciones de Litio en México (Hiturribarria, 2020)	19
Figura 3. Plan del proyecto (Bacanora Minerals Ltd, 2018).....	21
Figura 4. Mayores reservas de Litio en el mundo en millones de toneladas métricas (Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), 2023)	22
Figura 5. Precio mínimo sostenible de la celda LIB modelada (Chung et al., 2016)	23
Figura 6. Obtención de carbonato de litio a partir de salmueras.....	25
Figura 7. Diagrama de flujo simplificado de la producción de Li_2CO_3 a partir de minerales (FUKUDA, 2017).....	27
Figura 8. Oferta/demanda, precio del litio y sus estimaciones (Jamasmie, 2019)	29
Figura 9. Almacenamiento electroquímico (Manrique, 2014).....	31
Figura 10. Ventas globales de BEV y PHEV primer trimestre 2023.....	37
Figura 11. Análisis de ciclo de vida (Romero Rodríguez Blanca Iris, 2003a)	38
Figura 12. Fases y aplicación de un ACV según ISO 14040.	39
Figura 13. Icono de Parámetro.....	46
Figura 14. Icono de Stock.....	46
Figura 15. Icono de flujo.....	47
Figura 16. Icono de Link.....	47
Figura 17. Icono de variable dinámica.....	47
Figura 18. Icono Shadow.....	48
Figura 19. Diagrama de la metodología propuesta	58
Figura 20. Diagrama sistema producto de la minería y producción de metales críticos para la elaboración de LIB's.....	63
Figura 21. Diagrama sistema producto de la manufactura de baterías de iones de litio	64
Figura 22. Límites del sistema de estudio.....	65
Figura 23. Descripción general de las categorías de impacto que se cubren en el método ReCiPe2016 y su relación con las áreas de protección.....	73
Figura 24. Diagrama causal de la cadena de suministro de LIB's.....	78
Figura 25. Resumen de proyectos para sustentar la cadena de suministro en NA.....	80
Figura 26. Submodelo “Crawford Nickel Sulphide Project”	82

Figura 27. Submodelo “Baptiste Nickel Project”	83
Figura 28. Submodelo Turnagain Nickel Project.....	84
Figura 29. Submodelo Sonora Lithium.....	86
Figura 30. Sección de modelo extracción de materiales	87
Figura 31. Submodelo refinación para la obtención precursores del material activo del cátodo.....	90
Figura 32. Submodelo para obtención del material activo del cátodo.	98
Figura 33. Fabricación del cátodo y electrolito.....	101
Figura 34. Fabricación de celdas y ensamblaje de baterías	103
Figura 35. Demanda, producción y capacidad de baterías.....	105
Figura 36. Submodelo para cálculo de impactos ambientales.	107
Figura 37. Potencial de calentamiento global (GWP - CO ₂ -Eq) Baterías NMC y NCA.	110
Figura 38. Comparación de Emisiones de CO ₂ -Eq entre Baterías NCA y NMC811	110
Figura 39. Comparación de Emisiones de CO ₂ -Eq entre minerales críticos de LIB's.....	111
Figura 40. Recursos materiales: metales/minerales, potencial mineral excedente (SOP)	111
Figura 41. Comparación del Uso de suelo (LOP) entre baterías NCA y NMC811	113
Figura 42. Comparación del Potencial de consumo de agua entre baterías	114
Figura 43. Comparación del potencial de acidificación terrestre (TAP)	114
Figura 44. Potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP) kg 1,4-DCB-Eq	115
Figura 45. E1 - Producción de baterías Vs Demanda	117
Figura 46. E1 - Acumulación de reservas de NiSO ₄ y CoSO ₄	117
Figura 47. Impactos ambientales batería NCA	118
Figura 48. Impactos ambientales batería NMC811	119
Figura 49. E2 Producción Vs demanda.....	120
Figura 50. E2 - Acumulación de reservas de NiSO ₄ y CoSO ₄	121
Figura 51. E2 Potencial de calentamiento global (GWP1000) Ton CO ₂ -Eq	122
Figura 52. E2 - Potencial de consumo de agua (WCP) metro cúbico.....	122
Figura 53. E2 - Uso de la tierra, ocupación de tierras agrícolas (LOP) m ² *a cultivo-Eq	122
Figura 54. E2 - Recursos: metales/minerales, potencial mineral excedente (SOP) Ton Cu-Eq	123
Figura 55. E2 - Potencial de acidificación terrestre (TAP) Ton SO ₂ -Eq	123

Figura 56. Reservas de Níquel y Litio	124
Figura 57. Batería NCA 250 Wh/Kg Vs 320 Wh/Kg (parte 1).....	125
Figura 58. Batería NCA 250 Wh/Kg Vs 320 Wh/Kg (parte 2).....	125
Figura 59. Producción Vs demanda	126
Figura 60. Reservas de minerales grado batería	127
Figura 61. Reservas de proyectos mineros.....	127
Figura 62. Mineral extraído y en espera a ser procesado.....	128
Figura 63. Impactos ambientales batería NCA escenario 4	129
Figura 64. Impactos ambientales batería NMC811 escenario 4	130
Figura 65. Producción Vs Demanda	131
Figura 66. Reservas de minerales grado batería E5	132
Figura 67. E5 - Potencial de calentamiento global (GWP1000) Ton CO2-Eq	133
Figura 68. E5 - Potencial de consumo de agua (WCP) metro cúbico.....	133
Figura 69. E5 - Uso de tierra, ocupación de tierras agrícolas (LOP) m2*a cultivo-Eq	134
Figura 70. E5 - Recursos materiales: metales, potencial mineral excedente (SOP) Ton Cu-Eq	135
Figura 71. E5 - Potencial de acidificación terrestre (TAP) Ton SO2-Eq	136
Figura 72. Impacto total de GWP de cada batería (FU = 1 kg) con datos LCI unificados...	137
Figura 73. GHG emissions of per kWh NCM battery production.(Sun et al., 2020)	138

CAPITULO I GENERALIDADES

1.1 Introducción

La cadena de suministro de baterías de iones de litio ha cobrado una relevancia notable en los últimos años, impulsada por la creciente demanda especialmente, en la industria de vehículos eléctricos. Sin embargo, la extracción de los materiales necesarios para su fabricación, así como su producción y transporte, plantean desafíos ambientales significativos. Evaluar la sostenibilidad de esta cadena de suministro es crucial para mitigar dichos impactos y establecer un desarrollo más sostenible en esta industria emergente. Para abordar esta necesidad, resulta apropiado aplicar la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), una herramienta que permite examinar los impactos ambientales a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final (Romero Rodríguez Blanca Iris, 2003b).

El ACV permite no solo identificar y cuantificar los impactos ambientales de cada etapa del proceso, sino también proponer estrategias de mejora para reducir dichos impactos. En el caso de las baterías de litio, el ACV, combinado con un enfoque de dinámica de sistemas, ofrece una perspectiva valiosa para identificar las etapas de la cadena de suministro que generan los mayores impactos ambientales, permitiendo una evaluación integral de su sostenibilidad.

Esta tesis tiene como propósito aplicar la metodología del ACV junto con la dinámica de sistemas a la cadena de suministro de baterías de iones de litio para vehículos eléctricos, con el fin de evaluar su sostenibilidad y cuantificar los impactos ambientales de su producción. Se examinan las distintas etapas del ciclo de vida de estas baterías, desde la extracción de minerales críticos hasta la producción final de baterías, evaluando los impactos asociados en cada fase. Los resultados obtenidos del ACV sirven para construir un modelo de dinámica de sistemas que simule el comportamiento de una cadena de suministro en América del Norte, considerando los recursos disponibles en esta región. A través de esta combinación de ACV y dinámica de sistemas, se busca aportar recomendaciones concretas para mejorar la sostenibilidad de la cadena de suministro de baterías de litio en América del Norte, fomentando un uso más responsable de los recursos y una reducción de los efectos ambientales adversos de esta industria.

1. 2 Planteamiento del problema

En los últimos años el litio se ha catalogado como uno de los minerales de mayor relevancia a nivel mundial, esto debido a su implementación para la elaboración de baterías recargables para diferentes objetos eléctricos móviles como computadoras, teléfonos celulares, sistemas de almacenamiento energético y, por su puesto, en el mercado de vehículos eléctricos por lo que es factible un aumento de la demanda de este recurso (Comisión Chilena del cobre, 2023).

Es precisamente en esta última categoría donde yace su principal motor de demanda. El consumo mundial de litio para vehículos ligeros creció un 46% entre 2014 y 2015 y otro 28% entre 2015 y 2016. su crecimiento en los últimos años ha sido explosivo y se espera que sus ventas anuales sigan incrementándose (Igogo et al., 2019).

Cuando se trata de la cadena de suministro de baterías de litio, LCA es particularmente importante debido a la creciente demanda. La extracción, producción y eliminación de baterías de litio tienen impactos ambientales significativos, incluidas las emisiones de gases de efecto invernadero, etc. De acuerdo a los resultados de (Wu & Zhang, 2017) en comparación con los vehículos de combustión interna a gasolina, los vehículos eléctricos tienen un efecto significativo en la reducción de las emisiones de CO₂. Sin embargo, la contaminación atmosférica correspondiente a SO₂, PM₁₀, NO_x, etc. para un determinado vehículo eléctrico varía sustancialmente en diferentes países debido a la influencia de varios factores (estructura de la energía eléctrica, tasa de pérdidas de la línea, etc.), es por ello que resulta crucial realizar el estudio en zonas geográficas específicas. Al Implementar un análisis del ciclo de vida en conjunto con la dinámica de sistemas para simular la cadena de suministro en América del Norte se pueden identificar áreas de la cadena de suministro que tienen el mayor impacto ambiental y tomar medidas para reducir esos impactos.

Actualmente la cadena de suministro de LIB's en América del norte depende en gran medida de la importación de algunos materiales provenientes de China, sin embargo, los aranceles aplicados a los productos chinos desde el comienzo de la guerra comercial entre Estados Unidos y China han elevado los costos de importación de materiales esenciales para baterías, como cátodos, ánodos y otros componentes específicos. Estos aranceles, que suelen estar entre el 10 % y el 25 %, encarecen el precio final de los materiales de origen chino, afectando la rentabilidad de las empresas que dependen de ellos. Con estas políticas

arancelarias buscan impulsar la producción local y reducir la dependencia de la cadena de suministro asiática, incentivando la inversión en Norteamérica y en países aliados. No obstante, estos aranceles también aumentan los costos en el corto plazo y presentan desafíos logísticos para asegurar una transición eficiente hacia la fabricación de baterías de iones de litio con materiales regionales o no chinos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general:

Implementar la técnica de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para evaluar los impactos ambientales de las baterías de iones de litio de tipo NMC y NCA, y utilizar estos resultados en una simulación de la cadena de suministro mediante Dinámica de Sistemas (SD) que permita visualizar los impactos ambientales por etapa en diferentes escenarios a futuro de la cadena de suministro y analizar la disponibilidad de minerales críticos (Litio, Níquel y Cobalto) en los países miembros del T-MEC.

1.3.2 Objetivos específicos:

1. Realizar un análisis del ciclo de vida (ACV) de las baterías de iones de litio tipo NMC y NCA para identificar y cuantificar los impactos ambientales en cada fase, desde la extracción de materiales hasta su ensamblaje.
2. Comparar los impactos ambientales de las baterías NMC y NCA en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de agua, y generación de residuos, con el fin de determinar cuál presenta un menor impacto ambiental de la cuna a la puerta.
3. Desarrollar una simulación de la cadena de suministro de las LIB's en Dinámica de Sistemas (SD) que permita identificar las etapas del proceso que generan mayores impactos ambientales y proyectar la demanda de recursos en escenarios futuros.
4. Proponer distintos escenarios para visualizar la disponibilidad de recursos en América del norte en distintos escenarios de producción, así como los impactos ambientales generados a través del tiempo.

1.4 Hipótesis

Hipótesis Principal: La implementación del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en combinación con una simulación de cadena de suministro mediante Dinámica de Sistemas (SD) permitirá identificar los impactos ambientales de las baterías de iones de litio tipo NMC y NCA en cada etapa de su ciclo de vida y proyectar dichos impactos en distintos escenarios futuros. A su vez, esta metodología facilitará el análisis de la disponibilidad de minerales críticos (litio, níquel y cobalto) en América del Norte, proporcionando una base para anticipar y mitigar posibles limitaciones en la cadena de suministro dentro de los países miembros del T-MEC.

Hipótesis Secundaria: Los países miembros del T-MEC tienen la capacidad de satisfacer la demanda de minerales críticos para la producción de baterías de iones de litio, siempre que se implementen políticas de gestión sostenible de los recursos.

1.5 Justificación

A medida que aumenta la demanda de baterías de iones de litio con la creciente popularidad de los vehículos eléctricos y el almacenamiento de energía renovable, es esencial evaluar el impacto ambiental de la cadena de suministro de litio. La evaluación del ciclo de vida (LCA) en conjunto con la dinámica de sistemas (SD) son herramientas que puede ayudar a identificar las etapas con mayor generación de impactos ambientales a lo largo de la cadena de suministro, desde la extracción de materias primas hasta la eliminación al final de su vida útil.

La extracción, producción y eliminación de baterías de litio tienen impactos ambientales significativos, incluidas las emisiones de gases de efecto invernadero y daños a la salud humana, según (Boon-Brett, 25 February 2016) la fabricación puede liberar electrolitos orgánicos volátiles nocivos el uso del agua y el uso de la tierra y requiere un alto consumo de energía, lo que genera emisiones de GEI elevadas según (Romare M, 2017). Por ejemplo, la extracción de litio de los depósitos de salmuera a menudo provoca escasez de agua y degradación del suelo. Además, el proceso de fabricación de las baterías de iones de litio genera una cantidad considerable de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que contribuye al cambio climático. (MC., 2012) La eliminación de las baterías usadas también plantea un desafío ambiental importante debido al potencial de fuga de desechos tóxicos.

Con la creciente demanda de vehículos eléctricos y almacenamiento de energía renovable, es imperativo garantizar que la producción y eliminación de estas tecnologías sean sostenibles y ambientalmente responsables. Al realizar un LCA, las empresas pueden identificar áreas de la cadena de suministro que tienen el mayor impacto ambiental y tomar medidas para reducir esos impactos. Por ejemplo, invertir en métodos de extracción más sostenibles.

Es necesario realizar una evaluación del ciclo de vida y llevar los resultados de este análisis a una simulación de la cadena de suministro de litio para comprender el impacto ambiental de las baterías de iones de litio e identificar las áreas de oportunidad para reducir ese impacto. La sostenibilidad ya no es una opción sino un requisito para que las empresas sigan siendo competitivas en el mercado al implementar prácticas sostenibles.

1.6 Alcance y limitaciones

- En este estudio se aplicará la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV) cuyos resultados sentarán las bases para desarrollar un modelo de dinámica de sistemas de la cadena de suministro de baterías de iones de litio, tomando en cuenta los recursos disponibles en los países miembros del T-MEC (México, Estados Unidos y Canadá).
- Se analizarán escenarios en los cuales los países del T-MEC intentan reducir la dependencia de materias primas y componentes provenientes de China. Esto con el fin de evaluar la viabilidad de establecer una cadena de suministro más autónoma.
- La precisión del modelo dependerá en gran medida de la disponibilidad y calidad de los datos sobre reservas de minerales, capacidad de extracción y procesamiento en los países del T-MEC. Las limitaciones en la disponibilidad de datos precisos y actualizados pueden afectar la exactitud de las proyecciones y conclusiones.
- Dado que actualmente una parte significativa de la cadena de suministro global de baterías depende de materias primas y componentes provenientes de China, las simulaciones y escenarios alternativos pueden no reflejar completamente la complejidad y desafíos de reemplazar esta dependencia en el corto plazo.

- Si bien el modelo puede proyectar impactos ambientales a nivel macro, es posible que no capte completamente los impactos ambientales locales específicos de las operaciones mineras y de fabricación en las regiones donde se llevarán a cabo estas actividades.

1.7 Conclusiones

En conclusión, el primer capítulo de esta tesis establece los fundamentos necesarios para explorar la sostenibilidad y los desafíos ambientales asociados con la cadena de suministro de las baterías de iones de litio en América del Norte. A partir de la creciente demanda de estas baterías, impulsada en gran medida por el aumento de la producción de vehículos eléctricos, se presenta un contexto en el que la extracción, procesamiento y distribución de minerales críticos como el litio, cobalto y níquel plantean impactos ambientales significativos. Este escenario demanda una evaluación exhaustiva que permita comprender tanto la disposición de recursos a largo plazo como las consecuencias ambientales de las actividades en cada etapa de la cadena de suministro.

La hipótesis planteada en este estudio sostiene que, mediante la aplicación conjunta del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y la Dinámica de Sistemas (DS), es posible identificar y cuantificar las etapas de la cadena de suministro que generan mayores impactos ambientales y de consumo de recursos a través del tiempo. Esto proporcionará una base sólida para proponer estrategias que mejoren la sostenibilidad de la cadena de suministro, mitigando efectos adversos y optimizando el uso de recursos en América del Norte.

La justificación de este trabajo reside en la necesidad de una metodología que, a través de un enfoque holístico, permita una mejor planificación y toma de decisiones en torno al abastecimiento y consumo de recursos críticos en los países miembros del T-MEC. Al desarrollar un modelo de dinámica de sistemas basado en datos obtenidos del ACV, esta tesis busca no solo visibilizar los impactos ambientales, sino también ofrecer una herramienta de simulación que ayude a prever escenarios futuros y de esta manera se puedan desarrollar estrategias de mejora y políticas adecuadas para la sostenibilidad de la cadena de suministro.

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

El segundo capítulo de esta tesis, dedicado al marco teórico, presenta los fundamentos conceptuales y metodológicos que sustentan el análisis de ciclo de vida (ACV) y la dinámica de sistemas (DS) en el estudio de la sostenibilidad de la cadena de suministro de baterías de iones de litio. La creciente demanda de vehículos eléctricos y la necesidad de cadenas de suministro sostenibles han resaltado la importancia de metodologías que permitan evaluar los impactos ambientales de los procesos involucrados, desde la extracción de minerales hasta la fabricación y disposición final de las baterías. Este capítulo examina en detalle los principios y aplicaciones tanto del ACV como de la DS, así como su integración en un marco que permite la modelación y simulación de la cadena de suministro de baterías de litio.

Primero, se introducen los conceptos y fases del ACV, una herramienta clave para identificar y cuantificar los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto. En el contexto de esta investigación, el ACV se enfoca en los minerales críticos y los procesos asociados con la fabricación de baterías, permitiendo visibilizar las áreas de mayor impacto y los recursos más sensibles. Posteriormente, se exploran los fundamentos de la dinámica de sistemas, una metodología que facilita el modelado de sistemas complejos mediante la representación de interrelaciones entre componentes clave, ayudando a simular la disponibilidad de recursos y el comportamiento de la cadena de suministro bajo distintos escenarios de demanda y producción.

Este capítulo también analiza estudios previos relevantes en los que se ha aplicado el ACV y la DS en la industria de baterías y otros sectores, permitiendo contextualizar el valor y la innovación que aporta esta investigación. Finalmente, se detalla el enfoque metodológico de la integración de estas dos herramientas, con el propósito de construir un modelo robusto para la toma de decisiones estratégicas en la industria de baterías de litio en América del Norte. Este marco teórico proporcionará, así, la base analítica y conceptual necesaria para comprender los resultados obtenidos y proponer mejoras en la sostenibilidad de la cadena de suministro estudiada.

2.2 Cadena de suministro de las baterías de iones de litio

Para comenzar a describir la cadena de suministro de las baterías de iones de litio primeramente resulta esencial mencionar cuales son los minerales clave para las baterías de iones de litio, como el litio, el níquel y el cobalto, los cuales son extraídos de yacimientos en diversas partes del mundo. Estos materiales se obtienen principalmente de minas en América del Sur (para el litio), Australia (litio), República Democrática del Congo (cobalto), y Canadá y Rusia (níquel).

Aunque minerales como el níquel y el manganeso presentan un bajo "índice de agotamiento estático", lo que sugiere una disponibilidad geográfica más diversificada y abundante, esto también indica que la demanda impulsa su extracción continua (Olivetti et al., 2017). Sin embargo, esta situación no es la misma para otros minerales críticos, como el cobalto y el litio. La literatura reciente coincide en que los desafíos de producción de litio no radican en la cantidad total de material disponible, sino en la capacidad de incrementar la producción a un ritmo suficiente para satisfacer la creciente demanda (Kushnir & Sandén, 2012). Examinar únicamente si la oferta puede cubrir la demanda no proporciona una visión completa de este problema de velocidad. Por ejemplo, mientras el consumo de baterías de litio creció un 73 % entre 2010 y 2014, la producción solo aumentó un 28 %, lo que ha provocado un desequilibrio entre el consumo y la producción de este recurso (Narins, 2017).

Por otro lado, la República Democrática del Congo aporta más del 50 % de la producción minera mundial de cobalto, lo que significa que la extracción de este mineral está altamente concentrada en una sola región geográfica. Lo mismo ocurre con la refinación: China es el principal productor mundial de cobalto refinado y el principal proveedor de este mineral para Estados Unidos. Una gran parte de la producción china proviene de minerales y cobalto parcialmente refinado importados desde el Congo. En 2015 y 2016, China fue el mayor consumidor mundial de cobalto, destinando casi el 80 % de su consumo a la industria de baterías recargables (Nansai et al., 2014).

La industria de fabricación de baterías de iones de litio se ha consolidado en Asia, especialmente en China, que representa una parte significativa de la producción global. Si se considera también la producción de Japón y Corea del Sur, estos tres países concentran aproximadamente el 85 % de la capacidad de fabricación de baterías de iones de litio para todas las aplicaciones, desde dispositivos electrónicos hasta vehículos eléctricos. Esta alta

concentración ha hecho que Asia lidere la cadena de suministro global, dominando tanto la producción como el comercio de materiales y componentes de baterías (Sun et al., 2017). Este dominio asiático en la cadena de suministro implica que gran parte de la fabricación y desarrollo tecnológico de las baterías depende de la infraestructura y la innovación de estos países (figura 1).

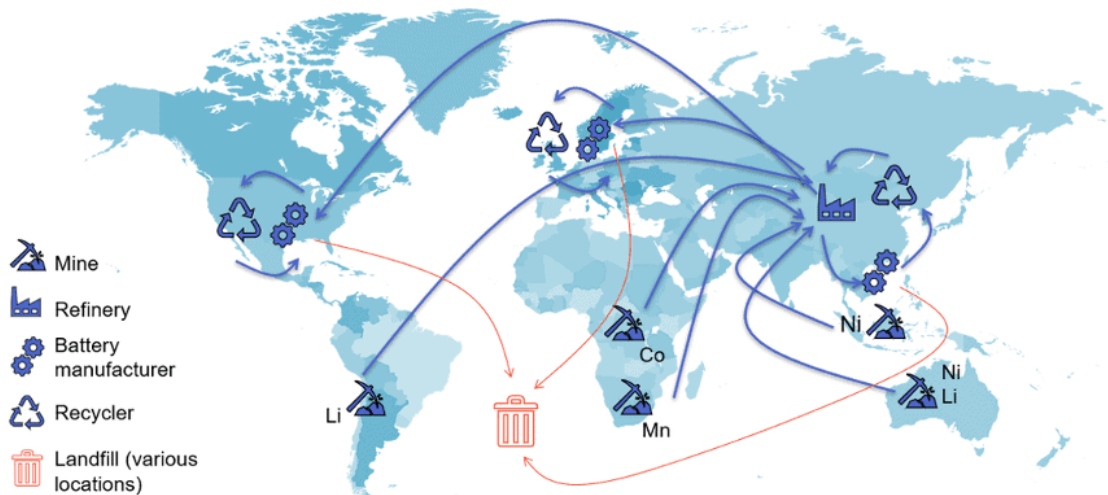


Figura 1. Cadena de suministro de las baterías de iones de litio Fuente: <https://www.mangrovelithium.com/decentralizing-the-lithium-supply-chain/>

2.2.1 Datos técnicos del litio

El litio es un metal alcalino que se halla difundido mayoritariamente en forma de fosfatos y silicatos, debido a su enriquecimiento durante la sedimentación. Se encuentra en minerales como la lepidolita ((AlSi₃O₁₀) K(Li,Al)(O,OH,F), la espodumena (silicato de aluminio y litio), la petalita y la Ambigonita (PO₄LiAlF). También se presenta en el agua de mar, en aguas minerales, en tierras arables y en cenizas de plantas. (Dana Hurlbut, 1959)

Es el metal más ligero de todos, con una densidad de casi la mitad de la del agua, donde puede flotar y hasta reacciona para formar gas de hidrógeno y vapores de hidróxido de litio. Es de color plateado, al igual que los metales alcalinos sodio y potasio, en la naturaleza no se produce en forma libre y se lo encuentra en los compuestos de rocas y fuentes manantiales de aguas naturales. La cantidad de este metal en aguas naturales es variable y depende de los terrenos por donde fluye Es muy corrosivo y se debe manipular con mucho cuidado. Tiene el

calor específico más elevado de todos los elementos sólidos, por lo que es ideal para las transferencias de calor. Su alto potencial electroquímico lo hace especialmente adecuado en las baterías, la cerámica y el vidrio. A su alta conductividad térmica se agrega su baja viscosidad. No es soluble en los hidrocarburos (Manrique, 2014a).

2.2.2 Tipos de yacimientos

El litio se extrae a partir de tres tipos de depósitos: salmueras, pegmatitas y rocas sedimentarias.

2.2.2.1 Salmueras

Salmueras Depósitos de salmuera representan alrededor del 66% de los recursos de litio a nivel mundial y se encuentran principalmente en las salinas de Chile, Argentina, China y el Tíbet. La composición de las salmueras en cuanto a los niveles de contenidos de litio varía considerablemente, cambiando también la presencia de otros elementos como potasio, sodio, calcio, magnesio, hierro, boro, bromo, cloro, nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos, lo cual requiere que cada salmuera sea tratada en forma particular, de acuerdo a su composición.

En general, la extracción de litio a partir de fuentes de salmuera ha demostrado ser más rentable que la producción a partir del mineral de roca dura (pegmatitas). Mientras que la producción de litio de roca dura, una vez dominó el mercado, ahora la mayoría de carbonato de litio que se produce se efectúa partir de salmueras continentales, debido sobre todo al menor costo de producción (Dirección general de desarrollo minero, 2018).

2.2.2.2 Depósitos pegmatita o depósitos “roca dura”

Pegmatita es roca ígnea intrusiva de grano grueso formado a partir de magma cristalizado en el interior de la corteza terrestre, la cual puede contener cantidades extraíbles de un número de elementos, incluyendo litio, estaño, tántalo y niobio. Esta forma de depósito representa el 26 por ciento de los recursos mundiales conocidos de litio. Mineral de roca dura

que contiene litio se extrae a través de la explotación de minas a cielo abierto o subterránea, usando las técnicas mineras tradicionales. El mineral es procesado y se concentra usando una variedad de métodos antes de su uso directo o su posterior transformación en compuestos de litio.

El procedimiento para la extracción de litio de pegmatita o mineral de roca dura es caro, lo que significa que dichos depósitos se encuentran en desventaja en comparación con los depósitos de salmuera; sin embargo, la concentración de litio en pegmatitas es considerablemente más alto que en las salmueras, de tal manera que depósitos con valores extremadamente altos de litio pueden todavía ser económicamente viables. La producción de otros recursos, como el estaño y el tantalio, puede ayudar a compensar los costos de procesamiento.

El Litio en pegmatitas se encuentra más comúnmente en el mineral espodumena, pudiendo también estar presente en petalita, lepidolita, ambligonita y eucryptita. Alaska, el norte de Ontario, Quebec, Irlanda y Finlandia son conocidas por sus yacimientos de litio en pegmatitas. Uno de los principales yacimientos con estas características se ubica en Greenbushes, Australia; el cual tiene un recurso estimado de 560,000 toneladas de mineral de litio, con una concentración media de alrededor de 1.6 por ciento (Dirección general de desarrollo minero, 2018).

2.2.2.3 Depósitos de arcilla

En los depósitos de arcilla, el litio forma parte de la estructura cristalina, se encuentra en el mineral esmectita. El tipo más común de esmectita es hectorita ($\text{Na}_3(\text{Mg},\text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$), que es rico en magnesio y litio. Recibe su nombre de un depósito que contiene 0.7 por ciento de litio que se encuentra en Héctor, California. Kings Valley, Nevada alberga otro depósito de hectorita con un estimado de 48.1 millones de ton., como recursos indicados y 42.3 millones de Ton., de recursos inferidos con una ley de 0.27 por ciento de litio. Asimismo, el litio en las arcillas puede resultar también por el enriquecimiento secundario, por efecto del movimiento de aguas termales subterráneas (Dirección general de desarrollo minero, 2018).

2.2.3 Depósitos de litio en México

Los depósitos de litio en México son relativamente abundantes y están distribuidos en diferentes partes del país. Se han identificado depósitos en los estados de Sonora, San Luis Potosí, Coahuila, Chihuahua, Zacatecas y Nuevo León (H, 2018). Así como también México cuenta con depósitos de litio de diferentes tipos, como lo son salmueras, roca y sedimentos. Véase figura 2. Según un informe del Servicio Geológico Mexicano, los depósitos de litio en México se encuentran principalmente en salmueras, que son aguas subterráneas saturadas de sales. Estas salmueras se encuentran en acuíferos salinos en diferentes regiones del país. Además, también hay depósitos de litio en rocas ígneas y sedimentarias, aunque en menor cantidad. La extracción de litio en México se encuentra en una etapa temprana de desarrollo y se espera que se acelere en los próximos años. Empresas internacionales y nacionales han realizado exploraciones y estudios en diferentes regiones del país, y se espera que en los próximos años se realicen inversiones significativas en la extracción y producción de litio en México (Hiturribarria, 2020).

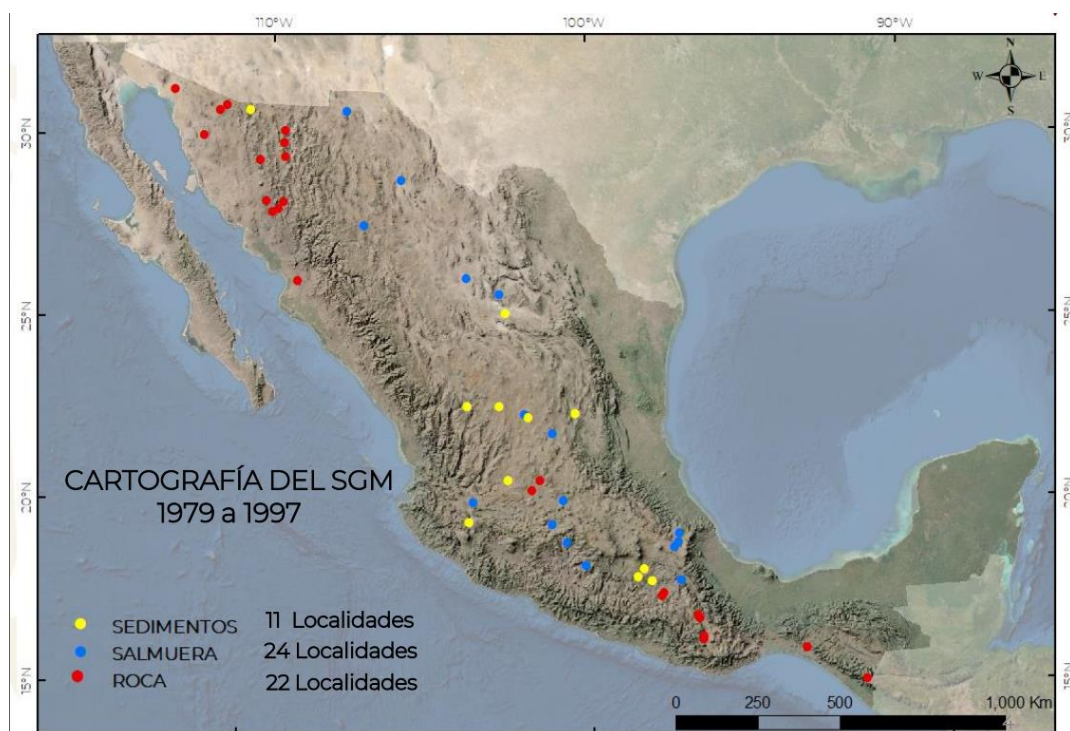


Figura 2. Manifestaciones de Litio en México (Hiturribarria, 2020)

2.2.4 Proyecto sonora Lithium

El Proyecto Sonora Lithium es una iniciativa de gran envergadura que se centra en la explotación de litio en el estado de Sonora, México, específicamente a 11 km al sur de la localidad de Bacadéhuachi. Este proyecto es llevado a cabo por Bacanora Lithium, una empresa minera con sede en el Reino Unido.

El yacimiento en Sonora cuenta con unas 4.5 millones de toneladas de carbonato de litio. Se estima que la producción inicial rondará las 17,500 toneladas anuales de carbonato de litio con una única línea de producción. En el año 5, se pone en marcha una segunda línea de planta y la capacidad total de producción de Li_2CO_3 aumenta a un mínimo de 35,000 toneladas por año. El cronograma de producción se muestra para 19 años y existe reserva para extenderlo más allá de ese período de tiempo (Bacanora Minerals Ltd, 2018).

El proyecto Sonora Lithium se considera de gran importancia para la economía mexicana, ya que se espera que genere empleo, desarrollo regional e ingresos fiscales adicionales. De acuerdo a la figura 4 tan solo con las reservas de esta región México se estaría situando en el top 7 de los países con mayores reservas de litio en el mundo teniendo en cuenta que aún se desconocen los datos acerca de las demás reservas en el país. En la figura 3 se muestra el plan general del proyecto.

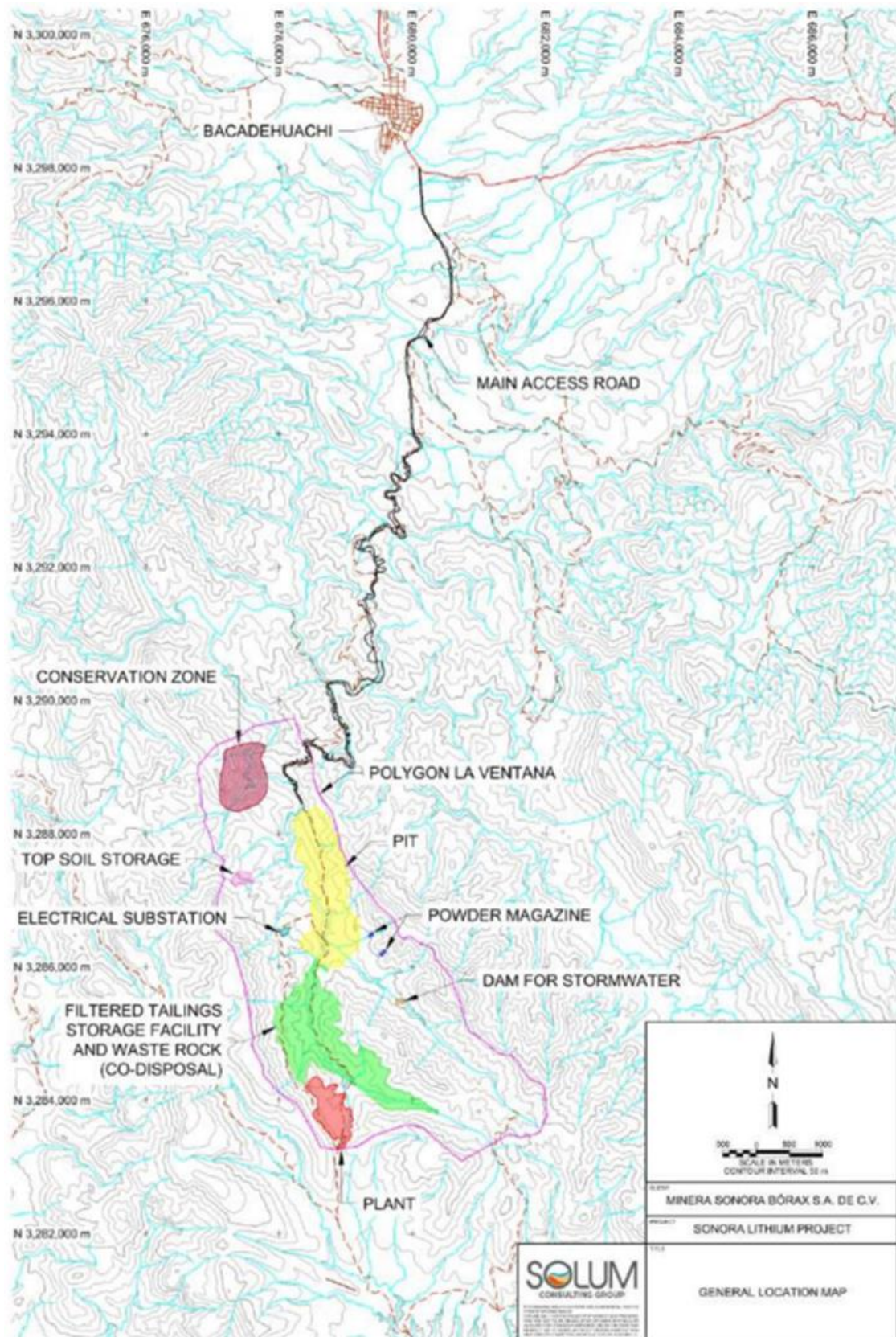


Figura 3. Plan del proyecto (Bacanora Minerals Ltd, 2018)

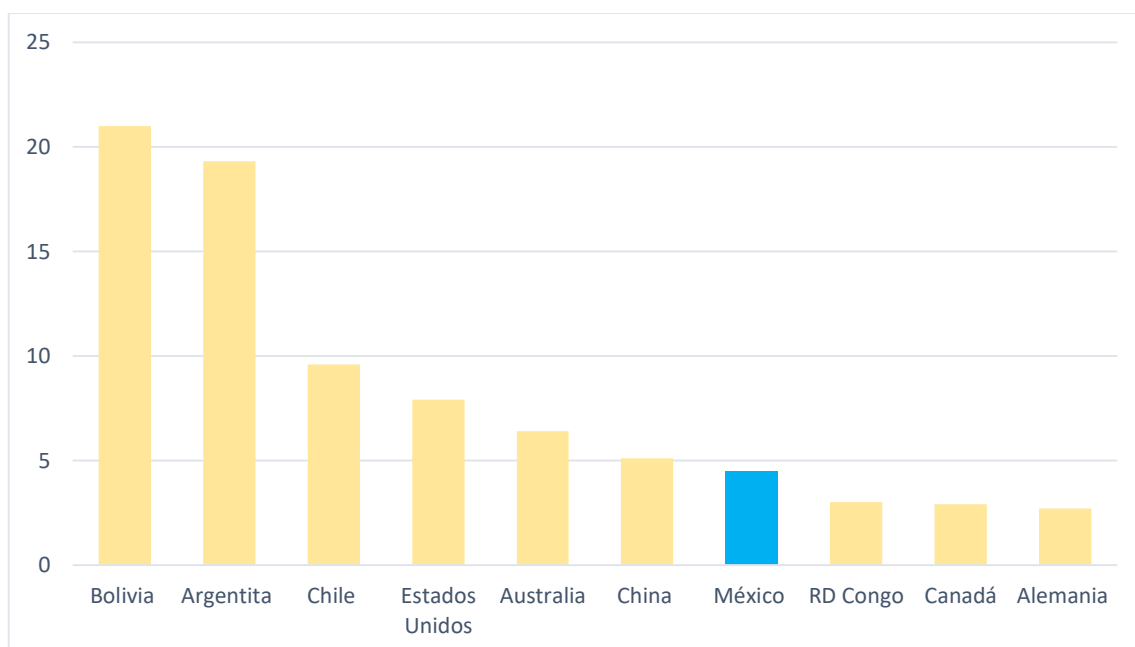


Figura 4. Mayores reservas de Litio en el mundo en millones de toneladas métricas (Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), 2023)

2.2.5 Fabricación de BIL en México

En el momento de la redacción de este estudio, no se ha identificado ninguna producción significativa de Baterías de Iones de Litio (BIL) en México. Sin embargo, (Chung et al., 2016) señala a México como un caso de estudio relevante debido a su proximidad geográfica a los mercados estadounidenses y a sus tasas laborales, que son inferiores a las de Estados Unidos y aproximadamente equivalentes a las de China. Este caso de estudio tiene como objetivo representar no solo la competitividad potencial de la producción en México, sino también las posibilidades si algún país pudiera replicar la combinación de ventajas (bajos costos laborales y de capital) modeladas en este escenario.

A pesar de que la estructura general de costos modelada para una posible planta LIB en México es ligeramente superior a la de los escenarios de Nivel 1 de China y Corea, el precio sostenible alcanzable en el escenario mexicano es el más bajo de todos los escenarios, como se ilustra en la figura 5.

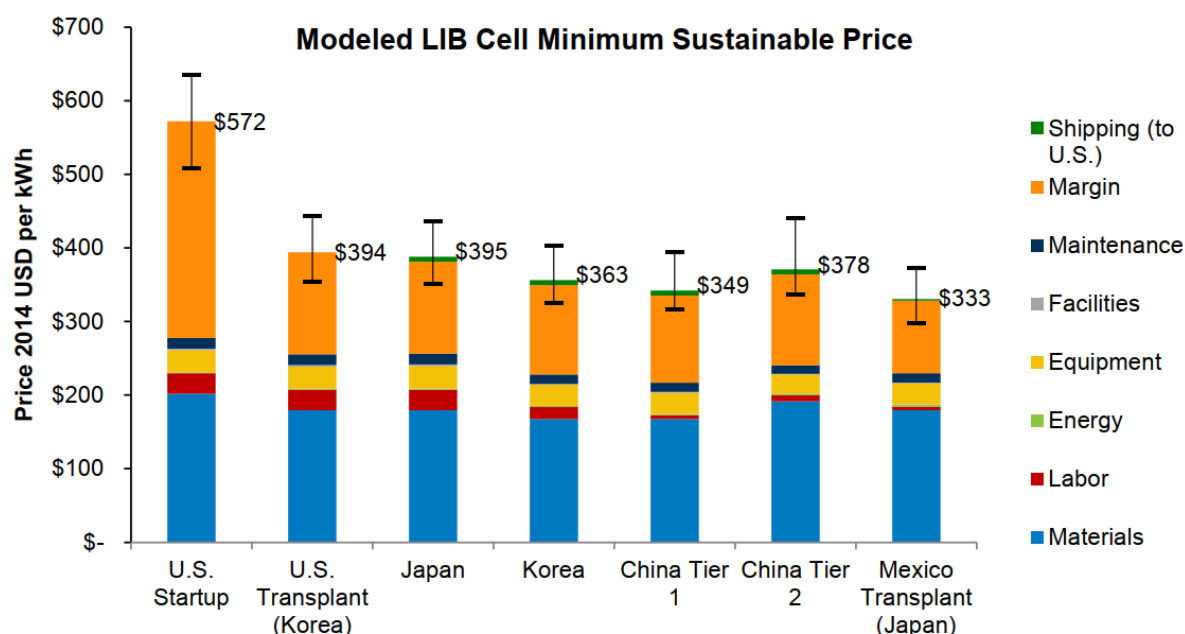


Figura 5. Precio mínimo sostenible de la celda LIB modelada (Chung et al., 2016)

La razón de este precio sostenible más bajo en México se atribuye a una combinación de una estructura de costos totales competitiva y un Costo Promedio Ponderado de Capital (WACC) bajo, suponiendo una empresa matriz japonesa. Los escenarios de Nivel 1 de China y Corea representan el siguiente nivel más bajo de precios sostenibles, con precios modelados dentro de un margen de ~3% entre sí. Este resultado es coherente con las expectativas, dado que las empresas de estas regiones, junto con las empresas japonesas, dominan actualmente los mercados de células LIB. (Chung et al., 2016).

2.2.6 Métodos de obtención de litio

En la actualidad, la extracción de litio se beneficia de dos principales fuentes accesibles: la roca, ejemplificada por minerales como el espodumeno, y las arcillas ricas en litio, destacando localidades como Sonora en México o Nevada en Estados Unidos. Además, las salmueras de los salares de altura, presentes en el llamado "triángulo del litio", conformado por Uyuni en Bolivia, Atacama en Chile, la región de la puna argentina, Clayton Valley en Nevada, Estados Unidos, y el norte de China, ofrecen otra fuente crucial. Esta última categoría se complementa con los fluidos geotérmicos, el agua de mar y otras fuentes. Los salares

continentales, agrupados mayormente en el triángulo del litio, poseen aproximadamente el 65% de los recursos globales de litio, consolidándose como una pieza fundamental en el panorama mundial de esta industria. (Julio Calvo Ernesto, 2022)

2.2.6.1 Obtención de litio a partir de salmueras

La salmuera en forma de lagos salados y la salmuera geotérmica son actualmente las principales fuentes para extraer una variedad de minerales debido a su mayor concentración. Las técnicas hidrometalúrgicas bien establecidas permiten la extracción factible de varios elementos valiosos como Si, Zn, Li, Mn y varios metales de tierras raras de estas reservas naturales de salmuera. Varios estudios realizados a nivel mundial han demostrado el gran potencial económico de la recuperación de minerales a partir de salmueras geotérmicas. (Abdullah Khalil, 2022).

En un proceso convencional, la salmuera que contiene Li obtenida de la fuente se concentra inicialmente a una concentración adecuada (alrededor de 6000 ppm de Li) para una recuperación viable. Esto a menudo se logra mediante la evaporación de salmuera cruda en grandes estanques poco profundos al aire libre a través de la radiación solar y el viento. La figura 6 muestra los esquemas del proceso de evaporación convencional. (Abdullah Khalil, 2022).

La salmuera es bombeada a los estanques de baja profundidad y de dimensiones considerables, en los cuáles, a partir del proceso de evaporación solar, comienzan a precipitar secuencialmente un conjunto de sales. De este modo, se extraen sales tales como cloruro de potasio, cloruro de sodio, sulfato de potasio, sulfato de sodio, entre otras, así como de litio, las cuales presentan impurezas de magnesio, boro y sulfato. Posteriormente, la salmuera concentrada de litio es transportada por camiones a las plantas de procesamiento, donde es sometida a procesos de purificación y precipitación a modo de obtener carbonato de litio, con una pureza cercana al 99,5%, aunque el mercado exige un mínimo de 99,1%, que puede comercializarse en cristales o se compacta para ser vendido en forma de gránulos. El carbonato de litio puede ser la materia prima para la producción de hidróxido de litio o bien de cloruro de litio de alta pureza que se emplea en la obtención de litio metálico por electrólisis de sales fundidas (Dirección general de desarrollo minero, 2018).

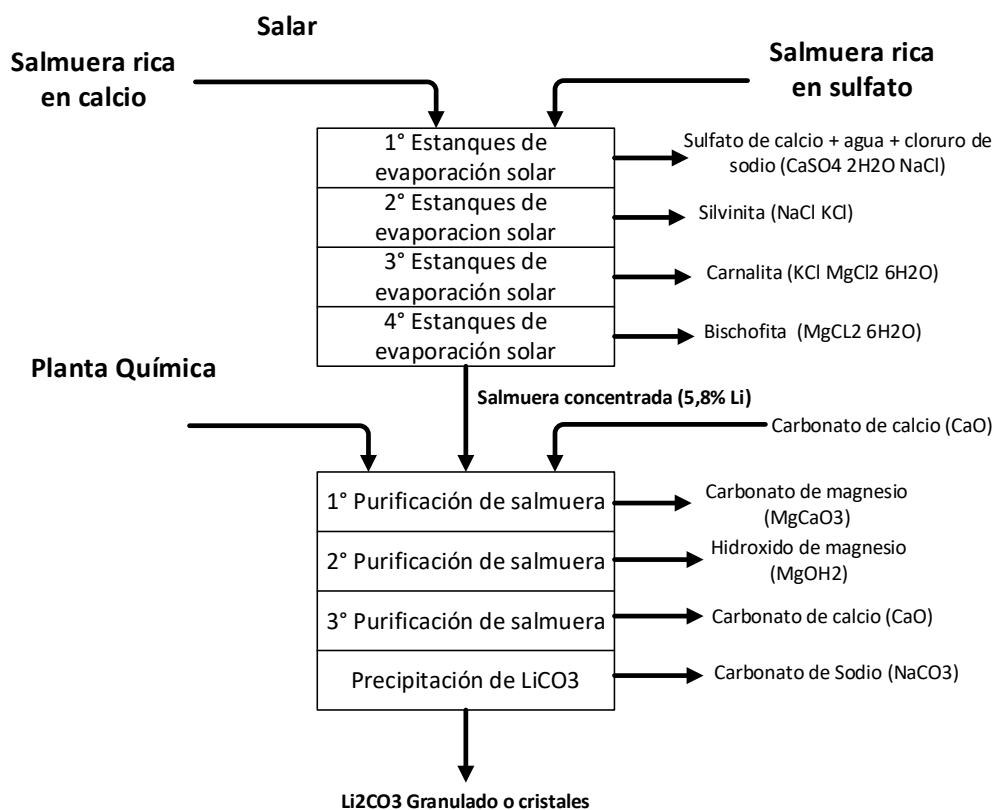


Figura 6. Obtención de carbonato de litio a partir de salmueras.

El procesamiento de litio a partir de salmueras se beneficia de la simplicidad de su metodología y la disminución de costos asociados. Dependiendo de factores como las tasas de evaporación y la presencia de impurezas como el magnesio y otros elementos en el reservorio, se observa una tendencia a una mayor rentabilidad en comparación con la extracción de roca. Por ejemplo, el proceso de extracción de roca, que implica molienda y lixiviación ácida, puede tener un costo promedio de 9.000 dólares por tonelada, además de generar un impacto ambiental más significativo. En contraste, la extracción a partir de salmueras continentales puede costar tan solo 3.500 dólares por tonelada, lo que lo convierte en una opción más económica y ambientalmente sostenible (Julio Calvo Ernesto, 2022).

Aunque la extracción de litio a partir de arcillas en lugares como México y Nevada mediante tratamiento ácido aún está en una fase de desarrollo, se vislumbra como una alternativa prometedora que podría mejorar aún más la eficiencia y reducir los costos asociados con la extracción de litio.

2.2.6.2 Obtención de litio a partir de depósitos de roca dura o pegmatita

La fuente principal para obtener carbonato de litio de minerales fue el espodumeno, que se concentra por flotación hasta que se logra un concentrado con un contenido de hasta 3% de litio. Dado los altos costos de la técnica, actualmente los productores de minerales de litio optan solamente por la producción de concentrados que resultan competitivos únicamente para la industria de cerámicas y vidrios. (Manrique, 2014b)

Para producir litio del espodumeno natural, el concentrado debe calcinarse previamente con caliza y luego, dependiendo del proceso (lixiviado, molienda o precipitación) y del agente tratante, se obtiene un porcentaje de litio para llegar al carbonato de litio, cloruro de litio e hidróxido de litio. Los procesos químicos son cuatro: tratamiento con ácido sulfúrico; lixiviación; purificación y concentración; y precipitación del carbonato del litio. (Manrique, 2014)

Según estudios, existiría la posibilidad de extraer litio del espodumeno mediante la pirometalurgia de cloración y carbono-cloración con gas cloro. El carbonato de litio es el compuesto básico más relevante de las sales de litio. Su demanda constituye el 60% de los productos de litio. Es fácil de purificar y tiene³³ utilidad en la conversión de otras sales de litio, como el cloruro de litio, bromuro de litio e hidróxido de litio. (Manrique, 2014a)

Los minerales primero pasan por el procesamiento de minerales como la molienda y el tamizado para obtener mineral de litio. La concentración de litio de los concentrados es ligeramente superior a la de la salmuera, pero sigue siendo bajo. Para extraer litio de los concentrados, existe un método común que descompone minerales mediante el uso de ácido sulfúrico. La Figura 7 presentan un diagrama de flujo simplificado (FUKUDA, 2017).

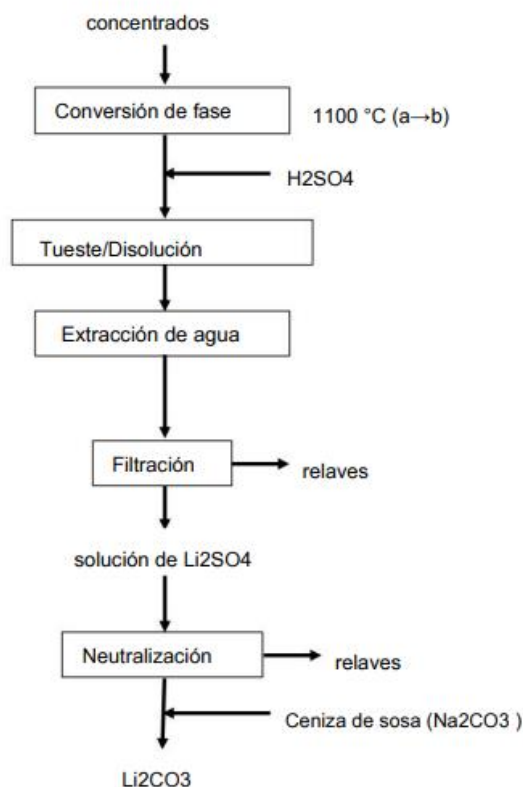


Figura 7. Diagrama de flujo simplificado de la producción de Li_2CO_3 a partir de minerales (FUKUDA, 2017)

2.2.7 Impactos de la minería del litio

La explotación del litio conlleva impactos ambientales y en la salud humana, que en muchos aspectos son comparables a los efectos observados en la minería de otros metales como el oro y el cobre, con la excepción de los asociados al uso de explosivos y voladuras en las operaciones mineras. Uno de los aspectos más sensibles en esta industria es el manejo del agua, al punto de que se ha llegado a afirmar que el "litio es una minería del agua". Esto se debe a que los yacimientos de litio más accesibles se encuentran en forma de salmueras.

Los salares, donde se extraen estas salmueras, están vinculados a cuerpos subterráneos de agua salada que los alimentan. En las zonas periféricas de los salares, esta salmuera entra en contacto con aguas subterráneas dulces que descienden desde las áreas altas de la cuenca. La salmuera, siendo más densa, ocupa la capa inferior, mientras que el agua dulce se superpone, formando humedales y lagunas alrededor de los salares. (Porta Atilio Andrés, 2020)

El proceso de extracción de la salmuera implica su bombeo hacia la superficie, donde se deposita en piscinas poco profundas para favorecer su evaporación. Esta práctica conduce a la reducción del agua subterránea en la cuenca y, como consecuencia, disminuye el suministro de agua dulce en las áreas circundantes, lo que puede llevar a la desaparición de humedales y lagunas. Se estima que, por cada tonelada de litio extraída, se evaporan alrededor de dos millones de litros de agua (Susana, 2011).

La gestión adecuada de los recursos hídricos en las operaciones de extracción de litio es crucial para mitigar estos impactos ambientales y sociales. La comprensión de estos procesos es fundamental para desarrollar estrategias efectivas de gestión ambiental y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de la industria del litio.

2.2.8 ¿Se puede explotar el litio con métodos de menor impacto hídrico?

La respuesta es afirmativa toda vez que se reemplace el método evaporítico por uno de separación por vía húmeda, u otros métodos disponibles en el mercado que emplean nanotecnología. Utilizando estas alternativas a la evaporación, el agua de “rechazo”

podrá ser repuesta en el subsuelo mediante pozos inyectoros. Esta técnica permitiría producir las 24 horas, ya que no necesita del calor del sol para evaporar, y adicionalmente la salmuera reinyectada “empujaría” el agua hacia los pozos productores, aumentando la velocidad y eficiencia del proceso. Esta técnica es utilizada en yacimientos de gas y petróleo, se denomina “recuperación secundaria” (Sticco et al., 2018).

2.2.9 Mercado del litio

El mercado del litio se está expandiendo. Es un mercado nuevo sin una historia clara a diferencia del mercado del cobre. Por lo tanto, es más difícil predecir la oferta/demanda y el precio del litio en un mercado actual que fluctúa rápidamente. Si bien hay varios informes de algunas empresas, los datos de BMO Capital Markets se citan aquí en la Figura 8.

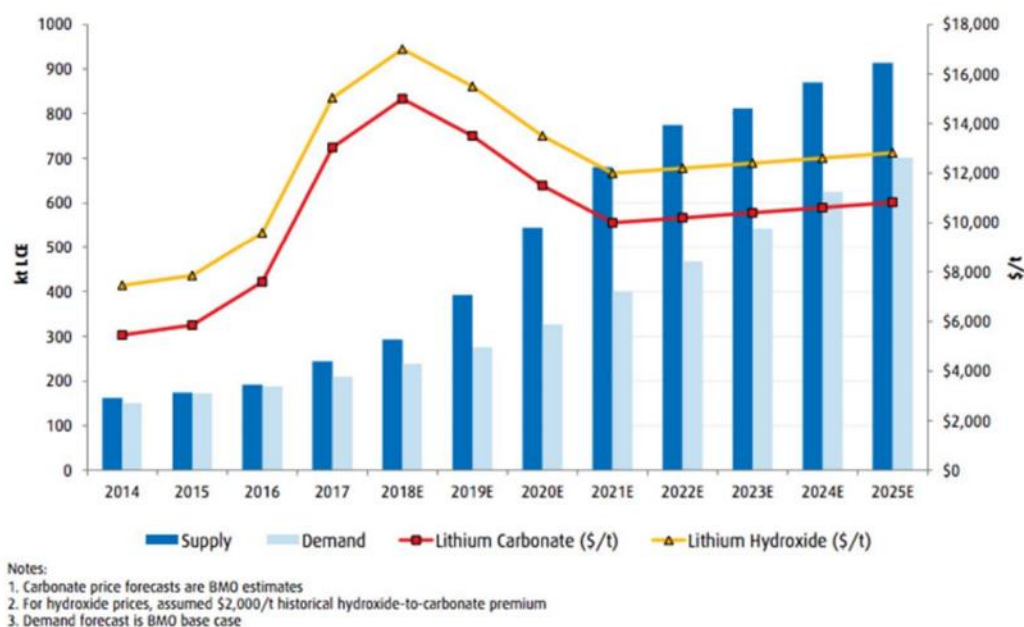


Figura 8. Oferta/demanda, precio del litio y sus estimaciones (Jamasmie, 2019)

Según el gráfico, no habrá déficit de oferta para 2025, aunque, hacia 2015, hubo una preocupación por la escasez de litio. Se espera que el precio del carbonato e hidróxido de litio baje y luego aumentar gradualmente con el tiempo. A primera vista, parece que no hay problema en el mercado del litio porque, según las estimaciones actuales, una cantidad suficiente de litio se suministraría al mercado del litio y el precio sería estable. Sin embargo, este tema es controvertido, ya que el mercado del litio es único y no es fácil predecir la demanda futura.

En primer lugar, se necesita algún tiempo para que el litio se suministre al mercado, especialmente desde depósitos de salmuera. Dado que el proceso utilizado para los depósitos de salmuera es principalmente la evaporación solar, que normalmente se tarda al menos un año en concentrar litio, el mercado puede verse afectado por la oferta situación en los últimos años.

En otras palabras, se debe preparar una cierta cantidad de litio de antemano para satisfacer la demanda en los próximos años. Por otra parte, el lado de la demanda del mercado está cambiando rápidamente y la demanda futura no está clara, al menos en la situación actual. Algunas automotrices anunciaron un objetivo de ventas de vehículos eléctricos y el mercado del litio reaccionó para prepararse para esos objetivos, pero ha habido menos demanda porque los vehículos eléctricos aún no son comunes entre consumidores debido a la restricción de

infraestructura y modelos disponibles. es más complicado que Se espera que mantenga el mercado del litio en equilibrio mediante la predicción de la oferta y la demanda. este es uno de las razones por las que el precio de los compuestos de litio alcanzó su punto más alto en 2018.

A principios de la década de 2010, Se pensó que el mercado pronto se quedaría sin litio debido a la producción de vehículos eléctricos, y el precio subió rápidamente, aunque la oferta finalmente logró satisfacer la demanda. Esto significa que existe la posibilidad que la demanda de litio alcanzará y superará su oferta en un futuro cercano, mientras que las estimaciones actuales mostrar la situación contraria. Por ejemplo, China, que es uno de los mayores mercados de vehículos eléctricos en el mundo, ha comenzado a dirigirse hacia convertirse en una sociedad EV al hacer leyes para restringir la emisión de gases de efecto invernadero. No está claro qué tan rápido se extenderán los vehículos eléctricos por el mundo. Mantener el suministro de litio, se necesita un proceso para hacer compuestos de litio rápidamente. La respuesta lenta tiempo para el uso de la evaporación solar a largo plazo de salmueras no es suficiente para hacer frente a la rápida escalada demanda de productos químicos de litio. Esta es la razón por la que muchos investigadores están trabajando en la rápida tecnología de recuperación de litio. (FUKUDA, 2017).

2.2.10 Producción de baterías de litio

La mayor parte de la producción de baterías de ión-litio de uso general se produce en China, Corea del Sur y Japón. Los Estados Unidos participan de la producción de baterías recargables de litio en un mercado de pequeña escala y con un alto margen de ganancia, con aplicaciones en el espacio, en la medicina o en el sector militar.

Existen más de 100 fabricantes solamente en China, con producción para el mercado internacional. Las baterías se certifican y controlan por las marcas más importantes, que las usan como componentes en sus dispositivos electrónicos. Mientras que Corea de Sur y Japón fueron pioneros en el desarrollo y producción para la industria electrónica, China se dedica al sector de baterías de menor costo y calidad. Japón es uno de los mayores productores de baterías de litio. En el año 2009, representaron un 43% del volumen total de baterías fabricadas en ese país. Un 47% fueron baterías primarias de litio y un 53% fueron baterías de ión-litio. (Goonan, 2012)

Las baterías de litio entraron al mercado en 1993 y desde entonces unas 45.000 toneladas se incorporaron a estas baterías en todo el mundo. Hasta el año 2008, el mercado de las baterías de litio fundamentalmente consistía en baterías primarias y secundarias para dispositivos electrónicos, con solamente un 0,2% de litio aplicado a las baterías para automóviles. (Goonan, 2012).

2.2.11 Componentes y funcionamiento

Recordamos rápidamente las partes principales y el principio de funcionamiento de las baterías de ión-litio para luego pasar a los detalles del proceso de fabricación. La celda es la unidad básica de una batería y se agrupan en módulos. La celda de la batería de ión-litio posee cuatro componentes: ánodo, cátodo, electrolito y separador. El ánodo y el cátodo se disponen para que se inserten y remuevan iones, de modo que se produzca la carga y descarga de la batería (Fig. 9). Los iones se mueven entre los electrodos a través del electrolito, mientras que el separador habilita el paso de iones, pero impide el cortocircuito entre los electrodos. Los iones de litio se liberan desde el ánodo hasta el electrolito, atraviesan el separador y se adhieren al cátodo, generando una corriente eléctrica. Al recargarse la batería, se produce el proceso inverso (Manrique, 2014a).

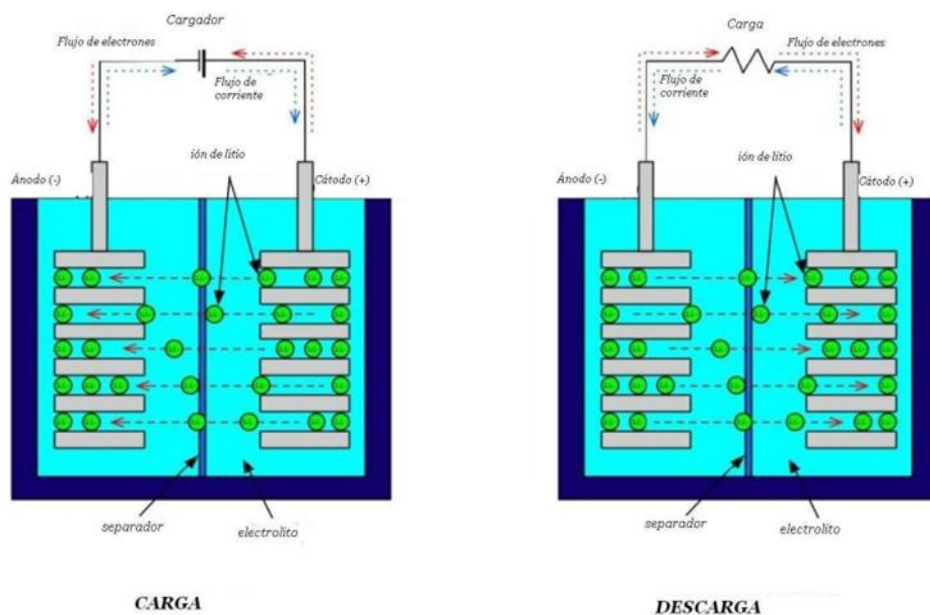


Figura 9. Almacenamiento electroquímico (Manrique, 2014)

2.2.12 Batería de litio, níquel, manganeso y óxido de cobalto (NMC)

La NMC, abreviatura de la batería compuesta por litio, níquel, manganeso y óxido de cobalto, representa una variante de las baterías de iones de litio con un cátodo distintivo. A diferencia de las baterías de fosfato de hierro y litio (LFP), que se destacan por su notable capacidad y estabilidad, la NMC sobresale por su ciclo de vida prolongado, estabilidad térmica mejorada y mayor densidad de energía. Su cátodo está configurado en capas, lo que se traduce en un proceso de intercalación monofásico, en contraste con las estructuras de olivino, que poseen dos fases. La composición del cátodo de NMC se define mediante la fórmula $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$, donde la suma de las fracciones molares (x, y, z) equivale a la unidad. En términos de química durante la descarga, la NMC presenta similitudes con las LFP, ya que ambas son baterías de iones de litio. El proceso involucra la oxidación del litio en el ánodo y su reducción en el cátodo. La reacción de descarga se produce de izquierda a derecha, mientras que la reacción de carga procede en sentido contrario como se muestra en la tabla 2 (Tran et al., 2021).

Tabla 1. Reacciones electroquímicas batería litio, níquel, manganeso y óxido de cobalto (NMC)

Electrodo	Reacciones electroquímicas
Ánodo	$\text{Li}_n\text{C}_6 \leftrightarrow \text{Li}_0\text{C}_6 + n\text{Li}^+ + n\text{e}^-$
Cátodo	$\text{Li}_{1-n}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2 + n\text{Li}^+ + n\text{e}^- \leftrightarrow \text{Li}_1(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$
General	$\text{Li}_n\text{C}_6 + \text{Li}_{1-n}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2 \leftrightarrow \text{Li}_0\text{C}_6 + \text{Li}_1(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$

Fuente: (Tran et al., 2021)

2.2.13 Batería de litio, níquel, cobalto, óxido de aluminio (nca)

Las baterías NCA, que se abrevian como baterías de litio-níquel-cobalto-óxido de aluminio, comparten notables semejanzas con las baterías NMC, ya que ambas adoptan una estructura catódica en capas. No obstante, en el caso de las baterías NCA, el manganeso, presente en las baterías NMC, es sustituido por aluminio. Además, es digno de mención que

las baterías NCA exhiben una impresionante capacidad gravimétrica de $200 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$, superando a las capacidades de las baterías LMO y LFP, que se sitúan en $148 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ y $170 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente. Cabe destacar que las baterías NCA son conocidas por su prolongada vida útil. Sin embargo, es importante señalar que, en comparación con otros tipos de baterías, las baterías NCA presentan una desventaja significativa en términos de seguridad. Su utilización en aplicaciones como vehículos eléctricos requiere la implementación de medidas de control de seguridad específicas. (Miao et al., 2019).

En lo que respecta a la química durante la descarga, las baterías NCA siguen un proceso muy similar al de las otras baterías de iones de litio previamente mencionadas. En este proceso, el litio experimenta oxidación en el ánodo y reducción en el cátodo. La reacción de descarga progresa de izquierda a derecha, mientras que la reacción de carga procede en dirección contraria. Las reacciones electroquímicas asociadas se detallan en la Tabla 4. (Tran et al., 2021).

Tabla 2. Reacciones electroquímicas batería litio, níquel, cobalto, óxido de aluminio (NCA).

<i>Electrodo</i>	<i>Reacciones electroquímicas</i>
<i>Ánodo</i>	$\text{Li}_n\text{C}_6 \leftrightarrow \text{Li}_0\text{C}_6 + n\text{Li}^+ + n\text{e}^-$
<i>Cátodo</i>	$\text{Li}_m - n(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_z)\text{O}_2 + n\text{Li}^+ + n\text{e}^- \leftrightarrow \text{Li}_m(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_z)\text{O}_2$
<i>General</i>	$\text{Li}_n\text{C}_6 + \text{Li}_m - n(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_z)\text{O}_2 \leftrightarrow \text{Li}_0\text{C}_6 + \text{Li}_m(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_z)\text{O}_2$

Fuente: (Tran et al., 2021).

2.2.14 Composición general de los sistemas de baterías

Ambos sistemas de batería (NCA y NCM) se componen de cuatro elementos principales: la celda de la batería, el paquete, el Sistema de Gestión de Batería (BMS) y el sistema de refrigeración. La celda de la batería, en particular, consta de cinco subcomponentes esenciales: el ánodo, el cátodo, el recipiente de la celda, el electrolito y el separador. (Ager-Wick Ellingsen et al., 2014a) En ambas tecnologías de batería, el ánodo se construye con un colector de corriente de cobre recubierto con una capa de pasta de electrodo negativo, en la que el componente principal es el grafito sintético. En cuanto al cátodo, este se forma con un colector de corriente de aluminio que incluye una capa de pasta de electrodo positivo,

compuesta principalmente por material activo positivo, pequeñas cantidades de carbón negro y un aglutinante.

En el caso de las baterías de iones de litio NCA, el material activo positivo se compone de óxido de litio, níquel, cobalto y óxido de aluminio (LiNiCoAlO_2). Para las baterías de iones de litio NCM, el material activo positivo correspondiente es el óxido de litio, níquel, cobalto y manganeso [$\text{Li}(\text{NiCoMn})\text{O}_2$]. En ambas pastas de electrodos, se utiliza un solvente para suspender las mezclas. El electrolito se basa en la sal hexafluorofosfato de litio (LiPF_6) disuelta en una mezcla de solventes, y el separador es una película porosa de poliolefina. (Lu et al., 2013) El contenedor de la celda está compuesto por una bolsa multicapa con pestañas. El paquete de la batería se desglosa en tres subcomponentes: el embalaje del módulo, la retención de la batería y la bandeja de la batería. El BMS abarca las placas de módulos de batería (BMB), el Sistema de Interfaz de Batería Integrada (IBIS), sujetadores, un sistema de alto voltaje (HV) y un sistema de bajo voltaje (LV). Cabe destacar que ambas baterías, NCA y NCM, comparten tecnologías comunes de sistema de refrigeración y BMS. (Zhao & You, 2019).

En el contexto de la batería de iones de litio NCA, el cátodo se formula con óxido de litio, níquel, cobalto, óxido de aluminio (LiNiCoAlO_2), mientras que el ánodo consiste en grafito. Por otro lado, la batería de iones de litio NCM se fabrica con un cátodo a base de óxido de litio, níquel, cobalto y manganeso [$\text{Li}(\text{NiCoMn})\text{O}_2$], y un ánodo de grafito. En ambas configuraciones, se implementan sistemas de refrigeración y BMS idénticos. (Zhao & You, 2019). De esta manera de acuerdo a lo anteriormente mencionado la estructura general de un paquete de baterías quedaría simplificado en la siguiente tabla.

Tabla 3. Composición general de un sistema de baterías

<i>One battery pack</i>		
<i>Battery cell</i>	Anode	Copper current collector Syntetic graphite
	Cathode	Aluminium current collector NCM o NCA
	Cell container	Multilayer pouch and tabs.
	Electrolyte	Lithium hexafluorophosphate (LiPF6)
	Separator	Porous polyolefin film
<i>Packing</i>	Module packaging Battery retention Battery tray	
<i>BMS</i>	Battery module boards (BMBs) Integrated Battery Interface System (IBIS) High voltage (HV) system Fasteners Low voltage (LV) system	
<i>Coling system</i>	Radiator Manifolds Clamps and fasteners Pipe fitting Thermal pad Coolant	

2.2.15 Regulaciones para el reciclaje de baterías en México

El reciclaje, en su esencia, debe ser económicamente viable y ecológicamente sostenible, recuperando materiales valiosos y minimizando la contaminación ambiental. En el contexto de las baterías de iones de litio (Li-ion), la investigación y el desarrollo de procesos de reciclaje son limitados en comparación con los avances en nuevos materiales y aplicaciones. A medida que se desarrollan nuevos materiales de electrodo, los procesos de reciclaje deben adaptarse en consecuencia.

El reciclaje de baterías de Li-ion es un proceso multifacético que implica una serie de pasos físicos, químicos y biológicos. Tras la clasificación de las baterías y la eliminación de la carga residual, el primer paso es la eliminación de la carcasa que protege los componentes

electroquímicos. Este proceso puede ser manual o mecanizado. En el caso de las baterías de Li-ion, el enfoque de la recuperación se centra en el litio (Li), cobalto (Co) y níquel (Ni), seguido por el grafito. El objetivo principal es separar y purificar estos elementos para su reutilización en nuevas baterías (Suárez Alcántara Karina, 2024).

Recientemente, se ha propuesto el uso de ciertas bacterias para la disolución, oxidación y captura selectiva de metales como el hierro (Fe), Co o Ni. Sin embargo, este proceso es lento y requiere la pirolización de la biomasa para obtener una escoria rica en Fe, Co o Ni (Suárez Alcántara Karina, 2024).

En México, no existe una normativa específica para el reciclaje de residuos electrónicos, incluyendo las baterías de Li-ion. Aunque se han identificado normas que clasifican a las baterías de Li-ion como residuos de manejo especial que deben ser confinados en instalaciones adecuadas, el confinamiento no resuelve los problemas de contaminación ni genera beneficios económicos. Sin embargo, está surgiendo un mercado para la compra de residuos electrónicos en México (SEMARNAT, 2023).

Los principales desafíos identificados son la falta de confinamiento adecuado para todos los residuos generados y la falta de regulación de las pequeñas empresas de reciclaje. Las soluciones a estos desafíos implican inversiones en investigación básica para desarrollar procesos de reciclaje productivos y la implementación de una legislación específica que regule estos procesos (INCyTU, 2018).

2.2.16 Participación de vehículos eléctricos en el mercado automotriz 2023

En el primer semestre, las ventas globales de vehículos eléctricos (BEV y PHEV) aumentaron un 40%, superando la recuperación general del mercado automotriz que creció un 1%. Se comparan con las bajas ventas del mismo periodo en 2023. Las limitaciones de suministro se han aliviado, los inventarios se han restablecido y los precios han disminuido. La demanda europea de vehículos eléctricos está impulsada por regulaciones ambientales, aunque las subvenciones directas han disminuido. China ha reducido las subvenciones, pero las ventas de vehículos eléctricos crecieron rápidamente en el segundo trimestre. En EE.UU. y Canadá, las ventas combinadas aumentaron un 37%, superando el crecimiento general del mercado.

Otros mercados, como Corea del Sur y Japón, muestran un fuerte crecimiento en la adopción de vehículos eléctricos tal y como lo muestra la figura 10 (EVvolumenes.com, 2023).

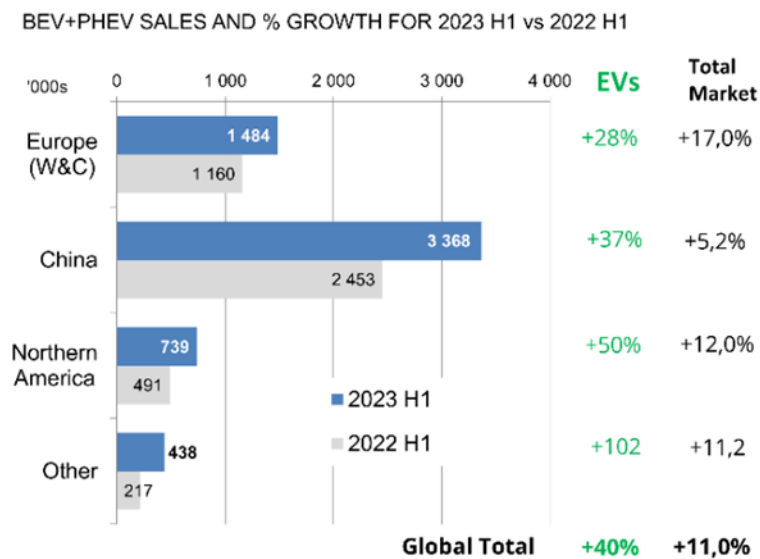


Figura 10. Ventas globales de BEV y PHEV primer trimestre 2023

2.3 Análisis de ciclo de vida

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una metodología integral que busca identificar, cuantificar y caracterizar los posibles impactos ambientales asociados a cada etapa del ciclo de vida de un producto. Este análisis abarca desde la extracción y procesamiento de las materias primas, pasando por la producción y distribución, hasta el uso final y la disposición del producto. El ACV se centra en el rediseño de productos con el entendimiento de que los recursos energéticos y las materias primas son finitos. Se reconoce que estos recursos a menudo se consumen más rápido de lo que pueden ser reemplazados o de lo que pueden surgir nuevas alternativas viables. Por lo tanto, el ACV promueve la conservación de recursos a través de la reducción de la cantidad de residuos generados por el producto (Romero Rodríguez Blanca Iris, 2003a).

Sin embargo, dado que la generación de residuos es inevitable, el ACV propone gestionar estos residuos de manera sostenible desde el punto de vista ambiental. Esto implica

minimizar todos los impactos asociados con el sistema de manejo de residuos, desde la recolección y transporte, hasta el tratamiento y la disposición final.

La Figura 11 ilustra el ACV, proporcionando una representación visual de cómo se aplica esta metodología a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto. Esta figura puede ayudar a entender mejor cómo el ACV puede ser utilizado para evaluar y mejorar la sostenibilidad de un producto.

En resumen, el ACV es una herramienta valiosa para evaluar el impacto ambiental de un producto a lo largo de su ciclo de vida. Al identificar y cuantificar estos impactos, el ACV puede informar decisiones de diseño y gestión que reduzcan el impacto ambiental y promuevan la sostenibilidad

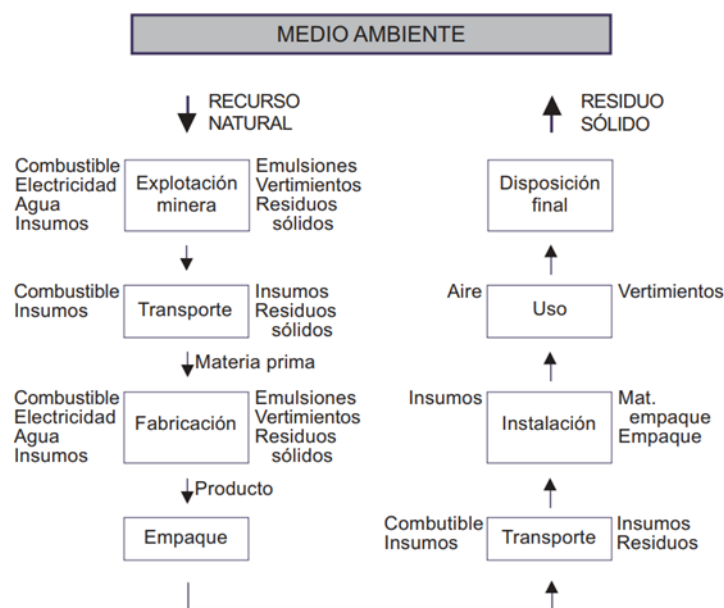


Figura 11. Análisis de ciclo de vida (Romero Rodríguez Blanca Iris, 2003a)

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) constituye una herramienta integral para evaluar los posibles impactos ambientales y los recursos utilizados a lo largo de la vida de un producto. Se basa en la recopilación y evaluación de las entradas y salidas, así como los impactos ambientales potenciales de un producto o proceso, considerando cada fase desde su concepción hasta su disposición final. Un ACV completo y exhaustivo, conocido como "de la cuna a la

tumba," abarca el diseño, desarrollo, adquisición de materias primas, fabricación, distribución, mantenimiento, reutilización y actividades al final de su vida útil, sin embargo, en este proyecto se utilizará un enfoque “de la cuna a la puerta” o (Cradle to Gate) este es un tipo de análisis intermedio que solo considera las entradas y salidas desde materias primas hasta la distribución del producto. Este enfoque no considera los impactos del uso y deposición del producto. Un profesional o analista especializado lleva a cabo el ACV para respaldar el proceso de toma de decisiones, buscando identificar la opción más favorable para el medio ambiente (Meza Palacios Ramiro, 2019). La implementación del ACV sigue una serie de etapas, como se ilustra en la siguiente figura.

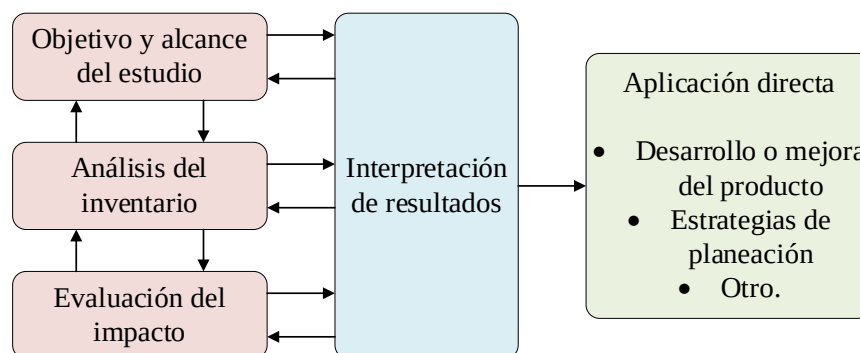


Figura 12. Fases y aplicación de un ACV según ISO 14040.

2.3.1 Metodología del ACV

El ACV es una metodología que permite sistematizar la adquisición y generación de información para establecer criterios objetivos en la toma de decisiones hacia un desarrollo sostenible. Además, esta herramienta permite detectar de forma eficaz las oportunidades de mejora de todo el sistema, no limitándose únicamente a la instalación objeto de estudio, sino ampliando el análisis en etapas anteriores y posteriores. Aunque la consideración del impacto ambiental de un producto / proceso / servicio a lo largo de su ciclo de vida se remonta a la década de 1960, ha recibido un importante impulso en los últimos años. La primera definición del ACV fue establecida por la Sociedad de Química y Toxicología Ambiental (SETAC) en 1993 quien la definió como un proceso objetivo para:

1. evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad mediante la identificación y cuantificación del uso de materia y energía, así como de las emisiones liberadas al ambiente;
2. analizar los impactos asociados a este uso de materia, energía y las correspondientes emisiones;
3. identificar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental.

La profundidad y amplitud de un estudio de ciclo de vida puede ser considerablemente diferente dependiendo del objetivo de un ACV particular (Baumann & Tillman, 2004).

Existen normas que regulan los ACV creadas por la Organización Internacional de Normalización (ISO): ISO 14040 (Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Principios y marco) e ISO 14044 (Gestión ambiental - Evaluación del ciclo de vida - Requisitos y directrices). Los ACV se estructuran en 4 etapas, que se enumeran a continuación (Gabriela Benveniste Pérez, 2020).

- Definición de objetivos y alcance
- Análisis de inventario (Inventario de ciclo de vida, ICV)
- Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)
- Interpretación de resultados.

El alcance de un Análisis del Ciclo de Vida (ACV), que abarca los límites del sistema y el nivel de detalle, se adapta al tema específico y al propósito previsto del estudio, presentando variaciones significativas en su profundidad y amplitud según los objetivos particulares. La segunda fase del ACV es la fase de Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV), que implica recopilar los datos de entrada/salidas relevantes para el sistema bajo estudio, con el fin de cumplir con los objetivos definidos del estudio. La tercera fase, Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV), busca proporcionar información adicional para evaluar los resultados del ICV y comprender mejor la importancia ambiental del sistema del producto. La última etapa del procedimiento de ACV es la Interpretación del Ciclo de Vida, donde se resumen y discuten los resultados del ICV o EICV, o ambos, para fundamentar conclusiones, recomendaciones y decisiones, de acuerdo con los objetivos y alcance definidos (ISO 14044, Gestión Ambiental — Análisis Del Ciclo de Vida — Requisitos y Directrices, 2006).

2.3.2 Análisis de inventario de ciclo de vida

El Análisis de Inventario del Ciclo de Vida (LCIA) forma parte de la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA), un proceso integral que evalúa las cargas ambientales a lo largo del ciclo de vida del producto. Este análisis de inventario es un procedimiento sistemático, objetivo y gradual que cuantifica los requerimientos de energía y materias primas, las emisiones a la atmósfera, las emisiones al agua, los desechos sólidos y otras emisiones a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, proceso de empaque, material o actividad (Dr. B.V. Babu, 2006). LCIA implica la recolección de datos y cálculos necesarios para cuantificar las entradas y salidas de un sistema de producto, incluyendo tanto los recursos utilizados como las emisiones al aire, agua y tierra.

2.3.3 Beneficios del ACV

Las organizaciones consideran benéfico conocer, con el mayor detalle posible, los efectos –aunque sean involuntarios– que sus productos, servicios o actividades podrían causar en el medio ambiente; en especial, los que provoquen impactos ambientales significativos adversos, para atender a las responsabilidades legales, sociales y políticas que ellos implican, además de las pérdidas económicas y de imagen empresarial.

El ACV, realizado de acuerdo con los procedimientos estipulados en la serie de normas ISO14040, es una herramienta de gestión ambiental que brinda una base sólida para que la dirección de una organización pueda tomar decisiones técnicas adecuadas con base en las cuestiones que podrían plantearse sobre el lanzamiento de un nuevo producto o la modificación de productos existentes, para hacerlos más eficientes en cuanto a su desempeño ambiental y que sigan realizando igualmente la función para la que fueron programados.

En el concepto de desempeño ambiental del producto se encuadran temas tales como su diseño, los procesos de fabricación, los medios de transporte, el tipo de energía necesaria en las distintas etapas de su ciclo de vida, las recomendaciones para su uso y la forma y el momento para su disposición final, si es que antes no se le recicla o reúsa. En la medida en que, por la aplicación del ACV, se identifiquen oportunidades de mejora y se implementen

efectivamente en el producto, también se habrá logrado una mejora en el desempeño ambiental de ese producto. En cuanto a los aspectos financieros, el ACV puede ser una ayuda útil para bajar los costos en la medida que el nuevo diseño y los nuevos procesos de fabricación, transporte y distribución, entre otros, promuevan una mayor eficiencia en la asignación y el empleo de materias primas, insumos y energía (Romero Rodríguez Blanca Iris, 2003a).

De igual modo, provee ventajas comparativas y competitivas al proporcionar todos los elementos de análisis a las empresas que más tarde deseen certificar sus productos bajo esquemas de sellos ambientales o etiquetas ecológicas. La misma World Trade Organization, plantea que cada vez son más las etiquetas ambientales que basan su análisis en el ACV.

El ACV no sólo es un instrumento para proteger el medio ambiente y conservar los recursos naturales, sino un instrumento empresarial para reducir costos y mejorar posiciones en el mercado (Romero Rodríguez Blanca Iris, 2003a).

2.3.4 Selección del método evaluación impactos

De los métodos de evaluación de impactos existentes, es crucial seleccionar el más adecuado para el análisis del caso de estudio propuesto. Para identificar el método de evaluación más apropiado, se lleva a cabo una breve comparación entre ellos, considerando los enfoques que plantean, el número de categorías de impacto de punto medio que contemplan, los procesos de normalización y ponderación utilizados, y su especificidad de aplicación (Tabla 4).

En cuanto al enfoque, se consideran más favorables aquellos métodos que incluyen tanto el enfoque Midpoint como el Endpoint. Además, se valora positivamente un método que contemple un mayor número de categorías de impacto. En lo que respecta a la normalización, se considera más favorable que los factores de normalización estén basados en Europa y sean los más actuales posibles. En términos de ponderación, se considera más favorable el uso del juicio de expertos, mientras que se valora menos favorable la ponderación igualitaria entre categorías, con una valoración intermedia para la ponderación basada en emisiones objetivo. Finalmente, en cuanto a la especificidad de aplicación, se valora más favorablemente si el

método es general o apto para distintos tipos de análisis, y menos favorable si se centra en aspectos específicos (Gassó et al., 2016).

Tabla 4. Métodos de evaluación de impacto según su enfoque, número de categorías de impacto, aspectos de normalización, ponderación y ámbito de aplicación.

<i>Método</i>	<i>Enfoque</i>	<i>Categorías de impacto Midpoint</i>	<i>Normalización</i>	<i>Ponderación</i>	<i>Ámbito aplicación</i>
<i>CML-IA</i>	Midpoint	10	Europa y mundo (1990-2000)	-	General
<i>EDP 2013</i>	Midpoint	10	Europa y mundo (1990-2000)	-	Declaraciones ambientales de producto (DAPs)
<i>Impact 2002+</i>	Midpoint y Endpoint	14	Global	Igualitaria entre categorías	Evaluación de impactos químicos y tóxicos
<i>EDIP 2003</i>	Midpoint y Endpoint	19	Europa (2004)	Emisiones objetivo 2004, recursos 1994	General
<i>ILCD Midpoint+</i>	Midpoint	16	Europa (2010)	Igualitaria entre categorías	General
<i>ReCiPe</i>	Midpoint y Endpoint	17	Europa (2007)	Igualitaria entre categorías	General
<i>Aspectos concretos (CDE, GWP, EF)</i>	Indicadores	1-6	Global	-	General

2.4 Dinámica de sistemas

La Dinámica de Sistemas (SD) fue creada por Jay W. Forrester en el Instituto Tecnológico de Massachusetts a mediados de la década de 1950. Forrester propuso que cualquier sistema complejo puede modelarse utilizando dos tipos de variables: stocks y flujos. Los stocks representan acumulaciones de unidades y se ilustran como rectángulos, mientras que los flujos representan movimientos de unidades por tiempo y se visualizan con flechas. Las acciones en el sistema sólo pueden modificarse a través de sus entradas y salidas conectadas, reguladas por funciones de decisión que actúan como válvulas de entrada y salida. Las simulaciones en SD se realizan en tiempo continuo mediante ecuaciones integrales. La ecuación integral correspondiente es:

$$\text{Ecuación 1.} \quad \text{Stock}(t) = \int_{t_0}^t [\text{Inflows}(s) - \text{Outflows}(s)ds] + \text{Stock}(t_0)$$

Utilizando la metáfora de una bañera, una válvula regularía el flujo de agua, con fuentes y sumideros representando áreas fuera del modelo que no se analizan en detalle. Forrester demostró que los sistemas complejos están compuestos principalmente por bucles causales y muestran retrasos, siendo influenciados por sus propios comportamientos pasados. A diferencia de otras disciplinas, la perspectiva de la SD es de causalidad endógena.(Schoenenberger et al., 2021)

2.4.1 Componentes básicos de un modelo de Dinámica de Sistemas

Durante el estudio de sistemas complejos, se abordan problemáticas tanto a nivel micro como macro. El micro-nivel se enfoca en las interrelaciones de causa y efecto, mientras que el macro-nivel examina las relaciones entre los subsistemas elementales.

Los modelos de Dinámica de Sistemas (DS) tienen componentes y características distintas debido a su naturaleza, los cuales pueden variar o mantener su valor cuantitativo. Una "variable" es aquella que cambia en función del tiempo, mientras que una "tasa o parámetro" puede ser endógeno o exógeno, es decir, propio o ajeno al sistema estudiado. Los modelos dinámicos utilizan "variables de estado o nivel" para contener el flujo, las cuales varían su nivel dependiendo del flujo de información de entrada y salida. Las variables encargadas del flujo o transferencia de información se denominan "válvulas", que controlan los flujos por unidad de tiempo y se abren o cierran en función de los parámetros.(Alina et al., 2021)

Estas válvulas pueden cambiar durante la simulación debido a variables auxiliares, que permiten visualizar el comportamiento y las condiciones de los flujos. Las variables constantes son poco empleadas en los modelos de DS, ya que la variabilidad de los aspectos analizados no suele ser estática. Las fases de los modelos DS son: conceptualización, formulación, evaluación e implementación, como se describe en la tabla 5.

Tabla 5. Fases de los modelos de dinámica de sistemas.

Primera fase: Conceptualización	Segunda fase: Formulación	Tercera fase: Evaluación	Cuarta fase: Implementación
• Seleccionar el escenario. • Definir el propósito del modelo. • Identificar las variables críticas y los límites del modelo. • Establecer el horizonte de tiempo. • Establecer las relaciones entre las variables conocidas como hipótesis dinámicas. • Desarrollar diagrama causal.	• Desarrollar el diagrama de Forrester. • Determinar las ecuaciones matemáticas del modelo. • Estimar y relacionar los parámetros del modelo. •	• Simulación del modelo y prueba de hipótesis dinámicas • Prueba del modelo bajo diferentes supuestos. • Respuesta del modelo con análisis de sensibilidad.	• Comportamiento del modelo bajo diferentes políticas. • Representar el modelo en una forma accesible al usuario.

Fuente: (CEDILLO CAMPOS, 2008)

2.4.2 Anylogic System Dynamics

AnyLogic System Dynamics es una potente herramienta de modelado y simulación que permite a los usuarios analizar y comprender el comportamiento dinámico de sistemas complejos a lo largo del tiempo. Utilizada ampliamente en diversos campos como la ingeniería, la economía, la gestión empresarial y las ciencias sociales, esta plataforma combina técnicas de modelado de sistemas dinámicos, agentes y eventos discretos, proporcionando un entorno flexible y versátil para la creación de modelos precisos y detallados. (Aguilar Lasserre Alberto Alfonso & Cessa Valdés Fabián, 2022)

El enfoque de System Dynamics en AnyLogic se centra en la representación de flujos y acumulaciones dentro de un sistema, permitiendo a los modeladores capturar las interacciones y retroalimentaciones entre diferentes componentes. Esto facilita la evaluación

de políticas, estrategias y escenarios futuros, ayudando a identificar puntos críticos y a tomar decisiones informadas. Con una interfaz intuitiva y capacidades avanzadas de simulación, AnyLogic System Dynamics es una herramienta esencial para cualquier profesional que busque comprender y optimizar el comportamiento de sistemas complejos.

2.4.3 Simbología del Software AnyLogic.

Para facilitar la comprensión del modelo, se procederá a detallar cada uno de sus componentes, explicando su función específica dentro del mismo. Para ello, se realizará una clasificación por tipo de elemento y se proporcionará una breve descripción de cada uno, como se expone a continuación:

Parameter: Este nodo probabilístico asigna los valores de flujo por unidad de medida de acuerdo con su distribución específica. Su símbolo se muestra en la figura 13.

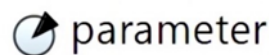


Figura 13. Icono de Parámetro

Stock: Esta variable actúa como un almacenamiento o acarreo, cuantificando la cantidad de materia que entra o sale según los flujos determinados por los elementos "Parameter". El símbolo correspondiente se puede observar en la figura 14.



Figura 14. Icono de Stock

Flow: Representa la conexión entre las variables de almacenamiento (Stocks) o fuentes de materia provenientes del entorno. El flujo a través de esta conexión está determinado por el

elemento Parameter y puede presentarse en tres configuraciones diferentes. Este símbolo alberga las ecuaciones que transforman la materia prima, determinando las concentraciones de sustancias o rendimientos de materia prima y sus respectivos desechos (figura 15).

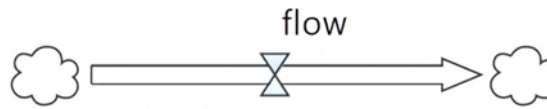


Figura 15. Icono de flujo

Link: Este símbolo se utiliza para conectar el nodo "parameter" con su correspondiente símbolo de flujo. Su función principal es asegurar que las relaciones definidas en estos símbolos se traduzcan correctamente en las ecuaciones de transformación que se aplican en cada etapa del proceso. Debido a su función de enlace, no es necesario proporcionar una descripción adicional para este símbolo dentro del modelo (figura 16).



Figura 16. Icono de Link

dynamicVariable: son elementos que representan valores que pueden cambiar a lo largo del tiempo durante una simulación (figura 17). Estas variables se utilizan para modelar dinámicas continuas en un sistema, permitiendo capturar cómo varían ciertos parámetros en respuesta a diferentes condiciones y eventos, además, Pueden estar influenciadas por otras variables, flujos y stocks dentro del modelo, facilitando la captura de relaciones de causa y efecto y ciclos de retroalimentación.

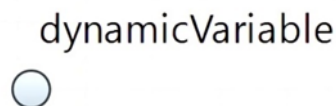


Figura 17. Icono de variable dinámica

Shadow: son referencias a variables de otros modelos o subsistemas dentro del mismo proyecto. Estas variables permiten que diferentes partes del modelo se comuniquen entre sí, facilitando la integración y la coherencia de los datos a lo largo del sistema completo. En esencia, las variables "Shadow" actúan como proxies o enlaces que permiten acceder a variables externas sin necesidad de duplicar información o reestructurar el modelo. Se pueden identificar por los símbolos "<>" al inicio y al final del nombre de la variable como se muestra en la figura 18.

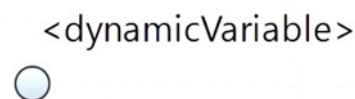


Figura 18. Icono Shadow.

2.13 Conclusiones

En conclusión, el marco teórico desarrollado en este trabajo proporciona una base sólida para el análisis de la cadena de suministro de baterías de iones de litio, integrando conceptos clave del análisis de ciclo de vida (ACV), la dinámica de sistemas y la disponibilidad de recursos en América del Norte. La revisión de la literatura sobre el ACV de las baterías permite comprender los impactos ambientales en cada etapa de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, destacando la importancia de los elementos críticos como el litio, cuya disponibilidad es estratégica para satisfacer la creciente demanda de vehículos eléctricos en la región. Además, el análisis de la cadena de suministro global y la simulación en dinámica de sistemas brindan una perspectiva integral de los posibles cuellos de botella y las dependencias de recursos, en particular en el contexto de México, que cuenta con reservas significativas de litio.

CAPITULO III ESTADO DEL ARTE

3.1 Introducción

Este capítulo tiene como objetivo proporcionar una visión exhaustiva de los estudios más relevantes y recientes en áreas como análisis de ciclo de vida (ACV) de las baterías de iones de litio y la cadena de suministro de estos dispositivos, con el fin de contextualizar y fundamentar el desarrollo de esta investigación.

En primer lugar, se revisan los artículos que han aplicado la metodología de análisis de ciclo de vida a las baterías de iones de litio. Estos estudios destacan la importancia de evaluar los impactos ambientales en cada etapa del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final, y abordan temas como las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de energía, y la generación de residuos peligrosos. La revisión de estos trabajos permite entender los enfoques metodológicos más empleados, los resultados típicos en términos de impacto ambiental, y las áreas en las que aún existen vacíos de información.

A continuación, se examina la cadena de suministro de las baterías de iones de litio, un aspecto crítico para el desarrollo de la industria de vehículos eléctricos y la transición energética. La revisión de literatura en este ámbito abarca estudios sobre la estructura global de la cadena de suministro, la dependencia de ciertos materiales y regiones, y los desafíos logísticos asociados. En particular, se pone énfasis en la relevancia de América del Norte y en la posibilidad de fortalecer una cadena de suministro regional que reduzca la dependencia de proveedores internacionales y promueva la sostenibilidad.

Este capítulo, en su conjunto, proporciona una base teórica sólida y un marco de referencia que permitirá identificar los aportes de esta tesis al cuerpo de conocimiento existente y a la comprensión de los impactos ambientales y la sostenibilidad de la cadena de suministro de baterías de iones de litio en América del Norte.

3.2 Aportaciones basadas en análisis de ciclo de vida.

(Kelly et al., 2021) En su trabajo titulado “Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries” Aplicó análisis del ciclo de vida (ACV) para evaluar el impacto ambiental y el consumo de recursos en la producción de carbonato de litio (Li_2CO_3) y monohidrato de hidróxido de litio ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$) utilizados en baterías. Los análisis abarcaron tanto fuentes de salmuera chilena como minerales de espodumeno australiano, y se extendieron a los materiales de los cátodos y las baterías completas. Los resultados indicaron que la elección de la fuente de litio influye significativamente en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), siendo la producción a partir de salmuera más favorable en términos de emisiones y consumo de agua dulce.

(Dai et al., 2019) En su estudio titulado “Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications” evalúa el uso total de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero, SO_x , NO_x , PM_{10} y el consumo de agua asociados con la producción industrial de baterías NMC (litio, níquel, manganeso y óxido de cobalto). Utilizando el análisis del ciclo de vida (ACV) en el modelo GREET, se destacan el material del cátodo activo, el aluminio y el uso de energía en la producción de celdas como principales contribuyentes a los impactos ambientales y energéticos. Se señala que estos impactos pueden variar según la ubicación geográfica y la procedencia de los materiales utilizados en la fabricación de las baterías. Además, el estudio busca armonizar los ACV existentes de las baterías de iones de litio (LIB) para automóviles y resalta diferencias en los inventarios del ciclo de vida para materiales clave, identificando áreas de conocimiento que requieren más investigación.

(Sun et al., 2020) En su trabajo “Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric Passenger vehicles” evaluó los impactos ambientales del ciclo de vida de las baterías de iones de litio (LIB) para vehículos eléctricos, identificando las etapas clave que contribuyen a la carga ambiental. Se recopilaron datos primarios de proveedores chinos de LIB, productores de materiales catódicos y corporaciones de reciclaje de baterías entre 2017 y 2019. Se consideraron seis categorías de impacto ambiental según normas ISO 14040/14044. Los resultados destacan que la etapa de preparación del material, especialmente el material activo del cátodo, el aluminio forjado y los electrolitos, es la principal contribuyente a los impactos. En la producción, el secado al vacío y el

recubrimiento y secado son procesos críticos. El reciclaje de LIB residuales al final de su vida útil puede reducir significativamente ciertos impactos. El análisis de sensibilidad muestra que reemplazar NCM622 por NCM811 como material activo podría aumentar los impactos ambientales. Este estudio busca reducir las incertidumbres en la evaluación del ciclo de vida de los LIB y señala oportunidades para mejorar su desempeño ambiental.

(Zhao & You, 2019) En su artículo “Comparative Life-Cycle Assessment of Li-Ion Batteries through Process-Based and Integrated Hybrid Approaches” realiza un análisis comparativo de los impactos ambientales del ciclo de vida de dos tipos principales de baterías de iones de litio mediante enfoques de evaluación del ciclo de vida (LCA) híbridos y basados en procesos. Los inventarios del ciclo de vida abarcan la producción de componentes, el ensamblaje, la fase de uso, la eliminación, el reciclaje y otros procesos relacionados. Se emplean 17 indicadores de impacto ambiental en el ACV basado en procesos y se destacan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el consumo de energía en el ACV híbrido integrado. Los resultados revelan que la producción de celdas de batería es el principal contribuyente a las emisiones de GEI, mientras que los sistemas económicos de entrada y salida (EIO) predominan en el consumo de energía del ciclo de vida para ambos tipos de baterías. La etapa de eliminación y reciclaje muestra diferencias significativas entre las baterías LiMn_2O_4 (LMO) y $\text{Li}(\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1})\text{O}_2$ (NCM), siendo esta última más impactante en esta fase.

(Yin et al., 2019) En su estudio titulado “Life cycle inventories of the commonly used materials for lithium-ion batteries in China” aborda la falta de inventarios del ciclo de vida (ICV) para materiales de baterías de iones de litio (LiB) producidos en China, un obstáculo en la evaluación del ciclo de vida (LCA) de vehículos eléctricos (EV) y LiB. Se estableció un modelo de proceso unitario y se recopilaron datos de fabricantes chinos de materiales LiB. Mediante simulaciones de Monte-Carlo, se obtuvieron los ICV objetivo de los materiales con intervalos de confiabilidad del 95%. Los resultados revelaron que algunos materiales, como el separador de polietileno y ciertos componentes catódicos, tienen mayores demandas de energía primaria y emisiones de gases de efecto invernadero en la etapa de la cuna a la puerta de embarque. El fosfato de hierro y litio destacó por su menor consumo de recursos minerales no renovables entre los materiales catódicos. Comparado con GREET, se observó que los consumos de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero de los materiales LiB en el estudio son significativamente más altos, con posibles discrepancias atribuibles a diferencias

en procesos de modelado y adquisición de datos. Se concluyó que la producción china de celdas LiB puede generar entre un 62% y un 91% más de emisiones de gases de efecto invernadero que la producida en los Estados Unidos para celdas de la misma capacidad.

(Pérez, 2020) realizó un análisis ambiental de todas las etapas del ciclo de vida de dichas baterías, a partir del escalado de celdas botón en Li-S producidas en laboratorio hasta una batería de 50 kWh. La metodología que se ha utilizado para calcular los impactos ambientales de las baterías es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) según las ISO 14040 y 14044:2006, los resultados obtenidos de estos análisis han servido como base para establecer un marco que permita disponer de información con el fin de determinar la viabilidad derivada de la utilización de las baterías de Li-S. Esta viabilidad no debe únicamente centrarse en la primera vida de la batería en el vehículo eléctrico, sino también su segunda vida en aplicación estacionaria y de esta manera poder seguir los principios de la Economía Circular.

(Thies et al., 2019) lleva a cabo una evaluación de los puntos críticos de sostenibilidad social de las baterías de iones de litio. La evaluación se basa en un modelo de flujo de recursos espacialmente diferenciado de la cadena de suministro. Los datos sobre los riesgos sociales con respecto al trabajo infantil, la corrupción, los tóxicos y peligros ocupacionales y la pobreza se extraen de la base de datos de puntos críticos sociales en openLCA. Los resultados de la evaluación social se discuten junto con las consideraciones ambientales y económicas para generar recomendaciones para mejorar la sostenibilidad de la cadena de suministro.

3.3 Aportaciones basadas en la cadena de suministro.

La cadena de suministro de litio abarca varias etapas clave, desde la exploración y minería, donde se extrae el litio de salmueras o depósitos de roca dura, hasta la concentración, purificación y conversión del metal. Después, se produce la conversión del litio en formas como hidróxido de litio o litio metálico. El litio se emplea en la producción de cátodos, esenciales para las baterías de iones de litio, que incluyen componentes como óxido de cobalto de litio. Finalmente, las baterías completadas se distribuyen a usuarios finales, como fabricantes de vehículos eléctricos y productos electrónicos. La complejidad de esta cadena involucra a diversas empresas y partes interesadas, desde la exploración hasta la distribución,

y destaca la importancia de prácticas sostenibles y reciclaje para abordar preocupaciones ambientales y reducir desechos.

(Sun et al., 2017) evalúa en su investigación los riesgos de los materiales relacionados con las baterías de iones de litio en las tres etapas principales de toda la cadena de suministro: minería, refinación y fabricación. Sus resultados indican que el litio y el cobalto son los materiales más críticos para la industria de la batería de iones de litio. Aseveran que los riesgos ocultos en las etapas posteriores del níquel y el manganeso tampoco deben pasarse por alto.

(Daniel Calisaya-Azpilcueta, 2020) realiza un modelo estocástico de la cadena de suministro de litio mediante la combinación de un análisis de flujo de materiales con un análisis de incertidumbre y un análisis de sensibilidad global. La combinación de estos métodos evalúa un escenario de suministro insuficiente. Las simulaciones de modelos estocásticos permiten una comparación entre la demanda conocida y la oferta calculada bajo incertidumbre, con el fin de identificar las variables más importantes que afectan la distribución de litio. Las simulaciones dinámicas muestran que el escenario más probable es aquel donde la oferta no cubre la creciente demanda, y la modelación estocástica clasifica las variables por su importancia y sensibilidad. En conclusión, las variables más importantes en un escenario de desabastecimiento de EV son el hidróxido de litio producido a partir de carbonato de litio, el hidróxido de litio producido a partir de roca sólida y la producción de baterías tradicionales.

(Xin Sun, 2020) este estudio establece un marco de análisis de flujo de materiales vinculado al comercio para analizar el flujo de litio a lo largo de su ciclo de vida a nivel nacional y el comercio internacional a nivel global. Los resultados indican que la producción mundial de litio alcanzó el equivalente de carbonato de litio de 171 kt en 2014. Chile, Australia y China desempeñaron los papeles principales en la producción de productos básicos de litio.

(Sverdrup, 2016) analiza la cadena de suministro de litio desde un enfoque de dinámica de sistemas, para ello modeló la dinámica global del suministro de litio, el precio de mercado y la duración de las cantidades extraíbles disponibles utilizando un modelo de dinámica de sistema integrado llamado LITHIUM. El análisis de los recursos extraíbles disponibles sugiere que los recursos son alrededor de 73 millones de toneladas de litio, mucho más que varias estimaciones actuales de recursos y hace énfasis en introducir nuevas políticas de recursos con un reciclaje significativamente mejorado y limitar las pérdidas irreversibles de litio en el

período 2015-2025 puede mejorar significativamente la situación del suministro de litio y potencialmente prevenir la escasez de litio antes de 2100.

(Olivetti et al., 2017) Se centra en el suministro de elementos que se encuentran en las baterías de iones de litio, con especial énfasis en los metales presentes en los materiales catódicos actuales. Explora la variación del contenido de metal en diferentes químicas catódicas. Con base en esta intensidad estimada de elementos, describe las cadenas de suministro de cada uno de estos elementos para comprender cómo podría conciliarse la oferta con la demanda futura. Luego, escala la intensidad por kWh a la demanda de cobalto en productos de uso final de baterías de iones de litio, incluidos automóviles, productos electrónicos y almacenamiento en red.

3.5 Conclusiones del estado del arte

El análisis del ciclo de vida de las baterías de iones de litio revela que, aunque estas baterías ofrecen ventajas significativas en términos de densidad energética y eficiencia, su producción y disposición final presentan desafíos ambientales importantes. Los estudios revisados destacan la necesidad de mejorar los procesos de reciclaje, la utilización de materiales críticos y la gestión de residuos para minimizar el impacto ecológico. En cuanto al flujo de materiales, se observa que la cadena de suministro de las baterías de iones de litio es compleja y globalizada, involucrando múltiples etapas desde la extracción de materias primas hasta la fabricación y distribución. La optimización de este flujo es crucial para reducir costos y mejorar la sostenibilidad del ciclo de vida de las baterías.

La dinámica de sistemas aplicada a la cadena de suministro de baterías permite modelar y simular diferentes escenarios, proporcionando una herramienta valiosa para la toma de decisiones estratégicas. Los modelos revisados en la literatura demuestran que la colaboración entre los diferentes actores de la cadena de suministro puede mejorar significativamente la eficiencia y sostenibilidad del sistema.

En resumen, el estado del arte indica que, aunque las baterías de iones de litio son una tecnología prometedora para aplicaciones energéticas, es fundamental abordar los desafíos ambientales y de gestión de la cadena de suministro para maximizar sus beneficios. La integración de enfoques de dinámica de sistemas y la mejora de los procesos de reciclaje y flujo de materiales son áreas clave para futuras investigaciones y desarrollos.

Tabla 6. Cuadro concentrado del estado del arte, aportaciones en el ACV.

Titulo	Autor	Año	Técnica	Aportación
Energy, greenhouse gas, and water LCA of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries	Kelly et al., 2021	2021	Análisis de ciclo de vida (ACV)	Evalúa el impacto ambiental y el consumo de recursos en la producción de carbonato de litio (Li_2CO_3) y mono hidrato de hidróxido de litio ($\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$)
Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications	Dai et al., 2019	2019	Análisis de ciclo de vida (ACV)	Evalúa el uso de energía, emisiones de GEI, SO_x , NO_x , PM_{10} y el consumo de agua de la producción de baterías NMC
Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric Passenger vehicles	Sun et al., 2020	2020	Análisis de ciclo de vida (ACV)	Evalúo los impactos ambientales del ciclo de vida de las baterías de iones de litio (LIB)
Comparative Life-Cycle Assessment of Li-Ion Batteries through Process-Based and Integrated Hybrid Approaches	Zhao & You	2019	Análisis de ciclo de vida (ACV)	Análisis comparativo de los impactos ambientales de dos tipos de LIB's mediante evaluación LCA híbridos.
Life cycle inventories of the commonly used materials for lithium-ion batteries in China	Yin	2019	Inventario de ciclo de vida	Aborda la falta de inventarios del ciclo de vida (ICV) para materiales de baterías de iones de litio
Análisis de Ciclo de Vida de sistemas innovadores de almacenamiento eléctrico en litio-azufre	Gabriela Benveniste Pérez	2020	Análisis de ciclo de vida (ACV)	Análisis ambiental de las etapas del ciclo de vida de las baterías de Li-S a partir del escalado de celdas botón en Li-S
Assessment of social sustainability hotspots in the supply chain of lithium-ion batteries	Christian Thies, Karsten Kieckhäfer, Thomas S. Spengler	2019	Análisis del ciclo de vida social	Identificación de puntos críticos sociales en la cadena de suministro de las baterías de litio.

Tabla 7. Cuadro concentrado del estado del arte, aportaciones en la CS de LIB's

Título	Autor	Año	Técnica	Aportación
Tracing global lithium flow: A trade-linked material flow analysis	Xin Sun, Han Hao	2017	Análisis de flujo de materiales	Determina al litio y cobalto como los materiales críticos en la CS.
Assessment of the Supply Chain under Uncertainty: The Case of Lithium	Daniel Calisaya-Azpilcueta, Sebastián Herrera-Leon,	2020	Simulación dinámica, análisis de flujo de materiales y Montecarlo	Clasificación de la importancia de las variables utilizando el filtrado de Monte Carlo (MCF)
Global Lithium Flow 1994-2015: Implications for Improving Resource Efficiency and Security	Xin Sun, Han Hao, Fuquan Zhao, Zongwei Liu,	2020	Análisis de flujo de materiales	Coeficientes de conversión de los principales productos básicos de litio
Modelling global extraction, supply, price and depletion of the extractable geological resources with the LITHIUM model	Sverdrup	2016	Dinámica de sistemas	Modelo Lithium
Modeling and Simulation of Supply Chains with AnyLogic	Beatriz Andres,	2016	Simulación, Dinámica de sistemas	Modelado y simulación de CS en Anylogic
Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottle necks in Critical Metals	Olivetti et al.	2017	Análisis de flujo de materiales	Perspectiva de la CS de LIB's

CAPITULO IV DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

4.1 Introducción

En este capítulo se detalla el desarrollo metodológico utilizado para evaluar la sostenibilidad de la cadena de suministro de baterías de iones de litio en América del Norte, integrando el análisis de ciclo de vida (ACV) con la simulación de dinámica de sistemas. En esta sección se describen los pasos necesarios para realizar el ACV de las baterías de iones de litio, lo cual incluye la recolección y caracterización de datos de impactos ambientales asociados a cada etapa del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta el ensamblaje de la batería. Posteriormente, se explica cómo estos resultados del ACV se integran en un modelo de dinámica de sistemas, desarrollado en el software AnyLogic, con el fin de simular la cadena de suministro de baterías en el contexto de América del Norte.

Esta metodología permite obtener una visión integrada de los impactos ambientales generados por la producción y disposición de las baterías, así como del comportamiento y disponibilidad de los recursos minerales críticos en la región, en distintos escenarios de demanda y crecimiento del sector.

4.2 Metodología propuesta

En la Etapa 1, se realiza el ACV de las baterías de iones de litio con un enfoque "de la cuna a la puerta", que incluye desde la extracción de materias primas hasta el ensamblaje final de la batería. En esta fase, se describen los pasos necesarios para recopilar y caracterizar los datos de los impactos ambientales asociados a cada etapa del ciclo de vida de la batería, generando una base de información detallada sobre las emisiones y el consumo de recursos.

En la Etapa 2, los resultados obtenidos en el ACV se integran en un modelo de simulación de dinámica de sistemas, desarrollado en el software AnyLogic, para simular el comportamiento de la cadena de suministro de baterías de iones de litio en América del Norte. Este modelo permite analizar los impactos ambientales generados a lo largo de la cadena, desde la refinación de minerales precursores para el material activo del cátodo hasta el ensamblaje de la batería completa.

La figura 19 muestra un diagrama que representa un enfoque sistemático que combina ACV y simulación de dinámica de sistemas (DS) para obtener una evaluación completa de la sostenibilidad de la cadena de suministro de baterías de iones de litio. La metodología se divide en diferentes etapas las cuales se describen a continuación.

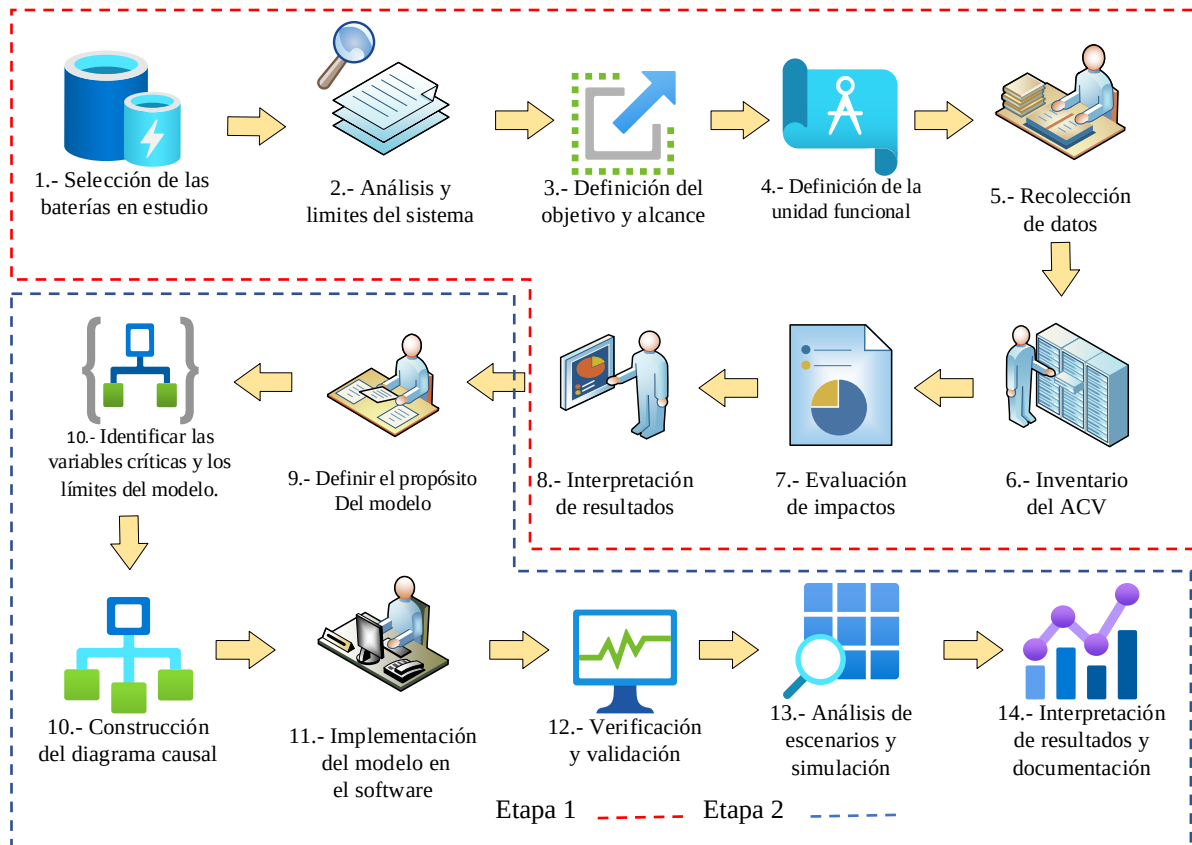


Figura 19. Diagrama de la metodología propuesta

Descripción de los pasos:

1. Selección de las baterías de estudio: Se realiza una breve revisión sobre los distintos tipos de baterías de iones de litio utilizadas en vehículos eléctricos para seleccionar las más utilizadas.
2. Análisis y límites del sistema: el ACV comprenderá desde el procesó de extracción de minerales críticos como el litio, níquel y cobalto, su posterior refinación, transformación, el proceso de fabricación de los componentes de las LIB y su ensamblaje, en cuanto a la SDS será desde la refinación de los minerales hasta el ensamblaje de las baterías.

3. Definición del objetivo y alcance: Esta fase establece los objetivos específicos del estudio, así como el alcance de la simulación de dinámica de sistemas (SDS) y del ACV en términos de las etapas del ciclo de vida de las baterías que se incluirán en el análisis.
4. Definición de la unidad funcional: para el ACV será de 1 Kg de batería y para el SDS 1 tonelada.
5. Recolección de datos: Aquí se obtienen los datos necesarios para el análisis, incluyendo la disponibilidad y extracción de recursos minerales críticos.
6. Inventario del ACV: Se recopilan y organizan los datos de inventario necesarios para el ACV, cubriendo los materiales, energía y otros recursos utilizados en cada etapa.
7. Evaluación de impactos: Se cuantifican los impactos ambientales asociados a cada etapa del ciclo de vida de las baterías, considerando indicadores relevantes como el potencial de calentamiento global y el uso de agua.
8. Interpretación de resultados: Los resultados obtenidos en la evaluación de impactos son interpretados y analizados para identificar las principales áreas de impacto ambiental.
9. Definición del propósito del modelo: escalar los impactos ambientales del ACV a la cadena de suministro completa. Esta aproximación permite simular la producción en condiciones reales, evaluar los impactos ambientales en toda la cadena de suministro y visualizar la disponibilidad de recursos críticos en la región.
10. Identificar las variables críticas y los límites del modelo: debido a que se pretende analizar si los países miembros del T-MEC tienen o no la capacidad de sostener una cadena de suministro reduciendo la dependencia externa las variables críticas del modelo serán las reservas de minerales críticos en la región, por lo que el horizonte resulta abarcar desde esta primera etapa de extracción de minerales hasta la fabricación de baterías de iones de litio para VE.
11. Construcción del diagrama causal: Se crea un diagrama causal para visualizar las relaciones entre variables clave dentro de la cadena de suministro, sirviendo como base para la modelación en dinámica de sistemas.
12. Implementación del modelo en software: El modelo de dinámica de sistemas se implementa en el software AnyLogic utilizando los datos del ACV.
13. Verificación y validación: Se lleva a cabo un proceso de verificación y validación para asegurar que el modelo refleja adecuadamente el comportamiento del sistema real.

14. Análisis de escenarios y simulación: Se ejecutan simulaciones en diferentes escenarios para evaluar el comportamiento de la cadena de suministro y la sostenibilidad a largo plazo.
15. Interpretación de resultados y documentación: Finalmente, se interpretan los resultados de las simulaciones y se documenta el análisis, proporcionando una visión integral de los impactos ambientales y la disponibilidad de recursos en la cadena de suministro de baterías de litio en América del Norte.

4.2.1 Selección de las baterías de estudio

En la actualidad, la movilidad eléctrica ha experimentado un auge sin precedentes, y los vehículos eléctricos (VE) se han convertido en una solución clave para abordar los desafíos medioambientales y energéticos del siglo XXI. En febrero de 2019, el número de vehículos eléctricos (VE) en todo el mundo superaba los 5.6 millones, marcando un incremento del 64 % en comparación con el año anterior. Las proyecciones para el año 2040 apuntan a un futuro donde los VE representarán un notable 58 % de todas las ventas globales de automóviles (Baum et al., 2022).

Las baterías de automóviles han evolucionado significativamente a lo largo de los años, y actualmente se utilizan diversas tecnologías para alimentar vehículos eléctricos, sin embargo, las baterías de iones de litio (LIB) son la tecnología de batería más ampliamente empleada. Aunque este trabajo no se enfoca en detalles específicos de tecnologías, resulta valioso realizar una breve descripción de los tipos más frecuentes de baterías de iones de litio.

Estas baterías suelen clasificarse en función del material de su cátodo, tal y como se muestra en la tabla 8 que puede ser óxido de litio, manganeso (LMO), óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC), fosfato de litio y hierro (LFP), o bien óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio (NCA) (Porzio & Scown, 2021).

Tabla 8. Battery characteristics by common lithium-ion battery chemistries.

Li-ion battery chemistry	Cathode composition	Cell-level specific energy (Wh-Kg ⁻¹)	Nominal Voltage (V)	Cycle life (Cycles)	Thermal Runaway (°C)	Shelf life (Years)
NCM	LiCo _x Mn _y Ni _{1-x-y} O ₂	140 – 200	3.7	2000+	210	8 – 10
NCA	LiAl _x Co _y Ni _{1-x-y} O ₂	200 – 250	3.6	2000+	150	8 – 10
LFP	LiFePO ₄	90 – 140	3.2	3000+	270	8 – 12
LMO	LiMnO ₄	100 – 140	3.7	1000 – 2000	250	6 – 10

En este trabajo se evalúan los impactos ambientales a través de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de dos tecnologías de baterías, la batería NCA Li-ion y la batería NCM811 Li-ion, posteriormente los resultados son utilizados en la cadena de suministro simulada en dinámica de sistemas para el cálculo de impactos ambientales en cada una de las etapas, para poder llevar a cabo esta hazaña fue necesario complementar los resultados obtenidos del ACV con la base de datos de Ecoinvent 2022 para determinar el factor de contaminación por unidad de peso de cada uno de los materiales precursores de las baterías de iones de litio NCA y NMC811.

4.2.2 Análisis y límites del sistema

Para fines de estudio de la presente tesis, se realiza una revisión de la literatura como apoyo a la estructura de esta, definir los alcances y herramientas a utilizar para evitar el duplicado de algún trabajo realizado con anterioridad a este.

El análisis del sistema comprenderá desde el proceso de extracción de litio, así como otros minerales críticos como el níquel y cobalto, su posterior refinación, transformación (véase figura 20), el proceso de fabricación de los componentes de las LIB y su ensamblaje como se muestra en la figura 21, tanto el proceso de extracción, refinación de Níquel y cobalto fueron basados en los presentados por (Schmidt et al., 2016) y en el caso del litio el diagrama está basado en los procesos presentados por (Chagnes & Światowska, s/f). En dichos diagramas se

pueden observar cuadros color verde que representan procesos, amarillos que indican materiales de entrada, así como emisiones del sistema y por ultimo los cuadros azules que representan productos, no obstante, las líneas de colores también cuentan con un significado, las de color naranja indican que productos salen del sistema, las azules los productos que entran y las líneas color negro representan el transporte de materiales.

Cabe mencionar que debido a la complejidad que representaría el incluir procesos de extracción y producción de todas las materias primas involucradas en la fabricación de LIB's solo se decidió incluir los procesos de los minerales críticos como lo son el Litio, Cobalto y Níquel debido a su escasez, amplia demanda a nivel mundial y los diferentes impactos que estos generan en diversas categorías como emisiones al aire, el huso de agua, entre otros, ya que esto ha sido puesto como tema de debate desde que se comenzó a promover el uso de LIB's como fuente de alimentación de los autos eléctricos.

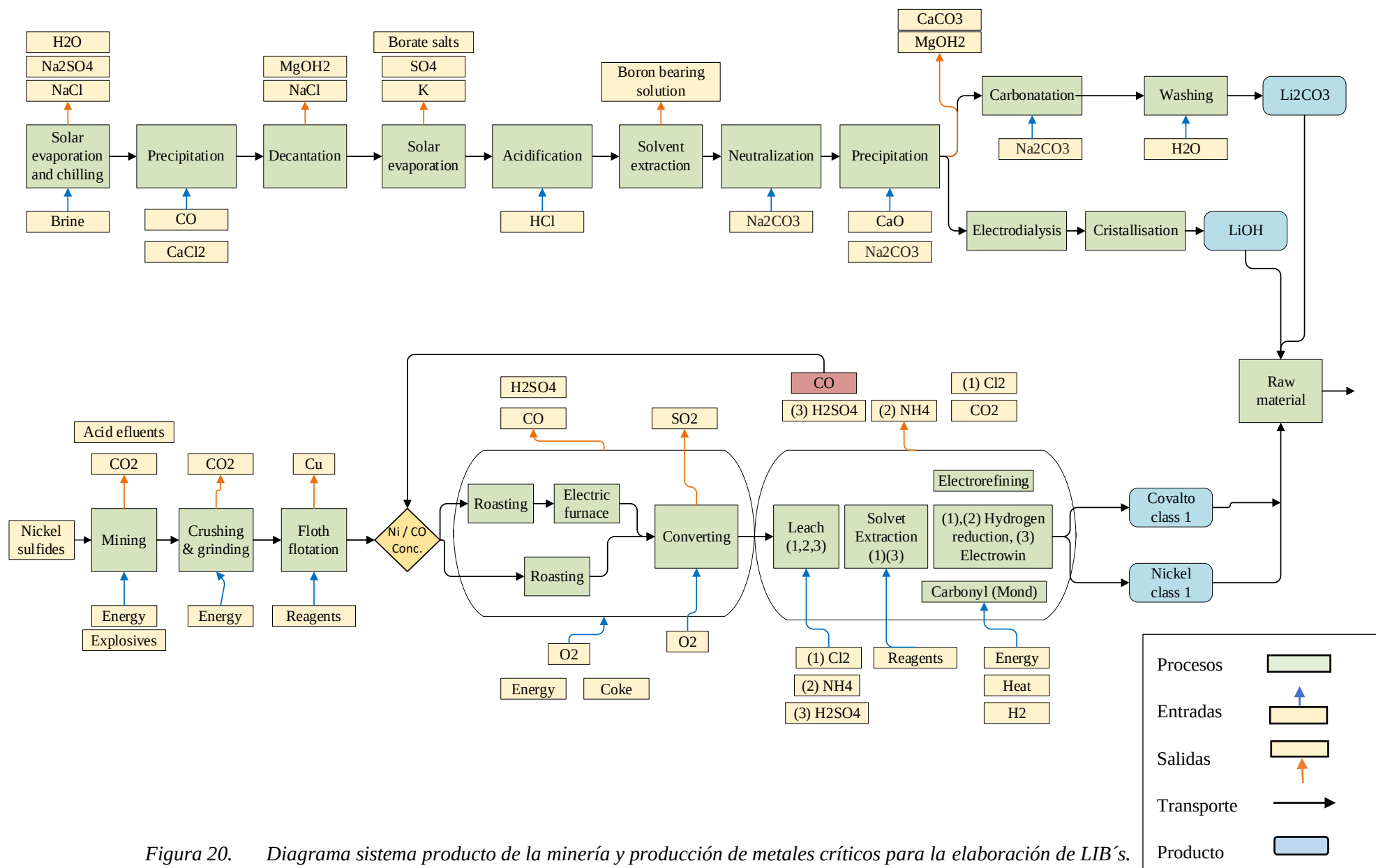


Figura 20. Diagrama sistema producto de la minería y producción de metales críticos para la elaboración de LIB's.

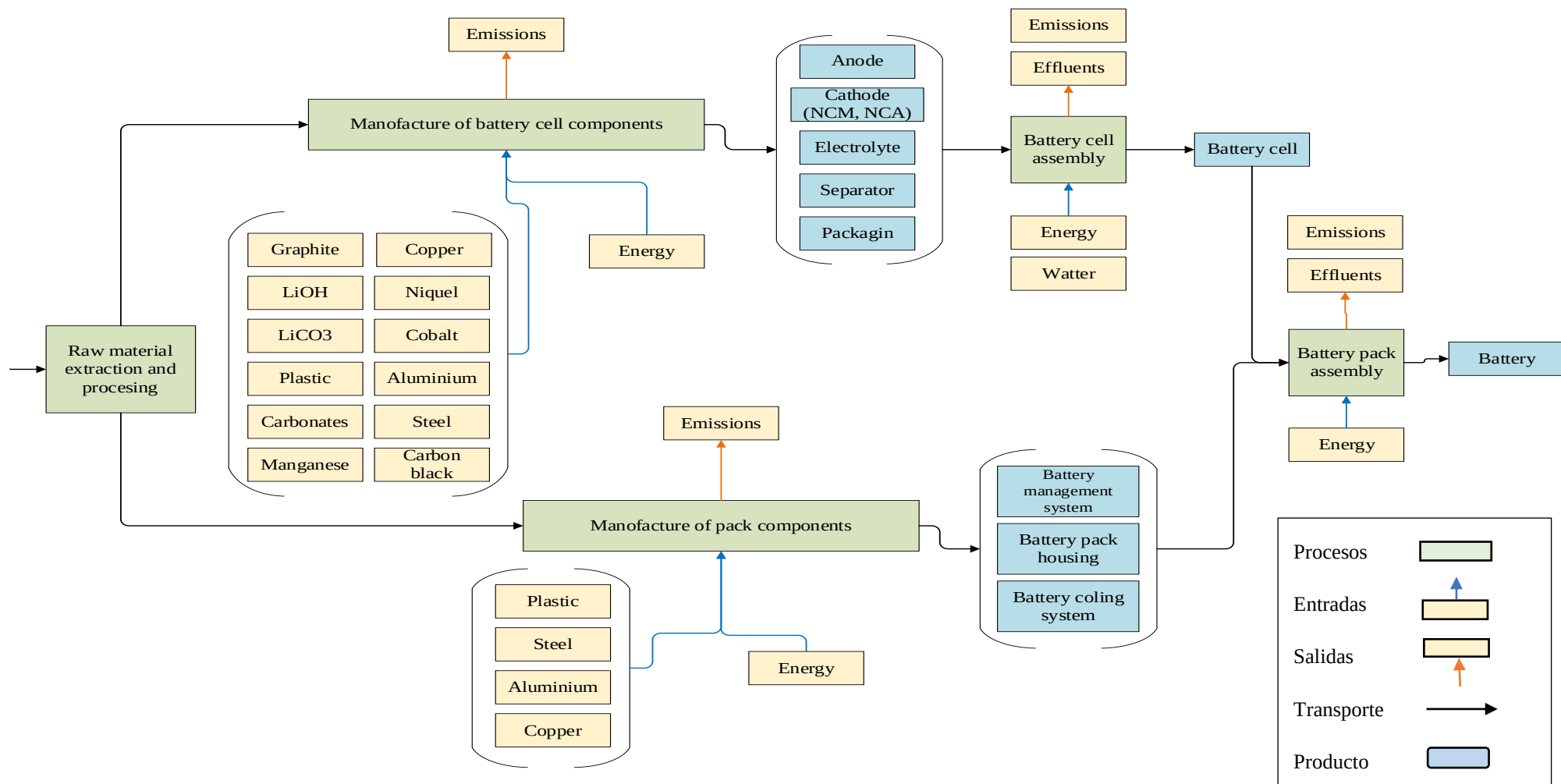


Figura 21. Diagrama sistema producto de la manufactura de baterías de iones de litio

4.2.3 Definición del objetivo y alcance

El objetivo y alcance en el análisis del ciclo de vida (ACV) implica definir el propósito y los límites del estudio. Esto determina lo que se busca lograr con el ACV y qué etapas del ciclo de vida se incluirán en el análisis. La norma ISO 14044:2006 es la norma que guía este proceso, enfatizando la importancia de definir claramente el propósito del ACV, las preguntas de investigación a responder y los usuarios a los que se dirige el estudio. También considera las limitaciones de tiempo, recursos y datos disponibles al establecer el alcance. El objetivo de este trabajo es evaluar la generación de gases de efecto invernadero y la huella hídrica utilizando inteligencia artificial. Su alcance abarcará la extracción de litio, el transporte de materiales y la energía utilizada durante la fabricación, aunque se puede considerar la inclusión o exclusión de otras etapas de la cadena de suministro de las baterías de litio. El objetivo es respaldar la toma de decisiones en esta área.

La figura 22 proporciona el límite del sistema del estudio. Este trabajo tiene como objetivo comparar el impacto ambiental de la cuna a la puerta de las LIB tipo NCA y NCM. La figura 22 representa todo el sistema de producción del LIB según (Ager-Wick Ellingsen et al., 2014b).

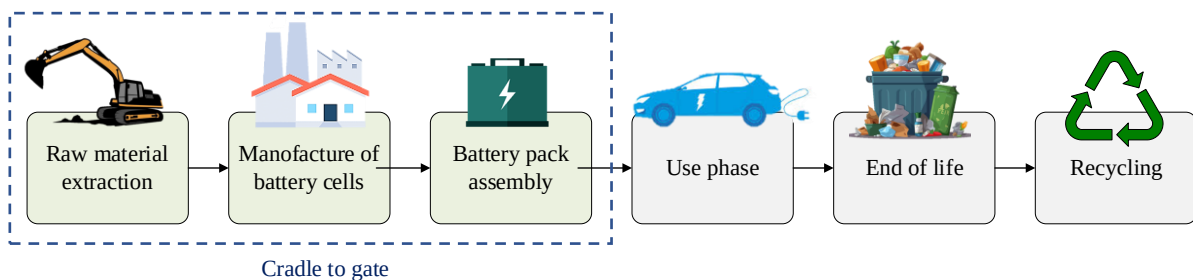


Figura 22. Límites del sistema de estudio

4.2.4 Definición de la unidad funcional (UF)

El ACV debe ejecutarse teniendo en cuenta una unidad funcional, la cual cobra especial relevancia y debe ser seleccionada con sumo cuidado si se trata de estudios de comparación. La unidad funcional es la definición cuantificada de la función del producto. Cuando se comparan dos sistemas o productos, su unidad funcional debe ser la misma para que la comparación sea válida. En la unidad funcional se establece la cuantificación de las funciones identificadas. Todos los datos del sistema (tanto consumos como emisiones) deben ir referidos a un flujo de

referencia que dé respuesta a esta unidad funcional. Además, la unidad funcional permite la comparabilidad cuando se analizan distintos sistemas. Ésta puede ser de tipo físico (una unidad de producto) o bien funcional, es decir, que vaya referida a la función que desarrollan los productos o servicios a comparar. (Pérez, 2020)

De los datos recopilados se llevará a cabo la cuantificación de los flujos de inventario en cada etapa del ciclo de vida. Esto implica determinar las cantidades de materiales y energía utilizadas, así como los residuos generados. Pueden aplicarse diversas unidades de medida, como kilogramos, litros, kilovatios-hora, etc., según la naturaleza de los flujos.

Para fines de este estudio la unidad funcional será de 1 Kg de un paquete de baterías de iones de litio tipo NCM811 y NCA para vehículos eléctricos ya que esta nos facilitará la comparación con otros estudios como los analizados por (Peters & Weil, 2018a) cuyo trabajo se centra en la unificación de los distintos inventarios de ciclo de vida y para la simulación en dinámica de sistemas la UF será de una tonelada.

4.2.5 Recolección de datos

El Inventario de Ciclo de Vida (ICV) es una herramienta fundamental en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), especialmente cuando se trata de baterías de iones de litio. Su principal objetivo es cuantificar los flujos de materiales y energía en todas las etapas de la vida útil de las baterías, desde su fabricación hasta su disposición final (Romare & Dahllöf, 2017).

Para realizar este análisis, se recurre a dos tipos de datos: los datos primarios y los datos secundarios. Los datos primarios son aquellos obtenidos directamente de los productores y usuarios de los sistemas, proporcionando información de primera mano sobre los procesos y operaciones involucrados. Por otro lado, los datos secundarios provienen de la literatura existente, incluyendo bases de datos y estudios previos. Aunque las directrices técnicas y las revisiones de la literatura recomiendan el uso de datos primarios por su mayor precisión, la mayoría de los estudios existentes recurren a información secundaria debido a su mayor accesibilidad (Temporelli et al., 2020).

En este estudio, los datos utilizados provienen principalmente de dos fuentes principales. La primera es el informe de la lista de materiales del software GREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation) (Winjobi et al., 2020a), desarrollado por el Laboratorio Nacional de Argonne y financiado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos. Este software se emplea para evaluar los impactos ambientales y la eficiencia energética de vehículos y combustibles a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final (Winjobi et al., 2020b). Además, se utilizó la base de datos Ecoinvent, una de las más ampliamente utilizadas en el ACV y la evaluación del impacto ambiental. La versión 3.9.1 de Ecoinvent proporciona una amplia gama de datos sobre procesos industriales, materiales, energía y productos, que abarcan desde la extracción de materias primas hasta la disposición final (Sonderegger, 2022).

4.2.6 Inventario de ciclo de vida

A continuación, se presenta el inventario de ciclo de vida correspondiente a la producción de 1 kg de batería para las químicas NMC811 y NCA, partiendo de un peso total de 285.7 kg para la batería NMC811 y 280.2963 kg para la batería NCA. Este inventario se enfoca en cada una de las materias primas y procesos involucrados, proporcionando una visión detallada de los insumos y emisiones a lo largo de toda la cadena de suministro, desde la extracción de materiales hasta la fabricación de la batería.

Para analizar los impactos ambientales específicos de los minerales críticos que conforman el material activo del cátodo en ambas baterías, se ha incluido información detallada de sus precursores, identificados en el inventario con la letra “P” (Ver tabla 9 y 10). Estos precursores, como el sulfato de níquel (NiSO_4) y el sulfato de cobalto (CoSO_4), representan elementos clave en la huella ambiental de cada batería debido a los recursos naturales y energía requeridos en su producción, así como a las emisiones generadas durante su extracción y procesamiento, los factores de emisiones de cada uno de estos componentes son obtenidos de la base de datos de Ecoinvent 3.9.1 (Sonderegger, 2022), los más importantes se muestran en la tabla 11.

Tabla 9. Inventario de materiales para la batería NCA

<i>Material</i>	<i>Unidad</i>	<i>valor</i>	<i>Origen</i>
Nickel sulfate ^P	Kg	0.313926729	Ecoinvent 3.9.1
Graphite	Kg	0.163541177	Ecoinvent 3.9.1
Aluminium, wrought alloy	Kg	0.145343939	Ecoinvent 3.9.1
Copper collector foil, for Li-ion battery	Kg	0.066608067	BOM Greet (2020)
Lithium hydroxide	Kg	0.062966861	Ecoinvent 3.9.1
Cobalt sulfate ^P	Kg	0.060015404	Ecoinvent 3.9.1
Ethylene carbonate	Kg	0.050524508	Ecoinvent 3.9.1
Dimethyl carbonate	Kg	0.038173879	Ecoinvent 3.9.1
Ethylene Glycol	Kg	0.023867593	Ecoinvent 3.9.1
Aluminium sulfate ^P	Kg	0.020774563	Ecoinvent 3.9.1
Lithium hexafluorophosphate	Kg	0.011861943	Ecoinvent 3.9.1
Carbon black	Kg	0.007242334	Ecoinvent 3.9.1
polyvinylfluoride	Kg	0.006628091	Ecoinvent 3.9.1
Reinforcing steel	Kg	0.006215564	Ecoinvent 3.9.1
Sheet rolling, steel	Kg	0.006215564	Ecoinvent 3.9.1
Polypropylene, granulate	Kg	0.005993656	BOM Greet (2020)
electronic component, passive, unspecified	Kg	0.004641623	Ecoinvent 3.9.1
Insulation	Kg	0.003710358	BOM Greet (2020)
Polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade	Kg	0.002127798	Ecoinvent 3.9.1
Copper, anode	Kg	0.000611531	Ecoinvent 3.9.1
Peso total	Kg	1.000	

Tabla 10. Inventario de materiales para la batería NMC 811

<i>Material</i>	<i>Unidad</i>	<i>valor</i>	<i>Origen</i>
Nickel sulfate ^P	Kg	0.310421883	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Graphite	Kg	0.1547065	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Aluminium, wrought alloy	Kg	0.141978825	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Copper collector foil, for Li-ion battery	Kg	0.070023863	BOM Greet (2020)
Lithium hydroxide	Kg	0.062545838	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Cobalt sulfate ^P	Kg	0.038862914	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Ethylene carbonate	Kg	0.057305469	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Dimethyl carbonate	Kg	0.046234446	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Manganese sulfate ^P	Kg	0.037862443	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Ethylene Glycol	Kg	0.022882816	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Lithium hexafluorophosphate	Kg	0.01345395	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Carbon black	Kg	0.006690826	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
polyvinylfluoride	Kg	0.006690826	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Reinforcing steel	Kg	0.006381741	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Sheet rolling, steel	Kg	0.006381741	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Polypropylene, granulate	Kg	0.007630312	BOM Greet (2020)
electronic component, passive, unspecified	Kg	0.004284315	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Insulation	Kg	0.00367515	BOM Greet (2020)
Polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade	Kg	0.001986145	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Copper, anode	Kg	0.000994041	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Peso total de la batería	Kg	1.000	

Tabla 11. Factores de emisión de principales materiales (Sonderegger, 2022)

<i>Material</i>	<i>Cambio climático</i>	<i>Uso de agua</i>	<i>Uso de suelo</i>	<i>Recursos minerales</i>	<i>Acidificación terrestre</i>
<i>Nickel sulfate^P</i>	8.001628184	0.713774141	0.26933783	2.317293214	0.611584374
<i>Graphite</i>	1.806187645	0.008778244	0.054224304	0.213672408	0.00736915
<i>Aluminium, wrought alloy</i>	0.61489171	0.004641958	0.037869812	0.028263857	0.007034404
<i>Copper collector foil, for Li-ion battery</i>	9.171159199	0.163430302	1.191570256	1.912021826	0.431473231
<i>Lithium hydroxide</i>	15.51472259	0.161762325	0.400533068	43.54327886	0.083684186
<i>Cobalt sulfate^P</i>	30.16392518	5.171239248	0.77693701	8.907664926	0.187374283
<i>Lithium hexafluorophosphate</i>	23.9452261	0.290714002	0.801131622	82.52993193	0.162754422

En el mismo sentido, se recopilaban datos sobre los consumos de energía eléctrica, gas natural y agua por kilogramo de batería para ambos tipos de baterías. Según (Peters & Weil, 2018a), existe una variabilidad considerable en los datos utilizados en diferentes estudios. Por lo tanto, su investigación se centró en la recopilación de diferentes inventarios de ciclo de vida para su estandarización.

Sus resultados indican un consumo de energía eléctrica de 9 Kwh/Kg y una demanda de energía calorífica de 20 MJ/Kg. Sin embargo, estos valores corresponden únicamente a la fabricación y ensamblaje de las baterías. Para incluir los datos de la extracción de materiales, se tuvo que tomar como referencia el consumo de energía eléctrica y la demanda de energía calorífica para la fabricación de cada uno de los componentes. Para ello, se utilizaron datos de Ecoinvent.

Primero, obtuvimos la energía de fabricación y ensamblaje de (Peters & Weil, 2018b) , que denotaremos como " $E_{fabricación}$ ", después se suma la energía necesaria para la fabricación de cada componente individual, multiplicada por la fracción de este componente en la batería.

Si tenemos n componentes, la energía total se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 2.} \quad E_{Total} = E_{fabricación} + \sum_{i=1}^n (E_{componente_i} * F_{componente_i})$$

Donde:

- $E_{componente_i}$ es la energía calorífica necesaria para fabricar el componente i .
- $F_{componente_i}$ es la fracción de ese componente en la batería.

Posteriormente, se aplica el mismo modelo para el cálculo de la energía eléctrica y el consumo de agua. Los resultados para ambas baterías se presentan en las tablas 11 y 12. Estos datos proporcionan una visión integral del consumo de recursos en la fabricación de baterías, incluyendo tanto la fabricación y ensamblaje de las baterías como la extracción de los materiales necesarios.

Tabla 12. Consumo de energía y agua para Batería NCA

Material	Unidad	valor	Origen
Heat, district or industrial, natural gas	MJ	23.6729639	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Electricity, medium voltage	KWh	9.70728003	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Tap water	Kg	13.1847445	Ecoinvent 3.9.1 (2022)

Tabla 13. Consumo de energía y agua para Batería NMC 811

<i>Material</i>	<i>Unidad</i>	<i>valor</i>	<i>Origen</i>
Heat, district or industrial, natural gas	MJ	23.7543681	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Electricity, medium voltage	KWh	9.72303081	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Tap water	Kg	13.275729	Ecoinvent 3.9.1 (2022)

4.2.7 Evaluación de impactos ambientales

La evaluación de impactos en el análisis de ciclo de vida (ACV) es una fase esencial para comprender y cuantificar los efectos ambientales asociados a un producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final. Este análisis permite identificar los puntos críticos en cada etapa del proceso, proporcionando información valiosa para optimizar los recursos y reducir la huella ambiental de un sistema.

En esta tesis, se utiliza la metodología ReCiPe 2016 H (Hierarchist) Midpoints, una de las metodologías más reconocidas y ampliamente aplicadas en el ACV para la evaluación de impactos ambientales. ReCiPe 2016 está diseñada para abarcar una amplia gama de categorías de impacto, incluyendo cambio climático, toxicidad, acidificación del suelo, eutrofización, y agotamiento de recursos, entre otras, organizadas en un marco jerárquico que permite analizar impactos a nivel de puntos intermedios (midpoints) y de puntos finales (endpoints) dependiendo de los objetivos del estudio. La versión "Hierarchist" (H) se selecciona en este caso debido a que representa una perspectiva moderada en la evaluación de impactos a largo plazo, buscando un equilibrio entre el riesgo de subestimar y sobrestimar ciertos impactos ambientales (Huijbregts et al., 2017).

En la figura 23, se presentan las categorías de impacto estructuradas conforme a la metodología ReCiPe 2016 H Midpoints, lo cual servirá de base para interpretar y discutir los resultados del análisis de ciclo de vida en capítulos posteriores.

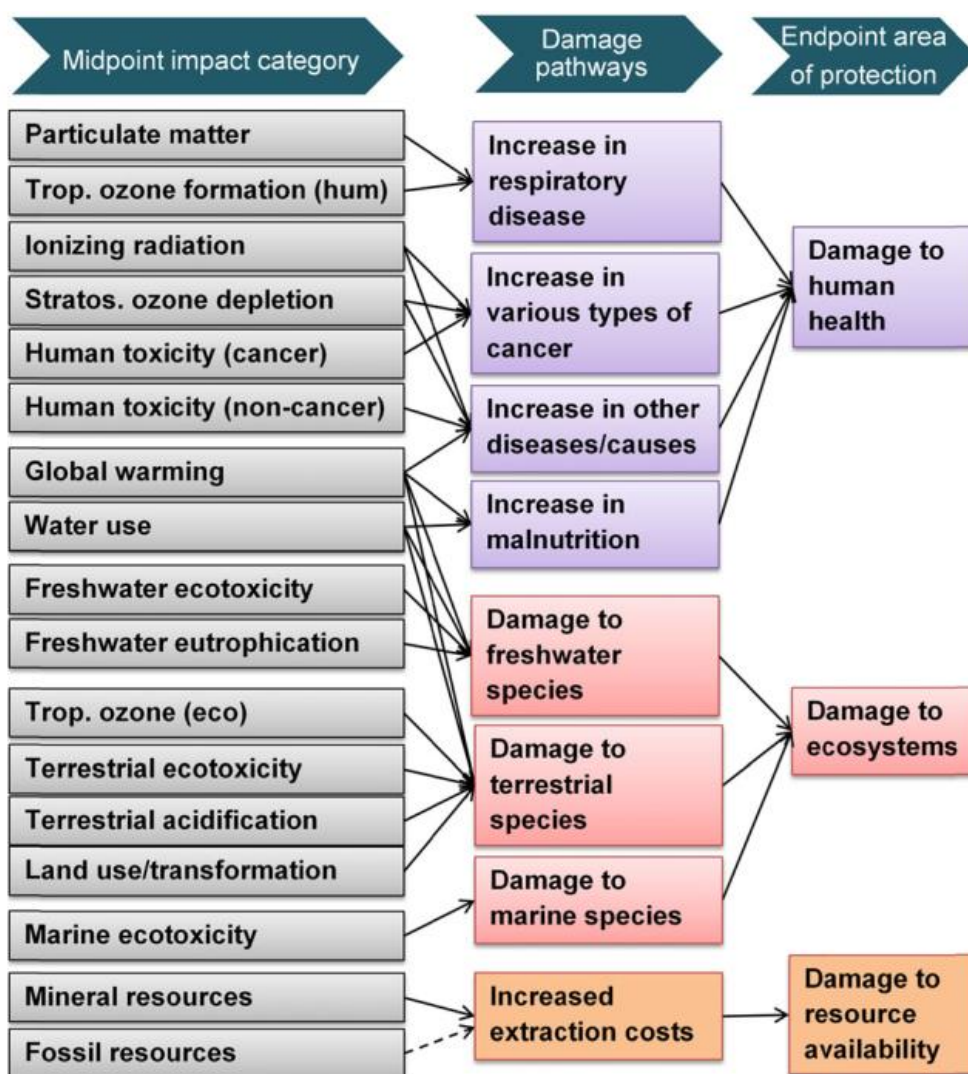


Figura 23. Descripción general de las categorías de impacto que se cubren en el método ReCiPe2016 y su relación con las áreas de protección.

La metodología ReCiPe 2016 H Midpoints organiza los impactos en una estructura jerárquica. En lugar de proporcionar un único indicador para cada categoría de impacto, utiliza varios indicadores intermedios (midpoints) que representan aspectos específicos de cada categoría. Esta estructura jerárquica permite una evaluación más detallada y específica de los impactos. (Huijbregts et al., 2017a)

Midpoints (Indicadores Intermedios): Para cada categoría de impacto, se definen indicadores intermedios específicos (midpoints) que representan aspectos particulares de esa

categoría. Las categorías de impacto y sus indicadores en el nivel medio se resumen en la tabla 14.

Tabla 14. Resumen de las categorías de impacto del punto medio

Midpoint impact category	Indicator	CF_m	Unit
<i>Climate change</i>	Infrared radiative forcing increase	Global warming potential (GWP)	kg CO ₂ -eq to air
<i>Ozone depletion</i>	Stratospheric ozone decrease	Ozone depletion potential (ODP)	kg CFC-11-eq to air
<i>Ionising radiation</i>	Absorbed dose increase	Ionising radiation potential (IRP)	kBq Co-60-eq to air
<i>Fine particulate matter formation</i>	PM _{2.5} population intake	Particulate matter formation potential (PMFP)	kg PM _{2.5} -eq to air
<i>Photochemical oxidant formation: terrestrial ecosystems</i>	Tropospheric ozone increase	Photochemical oxidant formation potential: ecosystems (EOFP)	kg NO _x -eq to air
<i>Photochemical oxidant formation: human health</i>	Tropospheric ozone population intake increase	Photochemical oxidant formation potential: humans (HOFP)	kg NO _x -eq to air
<i>Terrestrial acidification</i>	Proton increase in natural soils	Terrestrial acidification potential (TAP)	kg SO ₂ -eq to air
<i>Freshwater eutrophication</i>	Phosphorus increase in freshwater	Freshwater eutrophication potential (FEP)	kg P-eq to freshwater
<i>Human toxicity: cancer</i>	Risk increases of cancer disease incidence	Human toxicity potential (HTPc)	kg 1,4-DCB-eq to urban air
<i>Human toxicity: non-cancer</i>	Risk increases of non-cancer disease incidence	Human toxicity potential (HTPnc)	kg 1,4-DCB-eq to urban air
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	Hazard-weighted increase in natural soils	Terrestrial ecotoxicity potential (TETP)	kg 1,4-DCB-eq to industrial soil
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	Hazard-weighted increase in freshwaters	Freshwater ecotoxicity potential (FETP)	kg 1,4-DCB-eq to freshwater
<i>Marine ecotoxicity</i>	Hazard-weighted increase in marine water	Marine ecotoxicity potential (METP)	kg 1,4-DCB-eq to marine water
<i>Land use</i>	Occupation and time-integrated land transformation	Agricultural land occupation potential (LOP)	m ² × yr annual cropland-eq
<i>Water use</i>	Increase of water consumed	Water consumption potential (WCP)	m ³ water-eq consumed
<i>Mineral resource scarcity</i>	Increase of ore extracted	Surplus ore potential (SOP)	kg Cu-eq
<i>Fossil resource scarcity</i>	Upper heating value	Fossil fuel potential (FFP)	kg oil-eq

Fuente: (Huijbregts et al., 2017a)

4.2.7.1 Selección de categorías de impacto.

La selección de categorías de impacto ambiental para el análisis de ciclo de vida (ACV) de las baterías de litio utilizadas en vehículos eléctricos es un paso esencial, ya que permite

focalizar el estudio en los aspectos más críticos de su huella ambiental. En este caso, se han escogido las siguientes categorías de impacto: cambio climático, uso de agua, uso de tierra, escasez de recursos minerales, acidificación terrestre, ecotoxicidad terrestre y ecotoxicidad en agua dulce.

Estas categorías han sido seleccionadas debido a su relevancia en el contexto de la producción y uso de baterías de litio, así como por su importancia en la región de América del Norte, donde se espera que estas baterías jueguen un papel crucial en la transición hacia la movilidad eléctrica. El cambio climático se incluye debido a la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a toda la cadena de suministro. La escasez de recursos minerales y el uso de agua son particularmente relevantes dada la dependencia de minerales críticos y los recursos hídricos en el proceso de extracción y refinación.

Asimismo, la ecotoxicidad terrestre y en agua dulce permiten evaluar el potencial de daño a los ecosistemas debido a los químicos liberados en diferentes etapas del ciclo de vida de las baterías. La acidificación terrestre es también una preocupación importante, ya que puede afectar tanto la salud del suelo como los ecosistemas acuáticos cercanos. Finalmente, el uso de tierra se incluye para analizar los posibles impactos en el cambio de uso del suelo y la pérdida de hábitats.

Esta selección permite una evaluación integral y específica de los impactos ambientales de las baterías de iones de litio, alineándose con las preocupaciones de las partes interesadas y los objetivos del estudio, proporcionando una base sólida para la interpretación de resultados y la identificación de oportunidades de mejora.

4.2.8 Interpretación de resultados.

Evaluar y comunicar los resultados de la evaluación de impactos, considerando las incertidumbres y limitaciones asociadas. Esto implica analizar los puntos clave, identificar las etapas de la cadena de suministro que generan los mayores impactos y proporcionar recomendaciones para la mejora de la cadena de suministro en términos de reducción de impactos ambientales, dichos resultados pueden observarse en el capítulo 5.

4.3 Propósito del modelo de simulación en dinámica de sistemas

El propósito principal de este modelo es escalar los impactos ambientales obtenidos en el análisis de ciclo de vida (ACV) a toda la cadena de suministro de baterías de iones de litio, proporcionando así una visión integral de sus efectos en un contexto industrial y regional. Esta aproximación permite no solo simular la producción bajo condiciones cercanas a las reales, sino también evaluar de manera más precisa los impactos ambientales a lo largo de cada etapa de la cadena de suministro, desde la extracción de materias primas hasta el ensamblaje final de las baterías.

A través de esta metodología, el modelo ofrece una herramienta para identificar y cuantificar el agotamiento de recursos críticos, como el litio, cobalto y níquel, evaluando su disponibilidad en la región de América del Norte. Esto resulta especialmente relevante en el contexto del T-MEC, donde los países miembros buscan fortalecer la producción y reducir la dependencia de suministros externos. Al modelar estos procesos de manera integrada, es posible analizar las consecuencias ambientales y económicas de distintas estrategias de producción, permitiendo a los tomadores de decisiones visualizar escenarios futuros, anticipar posibles limitaciones en los recursos y establecer políticas más informadas para fomentar una cadena de suministro sostenible y resiliente en el sector de baterías para vehículos eléctricos.

4.4 Variables críticas y límites del modelo

Para evaluar si los países miembros del T-MEC (México, Estados Unidos y Canadá) cuentan con la capacidad de sostener una cadena de suministro de baterías de iones de litio y reducir así la dependencia de proveedores externos, especialmente de Asia, es esencial identificar las variables críticas y establecer límites claros para el modelo. Este análisis se enfoca en factores clave que impactan la sostenibilidad de la cadena de suministro en América del Norte, desde la disponibilidad de minerales críticos hasta la fabricación final de las baterías.

Las principales variables críticas del modelo incluyen:

- Reservas de minerales críticos en la región: Esto abarca recursos como litio, cobalto y níquel, cuya disponibilidad es esencial para sostener la producción sin recurrir a importaciones.
- Tasas de extracción y procesamiento de minerales: Representan la capacidad de la región para extraer y procesar minerales en cantidades suficientes para cubrir la demanda de la industria de baterías.
- Refinación de precursores del material activo del cátodo (MAC): Implica las etapas de refinación necesarias para obtener los precursores que formarán el MAC, una parte fundamental de la batería.
- Síntesis del material activo del cátodo (MAC): Incluye la combinación de precursores y su transformación en el material final que será utilizado en el cátodo.
- Fabricación del cátodo, celdas y ensamblaje de la batería completa: Estas etapas representan la producción progresiva de componentes de la batería, que finalmente se ensamblan para crear un producto funcional.

Además, el modelo debe considerar variables adicionales, como:

- Componentes específicos de cada etapa del proceso de fabricación, lo cual permite desglosar los insumos necesarios y analizar su disponibilidad.
- Tasas de producción anual: Estas determinan la capacidad de fabricación para cada componente, desde los materiales del cátodo hasta las baterías completas, permitiendo así evaluar la capacidad de satisfacer la demanda proyectada.

Establecer estos límites y variables es esencial para garantizar que el modelo refleje las realidades del suministro y fabricación en la región de América del Norte. Con ello, es posible no solo medir el impacto ambiental en cada fase, sino también determinar los puntos críticos en los que podrían presentarse limitaciones de recursos o cuellos de botella en el proceso de producción. Esta información es clave para identificar oportunidades estratégicas y establecer políticas industriales que fortalezcan la autonomía regional en la producción de baterías para vehículos eléctricos.

4.5 Construcción del diagrama causal

La segunda etapa de esta tesis se centra en la creación de un modelo de dinámica de sistemas para la cadena de suministro de las baterías de iones de litio (LIB) para vehículos eléctricos (EV) en el contexto del Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC). Este modelo tiene como objetivo principal calcular la cantidad de baterías que podrían producirse con los recursos disponibles en los países involucrados y evaluar los impactos ambientales, particularmente en términos de cambio climático, uso del agua y escasez de minerales críticos (Li, Ni y Co).

Construir un diagrama causal antes de realizar una simulación en dinámica de sistemas es un paso fundamental, ya que este tipo de diagrama permite representar visualmente las relaciones de causa y efecto entre las variables del sistema, en la figura 24 se muestra el diagrama elaborado previo a la simulación. Un diagrama causal actúa como un mapa para la fase de simulación al identificar las variables clave y sus relaciones este proporciona una guía para definir las ecuaciones, funciones de transferencia y parámetros que serán necesarios para desarrollar el modelo cuantitativo en un software de simulación como AnyLogic.

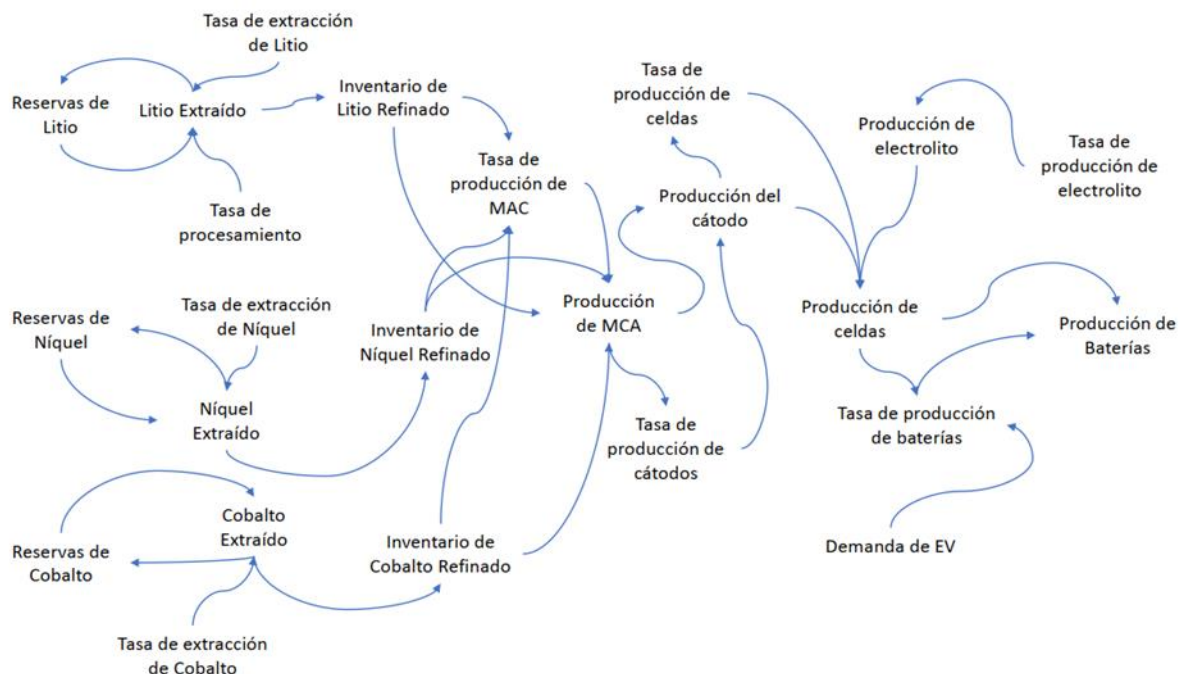


Figura 24. Diagrama causal de la cadena de suministro de LIB's

4.5.1 Modelado en dinámica de sistemas

El modelo de simulación de dinámica de sistemas es desarrollado en el software Anylogic 8.8.5, este permitirá simular y analizar las interacciones complejas y las retroalimentaciones dentro de la cadena de suministro de LIB. El modelo incluirá todos los componentes clave, desde la extracción de materias primas y la fabricación de componentes de la batería, hasta el ensamblaje final.

Uno de los principales objetivos del modelo es cuantificar la capacidad de producción de baterías de iones de litio en función de los recursos disponibles en México, Estados Unidos y Canadá. Esto incluye evaluar principalmente la disponibilidad y accesibilidad de materiales críticos como el litio, el cobalto y el níquel.

Otro objetivo clave es evaluar los impactos ambientales asociados con la producción de baterías de iones de litio. El modelo permitirá estimar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el consumo de agua a lo largo de toda la cadena de suministro. Estas estimaciones son cruciales para entender los posibles efectos del aumento en la producción de LIB en el cambio climático y los recursos hídricos, y para identificar oportunidades de mitigación y mejora en los procesos de producción.

4.6 Implementación del modelo en el software

Para fundamentar este modelo, se investigaron diversos proyectos en los países involucrados en el T-MEC que involucra a México, Estados Unidos y Canadá. Estos países han sido seleccionados debido a sus estrechas relaciones comerciales, significativas reservas y capacidades de producción de los materiales mencionados para sustentar una cadena de suministro de EV que resulte competitiva para el creciente mercado oriental. Entre los proyectos más relevantes para la extracción de níquel y cobalto se incluyen el Baptiste Nickel Project, el Crawford Nickel Sulphide Project y el Turnagain Nickel Project. En cuanto al litio, se consideró el proyecto Sonora Lithium.

Cabe destacar que la cadena de suministro que se planteó de acuerdo al trabajo de (Pesaran et al., 2023) ya que cuenta con una base de datos de los diferentes proyectos que se tienen planificados y algunos que ya se encuentran en operación para sustentar la cadena de

suministro de baterías de iones de litio para EV en todo el continente. En la figura 25 se pueden observar los proyectos contemplados para sustentar la cadena de suministro entre los países que conforman el T-MEC.

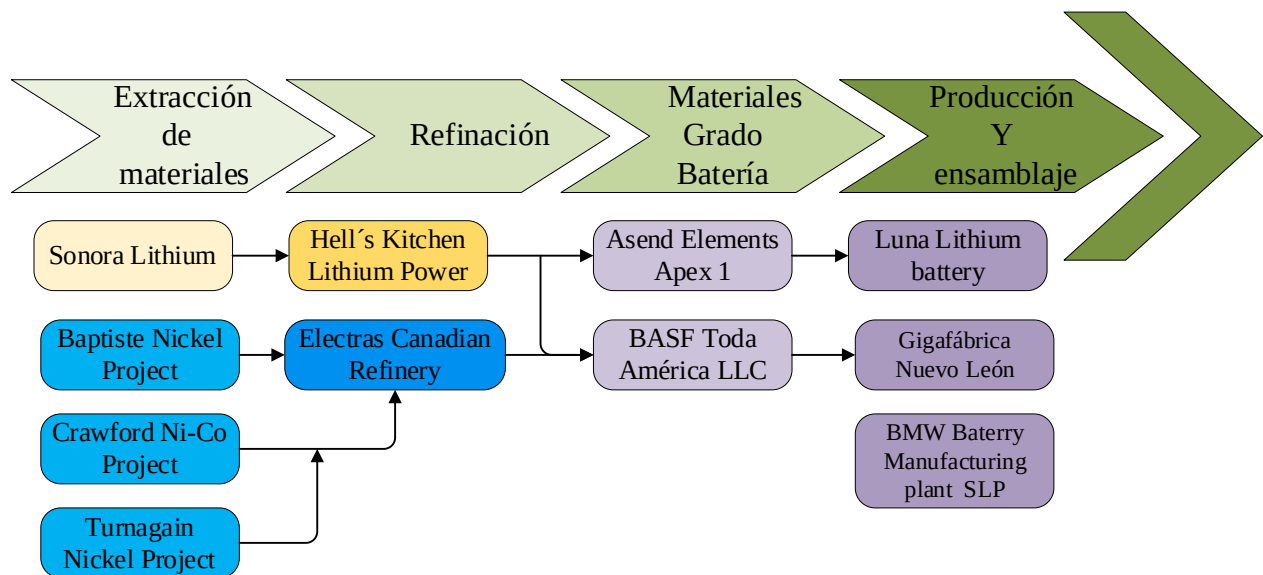


Figura 25. Resumen de proyectos para sustentar la cadena de suministro en NA.

Es importante destacar que estos proyectos son solo una muestra de los muchos proyectos que se encuentran planificados para asegurar la cadena de suministro de baterías de iones de litio en América del Norte. No obstante, no representan la totalidad de los recursos disponibles en el continente, sino que sirven para ilustrar cómo la disponibilidad de estos materiales puede influir en la capacidad de producción de baterías.

Este enfoque permite una comprensión detallada de las dinámicas involucradas en la cadena de suministro, desde la extracción de materias primas hasta la fabricación final de baterías, proporcionando una visión integral y estratégica que puede ser utilizada para tomar decisiones informadas en la gestión y planificación de recursos críticos para la industria de vehículos eléctricos.

4.7 Extracción de materias primas

Como se mencionó previamente, en esta sección del modelo se recopilamos datos de diversos proyectos relacionados con la extracción de minerales críticos utilizados en la fabricación de baterías de iones de litio para vehículos eléctricos. Estos datos incluyen estimaciones de reservas minerales, el tiempo de vida de los proyectos y los porcentajes de contenido de minerales reportados por las empresas encargadas de llevar a cabo dichos proyectos [(Lane et al., 2023), (Murray et al., 2023), (Ausenco Services Pty Ltd, 2018), (Giga Metals Corporation, 2022)]. La unidad utilizada para estas estimaciones fue la tonelada, y para el período de simulación en el software AnyLogic se utilizan años, de esta forma se podrá visualizar de forma anual el consumo de recursos y la generación de impactos ambientales de acuerdo a cada uno de los 5 escenarios. Las ecuaciones que representan las relaciones dinámicas entre variables correspondientes a extracción de materias primas se muestran a continuación.

$$\text{Ecuación 3.} \quad \frac{d(\text{Inventario de Litio Refinado})}{dt} = \text{Tasa de procesamiento} \times \text{Litio Extraído}$$

$$\text{Ecuación 4.} \quad \frac{d(\text{Inventario de Níquel Refinado})}{dt} = \text{Tasa de procesamiento} \times \text{Níquel Extraído}$$

$$\text{Ecuación 5.} \quad \frac{d(\text{Inventario de Cobalto Refinado})}{dt} = \text{Tasa de procesamiento} \times \text{Cobalto Extraído}$$

4.7.1 Submodelo “Crawford Nickel Sulphide Project”

El proyecto de sulfuro de níquel Crawford, ubicado en Ontario, Canadá, está siendo desarrollado por Canada Nickel Company (CNC), una empresa de exploración especializada en níquel. Se prevé que Crawford se encuentre entre las cinco operaciones de sulfuro de níquel más grandes del mundo, suministrando níquel tanto a fabricantes de acero inoxidable como a la industria de baterías para vehículos eléctricos.

La vida útil proyectada para Crawford es de 25 años. Los recursos totales medidos e indicados del proyecto ascienden a 1715 millones de toneladas (Mt) con un porcentaje de Níquel de 0.22%. Además, se estima que el proyecto contiene 1.06 millones de onzas de

paladio y platino, 8.5 millones de toneladas de cromo, 183,000 toneladas de cobalto y 93.9 millones de toneladas de hierro, en la siguiente figura se muestra la representación del submodelo en dinámica de sistemas (Lane et al., 2023), en la figura 26 se observa el submodelo construido para representar este proyecto.

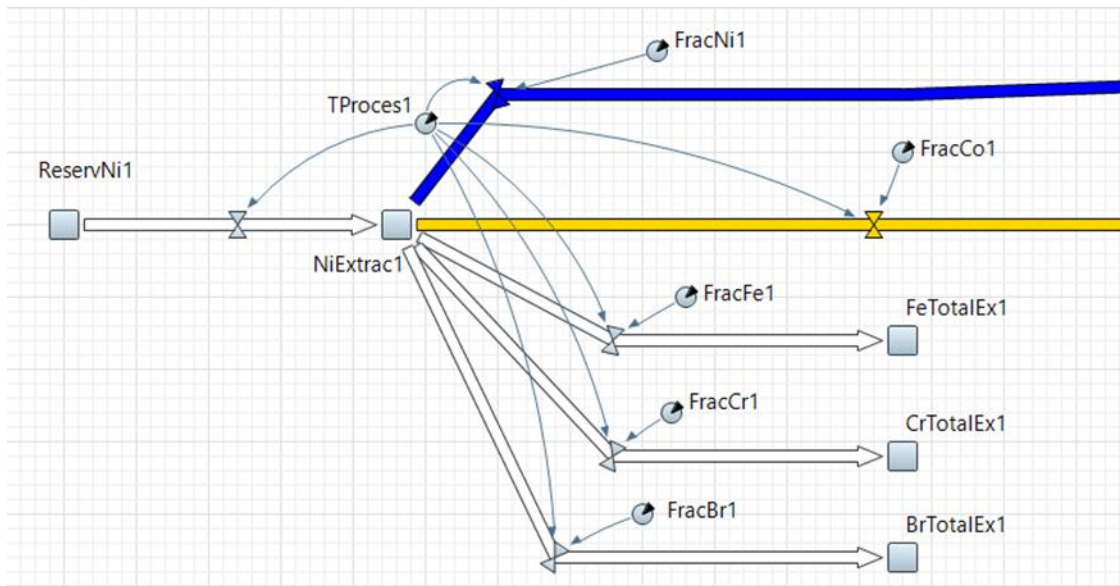


Figura 26. Submodelo “Crawford Nickel Sulphide Project”

Donde:

- **ReservasNi1:** Es el Stock que representa la totalidad de reservas de mineral el cual al llegar al año 25 debe ser reducido a 0.
- **TProces1:** Es el parámetro que representa la capacidad de procesamiento anual.
- **NiExtrac1:** Representa la cantidad acumulada de reservas extraídas.
- **FeTotalEx1:** Es la cantidad extraída acumulada de mineral de Hierro concentrado.
- **CrTotalEx1:** Es la cantidad extraída acumulada de mineral de Cromo concentrado.
- **BrTotalEx1:** Es la cantidad extraída acumulada de mineral de Brucita concentrada.
- **FracNi1:** Representa el porcentaje de Níquel contenido en las reservas.
- **FracCo1:** Representa el porcentaje de Cobalto contenido en las reservas.
- **FracFe1:** Representa el porcentaje de Hierro contenido en las reservas.
- **FracCr1:** Representa el porcentaje de Cromo contenido en las reservas.
- **FracBr1:** Representa el porcentaje de Brucita (que es un mineral de hidróxido de magnesio) contenido en las reservas.

En cuanto al mineral de níquel y cobalto extraídos estos son dirigidos a un “Stock” donde se acumularán junto con los obtenidos de los demás proyectos.

4.7.2 Submodelo “Baptiste Nickel Project”

El proyecto de níquel Baptiste es un proyecto minero a cielo abierto en la Columbia Británica que está siendo desarrollado por FPX Nickel, una empresa minera de níquel con sede en Vancouver, Canadá. En septiembre de 2023 se completó un estudio de prefactibilidad (PFS) para el proyecto. El costo de capital inicial estimado para el desarrollo del proyecto es de 2.180 millones de dólares, mientras que la vida útil esperada de la minería es de 29 años.

Las reservas probadas y probables en el proyecto de níquel Baptiste se estiman en 1,48 toneladas (t), con un porcentaje de níquel de 0.2012% así como también cobalto y Hierro. en la figura 27 se muestra la representación del submodelo en dinámica de sistemas.(Murray et al., 2023)

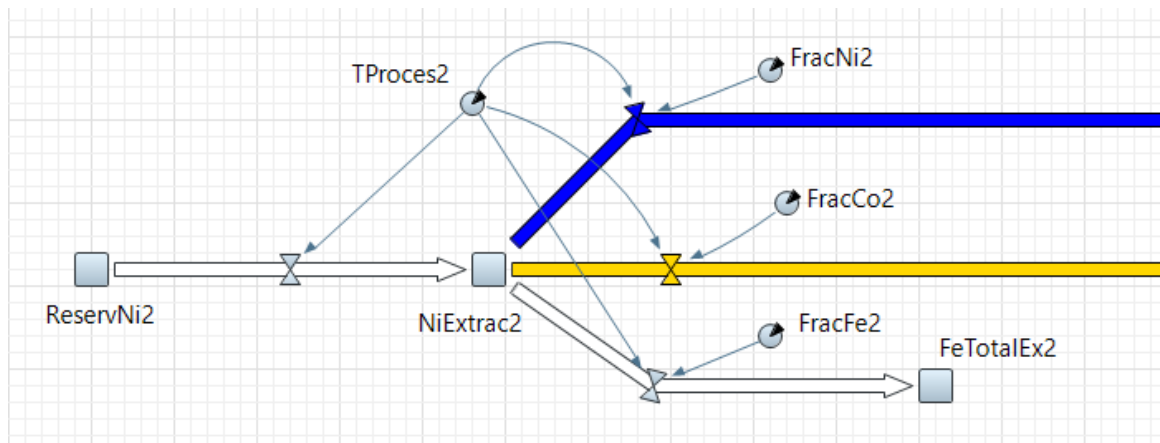


Figura 27. Submodelo “Baptiste Nickel Project”

Donde:

- **ReservasNi2:** Es el Stock que representa la totalidad de reservas de mineral el cual al llegar al año 29 debe ser reducido a 0 por el Slider llamado Año 29A
- **TProces2:** Es el parámetro que representa la capacidad de procesamiento anual.
- **NiExtrac2:** Representa la cantidad acumulada de reservas extraídas.
- **FeTotalEx2:** Es la cantidad extraída acumulada de mineral de Hierro concentrado.
- **FracNi2:** Representa el porcentaje de Níquel contenido en las reservas.

- FracCo2: Representa el porcentaje de Cobalto contenido en las reservas.
- FracFe2: Representa el porcentaje de Hierro contenido en las reservas.

Al igual que en el submodelo anterior el mineral de níquel y cobalto extraídos estos son dirigidos a un “Stock” donde se acumularán junto con los obtenidos de los demás proyectos.

4.7.3 Submodelo Turnagain Nickel Project

El Proyecto Turnagain, ubicado en el centro-norte de la Columbia Británica, en el territorio tradicional de Tahltan y Kaska Dena, es uno de los depósitos de sulfuro de níquel sin desarrollar más grandes del mundo. Los recursos minerales reportados en octubre de 2022 se han actualizado a través de modelos revisados se estima que la reserva total asciende a 1,163.8 Mt, con un contenido de Níquel del 0.206% y 0.012% de cobalto, así como también Platino y Paladio, se estima que la vida útil esperada de la minería es de 30 años. En la figura 28 se muestra la representación del submodelo en dinámica de sistemas (Giga Metals Corporation, 2022).

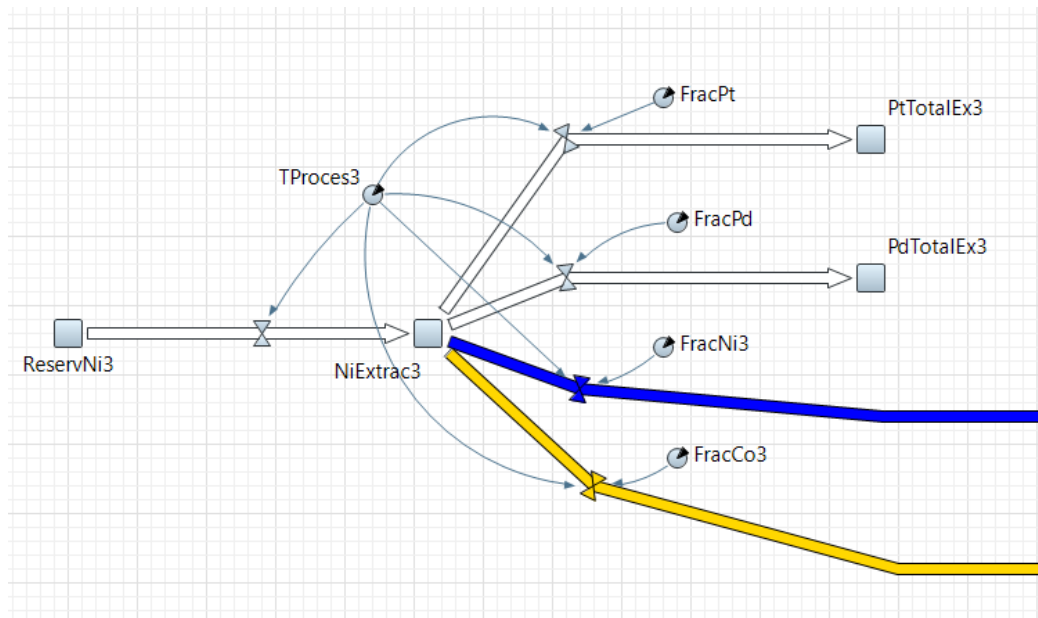


Figura 28. Submodelo Turnagain Nickel Project

Donde:

- ReservasNi3: Es el parámetro que representa la totalidad de reservas de mineral.

- TProces3: Es el parámetro que representa la capacidad de procesamiento anual.
- NiExtrac3: Representa la cantidad acumulada de reservas extraídas.
- PtTotalEx3: Es la cantidad extraída acumulada de mineral de Platino concentrado.
- PdTotalEx3: Es la cantidad extraída acumulada de mineral de Paladio concentrado.
- FracNi2: Representa el porcentaje de Níquel contenido en las reservas.
- FracCo2: Representa el porcentaje de Cobalto contenido en las reservas.
- FracPt: Representa el porcentaje de Platino contenido en las reservas.
- FracPd: Representa el porcentaje de Paladio contenido en las reservas.

Al igual que en el submodelo anterior el mineral de níquel y cobalto extraídos estos son dirigidos a un “Stock” donde se acumularán junto con los obtenidos de los demás proyectos, estos se pueden visualizar en la figura 37 que muestra el submodelo de extracción de materiales en su totalidad.

4.7.4 Submodelo Sonora Lithium

El proyecto de litio Sonora ubicado en Sonora, México, se ubica aproximadamente a 11 km de la ciudad de Bacadehuachi y a 170 km de la frontera entre Estados Unidos y México. Está desarrollando como una mina a cielo abierto con una operación planificada en dos etapas. La etapa 1 tendrá una duración de cuatro años con una capacidad de producción anual de aproximadamente 17.500 toneladas de carbonato de litio, mientras que la etapa 2 aumentará la producción a 35.000 toneladas por año.

A enero de 2018, las reservas probadas y probables de mineral en Sonora se estimaron en 244 millones de toneladas, con una ley de 3,480 ppm de Li y 1.45% de potasio. Se estima que la mina contiene 4,5Mt de carbonato de litio equivalente (LCE). El proyecto minero también está diseñado para producir hasta 28.800tpa de sulfato de potasio (K_2SO_4), para la venta a la industria de fertilizantes (Ausenco Services Pty Ltd, 2018). En la figura 29 se muestra la representación del submodelo en dinámica de sistemas.

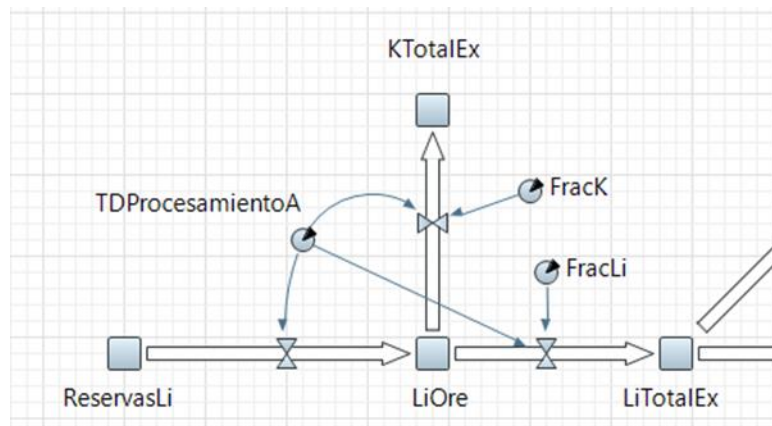


Figura 29. Submodelo Sonora Lithium

Donde:

- ReservasTotales: Es el stock que representa la totalidad de reservas de mineral el cual al llegar al año 19 debe ser reducido a 0.
- ProcesamientoA: Es el parámetro que representa la capacidad de procesamiento anual.
- LiOre: Representa la cantidad acumulada de reservas extraídas anualmente.
- LiTotalEx: Es la cantidad extraída acumulada de Carbonato de litio concentrado.
- FracLi: Representa el porcentaje de Litio contenido en las reservas extraídas de mineral.
- KTotalEx: Es la cantidad extraída acumulada de Potasio concentrado.
- FracK: Representa el porcentaje de Potasio contenido en las reservas extraídas de mineral.

Finalmente, en la figura 30 se puede apreciar en su totalidad primera sección del modelo la cual representa la extracción de minerales críticos para la elaboración de baterías de iones de litio tomando en cuenta las reservas estimadas en los proyectos mineros de mayor escala entre los países involucrados en el T-MEC.

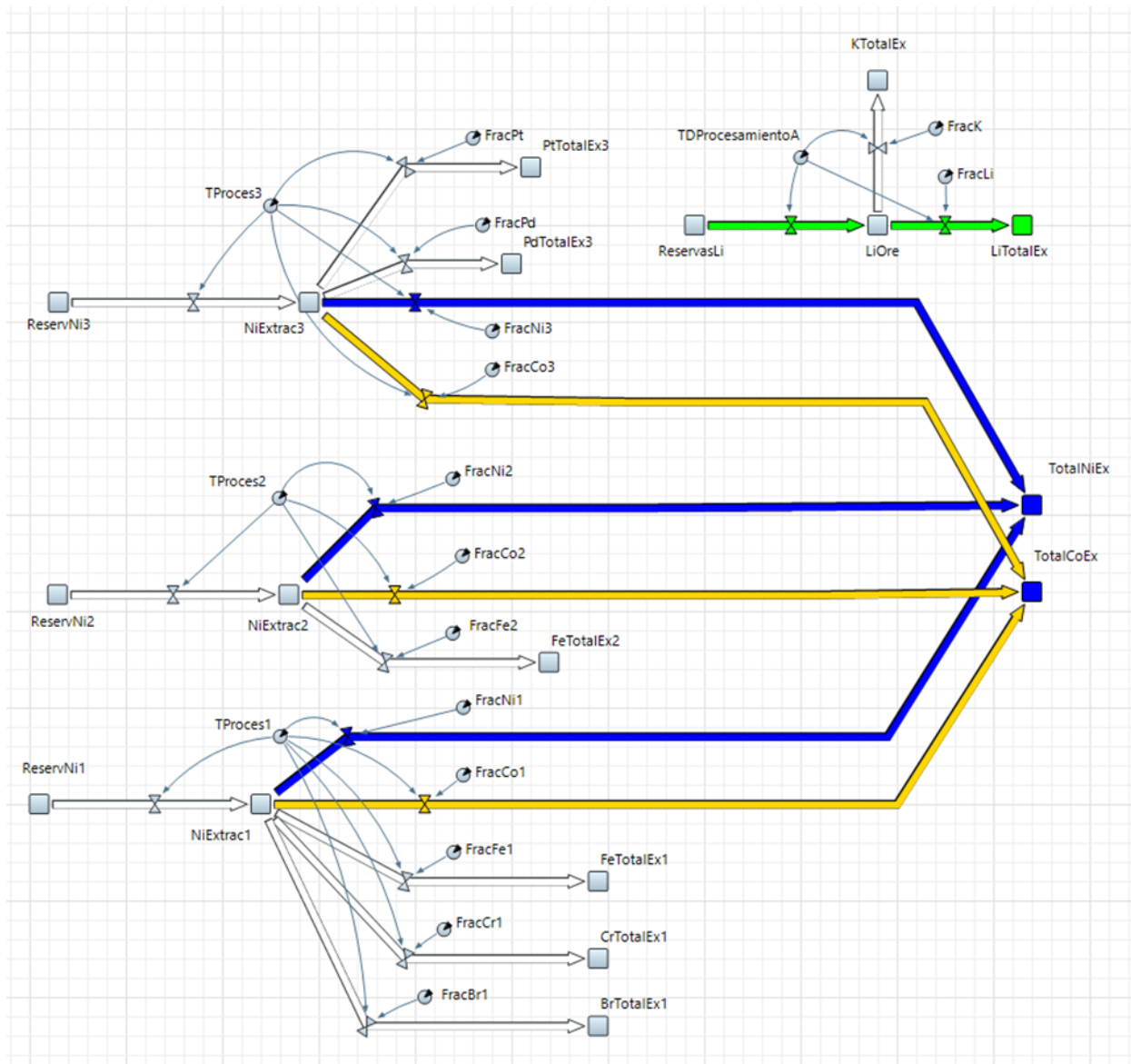


Figura 30. Sección de modelo extracción de materiales

A manera de resumen y como complemento a la información anteriormente proporcionada en las tablas 15 y 16 se muestra información condensada de los proyectos mineros en los que se sustenta la información utilizada en la etapa de extracción de materias primas.

Tabla 15. Reservas y extracción de minerales por proyecto

Proyecto	Reservas de Mineral (T)	Capacidad de procesamiento (T/A)	Vida del proyecto (Y)
Crawford Nickel Sulphide Project	1715000000	68600000	25
Baptiste Nickel Project	1487721000	51300724.14	29
Turnagain Nickel Project	1163800000	38793333.33	30
Sonora Lithium	243808000	12832000	19

Fuente:(Giga Metals Corporation, 2022), (Lane et al., 2023), (Murray et al., 2023) y (Ausenco Services Pty Ltd, 2018).

Tabla 16. Contenido total de minerales críticos en las reservas

Proyecto	%Li	%Ni	%Co	%Fe	%Pd	%Pt	%Cr	%Br
Crawford Nickel Sulphide Project	-	0.22	0.013	6.44	0.014	0.009	0.57	1.61
Baptiste Nickel Project	-	0.212	0.012	2.55	-	-	-	-
Turnagain Nickel Project	-	0.206	0.012	-	0.016	0.018	-	-
Sonora Lithium	1.8519	-	-	-	-	-	-	-

Fuente:(Giga Metals Corporation, 2022), (Lane et al., 2023), (Murray et al., 2023) y (Ausenco Services Pty Ltd, 2018).

4.8 Refinación para la obtención de precursores del material activo del cátodo.

Para esta etapa se toman los datos de la etapa anterior como lo son las toneladas de mineral concentrado extraído y se someten a una refinación en el caso del litio este será dividido en dos partes para la producción de hidróxido de litio y hexafluorofosfato de litio, las fracciones destinadas a cada compuesto dependerá del tipo de batería que se desee fabricar, para el caso del Níquel y Cobalto se sumaran las toneladas de mineral concentrado extraído de los 3

diferentes proyectos contemplados, esto nos dará la suma total en toneladas, este valor será multiplicado por una tasa de recuperación o eficiencia de refinación la cual estará definida por una distribución triangular ya que esta puede variar dependiendo de distintos factores.

Al final de este proceso lo que obtendremos será un total de materiales precursores para la fabricación del material activo del cátodo, es decir, el óxido de NMC811 y NCA (Ver fig. 31). Cabe recalcar que las proporciones de utilización de los precursores varía de un tipo de batería a otro ya que estas son distintas, la sección del modelo en dinámica de sistemas se muestra en la siguiente figura. Las ecuaciones que representan las relaciones dinámicas entre variables se presentan a continuación.

Los inventarios de litio, níquel y cobalto refinado disminuirán a medida que se utilizan en la producción de MAC.

$$\text{Ecuación 6.} \quad \frac{d(\text{Inventario de Litio Refinado})}{dt} = -\text{Tasa de producción de MAC} \times \alpha \text{ Litio}$$

$$\text{Ecuación 7.} \quad \frac{d(\text{Inventario de Níquel Refinado})}{dt} = -\text{Tasa de producción de MAC} \times \alpha \text{ Níquel}$$

$$\text{Ecuación 8.} \quad \frac{d(\text{Inventario de Cobalto Refinado})}{dt} = -\text{Tasa de producción de MAC} \times \alpha \text{ Cobalto}$$

Donde α representa la proporción de cada elemento requerido en la producción de MAC.

La tasa de producción de MAC depende de la disponibilidad de los inventarios refinados.

$$\text{Ecuación 9.} \quad \text{Tasa de producción de MAC} = f(\text{Inventario de Litio Refinado}, \\ \text{Inventario de Níquel Refinado}, \text{Inventario de Cobalto Refinado})$$

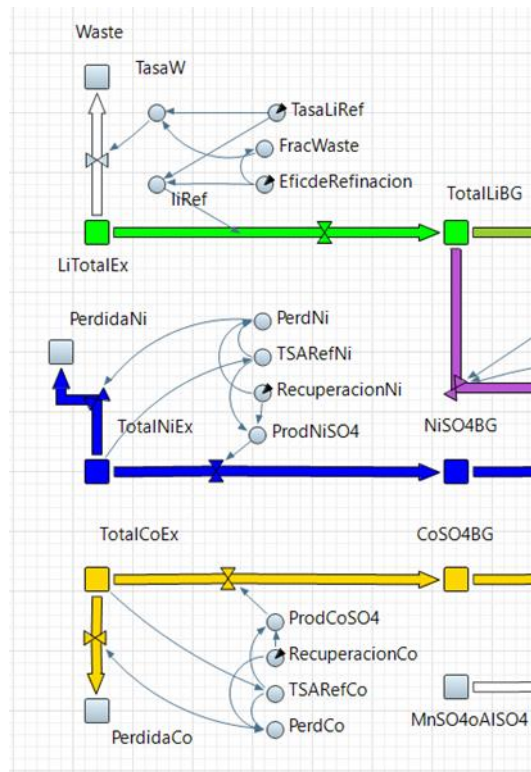


Figura 31. Submodelo refinación para la obtención precursores del material activo del cátodo.

Donde:

- TotalNiEx: Representa la cantidad extraída acumulada de mineral de Níquel concentrado correspondiente a los 3 proyectos mineros antes mencionados.
- TotalCoEx: Es la cantidad extraída acumulada de mineral de Cobalto concentrado correspondiente a los 3 proyectos mineros antes mencionados.
- LiTotalEx: Es la cantidad extraída acumulada de mineral de litio concentrado del proyecto Sonora Lithium.
- RecuperacionNi: Corresponde a la eficiencia de refinación dada por una distribución triangular que va del 96% al 99%.
- RecuperacionCo: Corresponde a la eficiencia de refinación dada por una distribución triangular que va del 78% al 90%.
- EficdeRefinacion: Corresponde a la eficiencia de refinación de mineral de litio determinada por una distribución triangular que va del 83% al 90%.
- TSARefNi: Corresponde a la tasa de recuperación de sulfato de níquel.
- TSARefCo: Corresponde a la tasa de recuperación de sulfato de cobalto.
- TasaLiRef: Es la tasa de refinación anual de mineral de litio
- ProdNiSO4: Es la cantidad de sulfato de níquel producida.
- ProdCoSO4: Es la cantidad de sulfato de cobalto producida.
- liRef: Es la cantidad real de litio obtenida después de la refinación.

- PerdNi: Es la cantidad de mineral de níquel que se desperdicia durante el proceso de refinación.
- PerdCo: Es la cantidad de mineral de cobalto que se desperdicia durante el proceso de refinación.
- Fracwaste: Es la cantidad de mineral de litio que se desperdicia durante el proceso de refinación.
- NiSO4BG: Es la cantidad de sulfato de níquel grado batería obtenido.
- CoSO4BG: Es la cantidad de sulfato de cobalto grado batería obtenido.
- TotalLiBG: Es la cantidad de litio grado batería obtenido.

4.9 Submodelo para la fabricación del material activo del cátodo

Este submodelo de dinámica de sistemas está diseñado para representar el proceso de fabricación del material activo de cátodo para baterías de iones de litio, con un enfoque en las químicas NMC 811 (Níquel, Manganeso y Cobalto en una proporción de 8:1:1) y NCA (Níquel, Cobalto y Aluminio). Su principal objetivo es calcular la cantidad de material activo del cátodo, ya sea óxido NMC 811 o NCA, que puede producirse tomando en cuenta la disponibilidad de recursos críticos como níquel, cobalto y litio. Sin embargo, debido a la limitada información específica disponible sobre los procesos involucrados en la obtención de óxido, se optó por utilizar principios estequiométricos para estimar la cantidad requerida de cada mineral crítico. A continuación, se presentan los cálculos realizados para este propósito.

4.9.1 Sulfato de níquel necesario para producir 1 kg de óxido de NCA

La cantidad de $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ necesaria para obtener un kilogramo de óxido de NCA tomando en cuenta que el níquel (Ni) representa el 84% de los sitios de transición metálica, el cobalto (Co) el 12%, y el aluminio (Al) el 4%.

Para calcular la masa molar del compuesto $\text{Li}(\text{Ni}_{0.84}\text{Co}_{0.12}\text{Al}_{0.04})\text{O}_2$, sumamos las masas molares de cada elemento:

- Níquel (Ni): $0.84 \text{ moles} \times 58.69 \text{ g/mol} = 49.30 \text{ g}$
- Cobalto (Co): $0.12 \text{ moles} \times 58.93 \text{ g/mol} = 7.07 \text{ g}$
- Aluminio (Al): $0.04 \text{ moles} \times 26.98 \text{ g/mol} = 1.08 \text{ g}$
- Oxígeno (O_2): $2 \text{ moles} \times 16.00 \text{ g/mol} = 32.00 \text{ g}$
- Litio (Li): $6.94 \text{ g/mol} \times 1 \text{ g/mol} = 6.94.00 \text{ g}$

$$\text{Masa molar} = 49.30(\text{Ni}) + 7.07(\text{Co}) + 1.08(\text{Al}) + 32.00(\text{O}) + 6.94 = 96.39\text{g/mol}$$

Ahora, calculamos cuántos moles de óxido de NCA hay en 1 kilogramo (1000 g):

$$\text{Ecuación 10. Moles de NCA en 1 kg} = \frac{1000\text{g}}{96.39\text{g/mol}} = 10.3745 \text{ moles de NCA}$$

El 84% de los sitios de transición metálica están ocupados por níquel, lo que significa que hay 0.84 moles de níquel por mol de NCA. Ahora calculamos cuántos moles de níquel hay en total en 1 kg de NCA:

$$\text{Ecuación 11. Moles de Ni} = 0.84 \times 10.3745 = 8.7145 \text{ moles de níquel}$$

El sulfato de níquel hexahidratado tiene la fórmula $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y su masa molar es 262.84 g/mol. Cada mol de $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ contiene 1 mol de níquel. Para obtener 8.7145 moles de níquel, necesitamos la misma cantidad de moles de $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. La masa de $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ necesaria es:

$$\text{Ecuación 12. Masa de NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 8.7145 \text{ moles} \times 262.84\text{g/mol} = 2290.6\text{g} = 2.29\text{kg}$$

Para obtener 1 kilogramo de óxido de NCA se necesitan aproximadamente 2.29 kilogramos de sulfato de níquel hexahidratado ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

4.9.2 Sulfato de cobalto necesario para producir 1 kg de óxido de NCA

Sabemos que el óxido de NCA tiene la fórmula $\text{Li}(\text{Ni}_{0.84}\text{Co}_{0.12}\text{Al}_{0.04})\text{O}_2$, lo que significa que el 12% de los sitios de transición metálica están ocupados por cobalto (Co). Ya hemos calculado la masa molar del óxido de NCA como 96.39g/mol. Así como también determinamos cuántos moles de NCA hay en 1 kilogramo: 10.3745 moles de NCA

El 12% de los sitios de transición metálica en NCA están ocupados por cobalto, lo que significa que hay 0.12 moles de Co por mol de NCA. Ahora, calculamos cuántos moles de cobalto hay en 1 kg de NCA:

Ecuación 13. $Moles\ de\ Co = 0.12 \times 10.37 = 1.2444\ moles\ de\ cobalto$

El sulfato de cobalto heptahidratado ($CoSO_4 \cdot 7H_2O$) tiene una masa molar de:

Ecuación 14. $Masa\ molar = 58.93(Co) + 32.06(S) + 4 \times 16.00(O) + 7 \times (2 \times 1.01(H) + 16.00(O)) = 281.10\ g/mol$

Cada mol de $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ contiene 1 mol de Co.

Para obtener 1.24 moles de cobalto, necesitamos la misma cantidad de moles de $CoSO_4 \cdot 7H_2O$. La masa de $CoSO_4 \cdot 7H_2O$ necesaria es:

Ecuación 15. $Masa\ de\ CoSO_4 \cdot 7H_2O = 1.24\ moles \times 281.10\ g/mol = 349.8\ g$

Para obtener 1 kilogramo de óxido de NCA, se necesitan aproximadamente 349.8 gramos de sulfato de cobalto heptahidratado ($CoSO_4 \cdot 7H_2O$).

4.9.3 Hidróxido de litio necesario para producir 1 kg de óxido de NCA

El óxido de NCA tiene la fórmula $Li(Ni_{0.84}Co_{0.12}Al_{0.04})O_2$, lo que indica que por cada mol de NCA hay 1 mol de litio (Li). Ya hemos calculado la masa molar del óxido de NCA como 96.39g/mol. Así como también determinamos cuántos moles de NCA hay en 1 kilogramo: 10.3745 moles de NCA

El hidróxido de litio (LiOH) tiene una masa molar de:

Ecuación 16. $Masa\ molar\ de\ LiOH = 6.94(Li) + 16.00(O) + 1.01(H) = 23.95\ g/mol$

Cada mol de LiOH contiene 1 mol de litio.

Para obtener 10.37 moles de litio, necesitamos la misma cantidad de moles de LiOH. Entonces, la masa de LiOH necesaria es:

Ecuación 17. $Masa\ de\ LiOH = 10.37\ moles \times 23.95\ g/mol = 248.3\ g$

Para obtener 1 kilogramo de óxido de NCA, se necesitan aproximadamente 248.3 gramos de hidróxido de litio (LiOH).

4.9.4 Sulfato de aluminio necesario para 1 kg de óxido de NCA

Sabemos que el óxido de NCA tiene la fórmula $\text{Li}(\text{Ni}_{0.84}\text{Co}_{0.12}\text{Al}_{0.04})\text{O}_2$, lo que significa que el 4% de los sitios de transición metálica están ocupados por aluminio (Al). Ya hemos calculado la masa molar del óxido de NCA como 96.39g/mol. Así como también determinamos cuántos moles de NCA hay en 1 kilogramo: 10.3745 moles de NCA

El 4% de los sitios de transición metálica en NCA están ocupados por aluminio, lo que significa que hay 0.04 moles de Al por mol de NCA. Ahora, calculamos cuántos moles de aluminio hay en 1 kg de NCA:

$$\text{Ecuación 18.} \quad \text{Moles de Al} = 0.04 \times 10.37 = 0.4148 \text{ moles de aluminio}$$

El sulfato de aluminio tiene la fórmula $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, y su masa molar es:

$$\text{Ecuación 19.} \quad \text{Masa molar} = 2 \times 26.98(\text{Al}) + 3 \times 32.06(\text{S}) + 12 \times 16.00(\text{O}) = 342.14 \text{ g/mol}$$

Cada mol de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ contiene 2 moles de Al. Para obtener 0.4148 moles de Al, necesitamos la mitad de esa cantidad de moles de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, ya que cada mol de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ contiene 2 moles de Al.

La cantidad de moles de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ es:

$$\text{Ecuación 20.} \quad \text{Moles de } \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 = \frac{0.4148 \text{ moles de Al}}{2} = 0.2074 \text{ moles de } \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$$

Ahora, calculamos la masa de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ necesaria:

$$\text{Ecuación 21.} \quad \text{Masa de } \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 = 0.2074 \text{ moles} \times 342.14 \text{ g/mol} = 70.96 \text{ g}$$

Para obtener 1 kilogramo de óxido de NCA ($\text{Ni}_{0.84}\text{Co}_{0.12}\text{Al}_{0.04}\text{O}_2$), se necesitan aproximadamente 70.96 gramos de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$).

4.9.5 Sulfato de níquel necesario para producir 1 kg de óxido de NMC811

La fórmula empírica de NMC811 es $\text{Li}(\text{Ni}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1})\text{O}_2$, lo que indica que el 80% de los sitios en el cátodo están ocupados por níquel, mientras que el 10% corresponde a manganeso y otro 10% a cobalto. Para calcular la masa molar del compuesto, se suman las masas molares de los elementos presentes:

- Níquel (Ni): $0.8 \text{ moles} \times 58.69 \text{ g/mol} = 49.30 \text{ g}$
- Cobalto (Co): $0.10 \text{ moles} \times 58.93 \text{ g/mol} = 7.07 \text{ g}$
- Manganeso (Mn): $0.10 \text{ moles} \times 54.94 \text{ g/mol} = 5.494 \text{ g}$
- Oxígeno (O_2): $2 \text{ moles} \times 16.00 \text{ g/mol} = 32.00 \text{ g}$
- Litio (Li): $6.94 \text{ g/mol} \times 1 \text{ g/mol} = 6.94.00 \text{ g}$

Ecuación 22.
$$\text{Masa molar} = 46.95(\text{Ni}) + 5.893(\text{Co}) + 5.494(\text{Mn}) + 32.00(\text{O}) + 6.94(\text{Li}) = 97.28 \text{ g/mol}$$

Ahora, calculamos cuántos moles de óxido de NMC hay en 1 kilogramo (1000 g):

Ecuación 23.
$$\text{Moles de NCA en 1 kg} = \frac{1000 \text{ g}}{97.28 \text{ g/mol}} = 10.28 \text{ moles de NCA}$$

El 80% de los sitios de transición metálica están ocupados por níquel, lo que significa que hay 0.8 moles de níquel por mol de NMC. Ahora calculamos cuántos moles de níquel hay en total en 1 kg de NMC:

Ecuación 24.
$$\text{Moles de Ni} = 0.8 \times 10.28 = 8.2237 \text{ moles de níquel}$$

El sulfato de níquel hexahidratado $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ tiene una masa molar de aproximadamente 262.85 g/mol. Por cada mol de $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, obtenemos 1 mol de níquel.

La masa de sulfato de níquel necesaria es:

Ecuación 25.
$$\text{Masa de NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 8.22 \text{ mol} \times 262.85 \text{ g/mol} = 2162.61 \text{ g}$$

Para producir 1 kg de óxido de NMC811 $\text{Li}(\text{Ni}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1})\text{O}_2$, se necesitan 2.16 kg de sulfato de níquel hexahidratado $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

4.9.6 Sulfato de cobalto necesario para producir 1 kg de óxido de NMC811

Sabemos que el óxido de NCA tiene la fórmula $\text{Li}(\text{Ni}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1})\text{O}_2$, lo que significa que el 10% de los sitios de transición metálica están ocupados por Cobalto (Co). Ya hemos calculado la masa molar del óxido de NMC como 97.28 g/mol . Así como también determinamos cuántos moles de NCA hay en 1 kilogramo: 10.28 moles de NMC811.

El 10% de los sitios de transición metálica en NCA están ocupados por cobalto, lo que significa que hay 0.10 moles de Co por mol de NMC811. Ahora, calculamos cuántos moles de cobalto hay en 1 kg de NMC811:

Ecuación 26. $\text{Moles de Co} = 0.10 \times 10.28 = 1.028 \text{ moles de cobalto}$

El sulfato de cobalto heptahidratado ($\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) tiene una masa molar de:

Ecuación 27. $\text{Masa molar} = 58.93(\text{Co}) + 32.06(\text{S}) + 4 \times 16.00(\text{O}) + 7 \times (2 \times 1.01(\text{H}) + 16.00(\text{O})) = 281.10 \text{ g/mol}$

Cada mol de $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ contiene 1 mol de Co.

Para obtener 1.24 moles de cobalto, necesitamos la misma cantidad de moles de $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. La masa de $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ necesaria es:

Ecuación 28. $\text{Masa de } \text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 1.028 \text{ moles} \times 281.10 \text{ g/mol} = 288.97 \text{ g}$

Para obtener 1 kilogramo de óxido de NCA, se necesitan aproximadamente 288.9g de sulfato de cobalto heptahidratado ($\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$).

4.9.7 Sulfato de manganeso necesario para producir 1 kg de óxido de NMC811

La fórmula del óxido de NMC811 es $\text{Li}(\text{Ni}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1})\text{O}_2$, lo que significa que el 10% de los sitios de transición metálica están ocupados por manganeso (Mn). Ya calculamos anteriormente que la masa molar del óxido de NMC811 es 97.27 g/mol . Así como también determinamos cuántos moles de NCA hay en 1 kilogramo: 10.28 moles de NMC811.

El 10% de los sitios de transición metálica en NMC811 están ocupados por manganeso (Mn), lo que significa que hay 0.1 moles de Mn por mol de NMC811. Entonces, la cantidad de moles de manganeso en 1 kg de NMC811 es:

Ecuación 29. $Moles\ de\ Mn = 0.1 \times 10.28 = 1.028\ moles\ de\ manganeso$

El sulfato de manganeso monohidratado tiene la fórmula $MnSO_4 \cdot H_2O$ y su masa molar es 169.01 g/mol. Cada mol de $MnSO_4 \cdot H_2O$ contiene 1 mol de manganeso.

Para obtener 1.028 moles de manganeso, necesitamos la misma cantidad de moles de $MnSO_4 \cdot H_2O$. La masa de $MnSO_4 \cdot H_2O$ necesaria es:

Ecuación 30. $Masa\ de\ MnSO_4 \cdot H_2O = 1.028\ moles \times 169.01\ g/mol = 173.72\ g$

Para obtener 1 kilogramo de óxido de NMC811 $Li(Ni_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1})O_2$, se necesitan aproximadamente 173.72 gramos de sulfato de manganeso monohidratado ($MnSO_4 \cdot H_2O$).

4.9.8 Hidróxido de litio necesario para producir 1 kg de óxido de NMC811

La fórmula del óxido de NMC811 es $LiNi_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1}O_2$, lo que indica que por cada mol de óxido de NMC811, hay 1 mol de litio (Li). Ya calculamos que la masa molar del óxido de NMC811 es 97.27 g/mol. Así como también determinamos cuántos moles de NCA hay en 1 kilogramo: 10.28 moles de NMC811.

El hidróxido de litio (LiOH) tiene una masa molar de 23.95 g/mol. Cada mol de LiOH contiene 1 mol de litio.

Para obtener 10.28 moles de litio, necesitamos la misma cantidad de moles de LiOH. La masa de LiOH necesaria es:

Ecuación 31. $Masa\ de\ LiOH = 10.28\ moles \times 23.95\ g/mol = 246.31\ g$

Para obtener 1 kilogramo de óxido de NMC811 $Li(Ni_{0.8}Mn_{0.1}Co_{0.1})O_2$, se necesitan aproximadamente 246.31 gramos de hidróxido de litio (LiOH).

Finalmente, en la figura 32 observamos el submodelo correspondiente a esta sección que representa la síntesis del material activo del cátodo (Óxido de NCA o NMC).

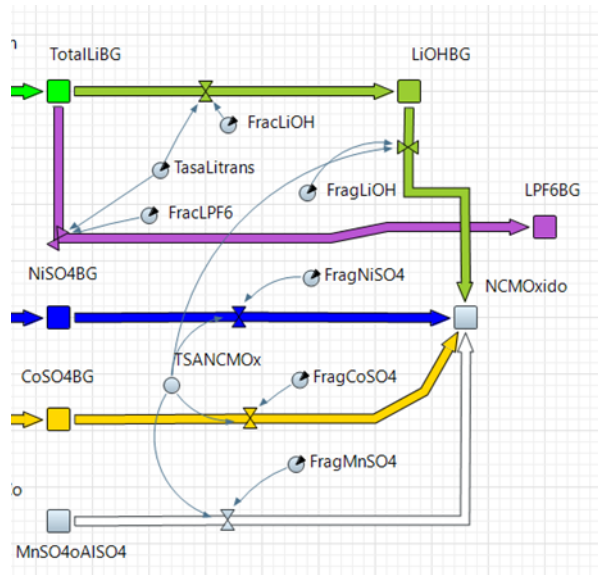


Figura 32. Submodelo para obtención del material activo del cátodo.

Donde:

- LiOHBG (LiOH): Representa el hidróxido de litio que es una materia prima clave para la producción de cátodos de alta capacidad. Se extrae de TotalLiBG y también se transforma en LiPF6BG (LiPF₆), el principal componente del electrolito.
- NiSO4BG (Sulfato de Níquel): Este flujo representa el sulfato de níquel, que es una materia prima crucial para la producción de cátodos NMC y NCA.
- CoSO4BG (Sulfato de Cobalto): Representa el sulfato de cobalto, otro material esencial en la fabricación de cátodos NMC y NCA.
- MnSO4AlSO4 (Sulfato de Manganeso y Aluminio): Este flujo está asociado con el sulfato de manganeso o sulfato de aluminio, utilizados en diferentes proporciones dependiendo de si se está fabricando un cátodo NMC (con manganeso) o NCA (con aluminio).
- NCMOxido: El óxido de NCM (Níquel-Cobalto-Manganeso) es el resultado final del proceso de mezcla de los distintos compuestos. Se trata del material activo del cátodo que se utilizará en la celda de la batería.
- FracLiOH: Fracción de LiOH (hidróxido de litio) que entra en el proceso.
- FracLPF6: Fracción de LiPF₆, representa la cantidad de litio que se utiliza para la fabricación del electrolito (LiPF₆), en lugar del cátodo.
- FragNiSO4, FragCoSO4, FragMnSO4: Estas variables representan las fracciones de los diferentes sulfatos de níquel, cobalto y manganeso que se utilizan en el proceso para formar el óxido de NMC o NCA.

- TSANCMOx: Variable dinámica que regula o ajusta el ensamblaje del óxido NMC, gestionando las proporciones y la mezcla de los diferentes componentes.

Los materiales principales (LiOH , NiSO_4 , CoSO_4 , y MnSO_4) ingresan al sistema y fluyen hacia el nodo de NCMOxido, que es donde ocurre la mezcla y reacción para crear el material activo del cátodo. A lo largo del flujo, las fracciones de materiales (LiOH , NiSO_4 , CoSO_4 , MnSO_4) son gestionadas por las fracciones y tasas de transformación, es decir, que el modelo gestiona de manera dinámica las proporciones y la tasa de ensamblaje del material activo, optimizando el proceso de fabricación del óxido de NCA o NMC el cual se utilizará posteriormente en la fabricación del cátodo para las baterías de iones de litio.

4.10 Fabricación del cátodo y electrolito

En esta sección del modelo se representa la fabricación del cátodo y electrolito en la cadena de suministro de las baterías de iones de litio, sin embargo, como el modelo construido se encuentra limitado a evaluar la disponibilidad e impactos de los minerales críticos los componentes ajenos a estos materiales únicamente son representados por “Stoks” de manera que pueda visualizarse la utilización de estos, a continuación se muestra la descripción del fragmento de modelo presentado en la figura 33.

Fabricación del Electrolito

1. Materiales Involucrados:

- EtyleneCarb, DimCarb, VinylCarb: Representa los componentes del electrolito, los cuales son: Carbonato de etileno, Carbonato de Dimetilo y Carbonato de Vinilo cada uno con su propio flujo de entrada.
- LPF6BG: Corresponde a la sal hexafluorofosfato de litio.

2. Flujos y Variables:

- FracEC, FracDC, FracVC: Fracciones asociadas a la proporción de Carbonato de etileno, Carbonato de Di metilo y Carbonato de Vinilo, respectivamente.
- FracLPF: Fracción relacionada con el hexafluorofosfato de litio. (LiPF_6).

- Electrolito: Este es el "stock" o acumulador principal del electrolito final.
- TSAPElect: Variable dinámica que representa la tasa de fabricación de electrolito.

3. Salida Final:

- FracElect: Parámetro que representa la fracción de electrolito empleada en la fabricación de la Celda, que es el siguiente proceso.

Fabricación del Cátodo

1. Materiales Involucrados:

- Oxido: Material precursor del cátodo, óxidos de metales de transición utilizados en baterías de iones de litio (NMC o NCA).
- CarbonBI, PLVF: Estos son materiales adicionales que se añaden para la construcción del cátodo, donde CarbonBI representa al carbono negro y PLVF a Fluoruro de polivinilo.

2. Flujos y Variables:

- FracNmcOx, FracCB, FracPLVF: Estos parámetros indican las proporciones relativas de Oxido, CarbonBI, y PLVF utilizadas en la mezcla del cátodo.
- Cátodo: Stock donde se acumula el cátodo fabricado.
- TSAPCat: Similar al proceso de electrolito, variable dinámica que representa la tasa de fabricación de cátodo.

3. Salida Final:

- FracCat: Parámetro que representa la fracción de Cátodo empleada en la fabricación de la Celda.

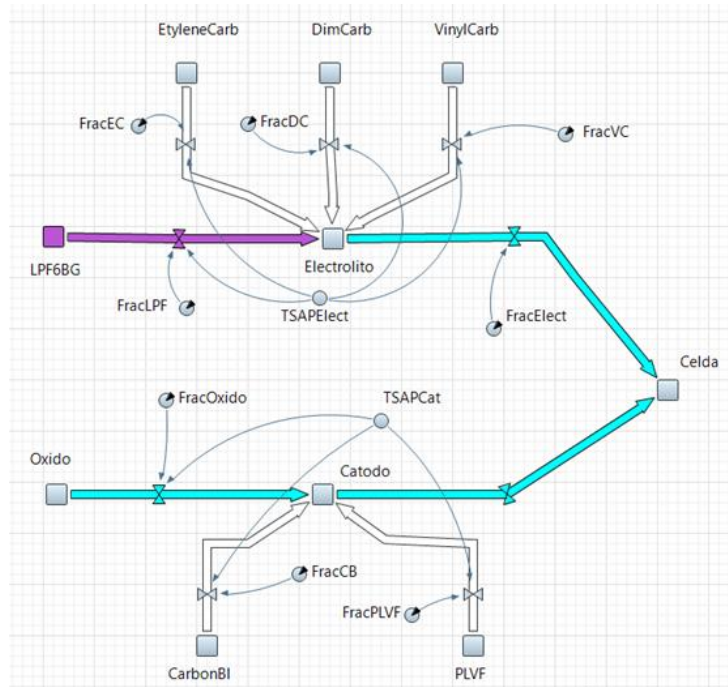


Figura 33. Fabricación del cátodo y electrolito

4.11 Fabricación de celdas y ensamblaje de baterías

Este fragmento del modelo describe de manera detallada el proceso de fabricación de las celdas de iones de litio, que posteriormente son integradas en una batería completa. El flujo de materiales clave (aluminio, cobre, acero, componentes plásticos, cátodo, ánodo, etc.) es controlado mediante fracciones específicas para garantizar una proporción correcta en el proceso de ensamblaje, y las variables dinámicas TSAPCelda y TSAPBateria gestionan la tasa o el ritmo de producción de las celdas y las baterías, respectivamente.

La figura numero 34 muestra la sección del modelo de Dinámica de Sistemas en AnyLogic que representa el proceso de fabricación de las celdas y el ensamblaje de baterías para vehículos eléctricos (VE) en la cadena de suministro de baterías de iones de litio. El diagrama está dividido en dos secciones principales: la fabricación de celdas y la integración de la batería. A continuación, se describe cada sección:

Fabricación de Celdas

1. Componentes involucrados:

- SRAlum: Aluminio laminado en hojas puede ser parte del embalaje o envoltura de las celdas de la batería.
- PlastFilm: Material plástico utilizado como separador o recubrimiento dentro de la celda.
- BatSepar: Separador de baterías, un componente esencial en celdas de iones de litio que evita el contacto directo entre ánodo y cátodo.
- Anodo: Material utilizado para fabricar el ánodo de la celda.
- CoperCF y CoperAn: Cobre utilizado comúnmente en ánodos y conexiones eléctricas dentro de la celda.
- AluminCF: Colector de corriente de aluminio, se utiliza como colector de corriente en el cátodo, donde recolecta los electrones generados durante la descarga y los transporta al circuito externo.

2. Flujos y Variables:

- FracSRA, FracPF, FracALF, FracBS: Fracciones que indican las proporciones de los materiales como aluminio, película plástica, y separadores de baterías que se integran en la celda.
- FracCat y FracAn: Fracciones que representan la cantidad de cátodo y ánodo que entra en la fabricación de la celda.
- TSAPCelda: Variable dinámica que representa la tasa de ensamblaje de la celda, basada en la combinación de estos flujos de materiales.

3. Salida Final:

- Celda: La salida del proceso son toneladas de celdas ensambladas con todos los componentes, listas para pasar al siguiente paso, que es la integración de la batería.

Ensamblaje de la Batería

1. Componentes involucrados:

- BaMoPak: Estructura que protege y agrupa las celdas de una batería dentro de un módulo.
- BaMaSy: Sistema de Gestión de Batería (BMS) monitorea, proteger y optimizar el rendimiento de las celdas de una batería para garantizar su funcionamiento seguro, eficiente y prolongado.
- AlumAF: Aleación forjada de aluminio, utilizado como parte de la estructura o el encapsulado de la batería.
- RSteel y SRSteel: Acero reforzado y laminado, un material clave en el encapsulado o soporte estructural de la batería.
- OtherComp: Otros componentes que podrían incluir cables, conectores, y otros elementos mecánicos o electrónicos que forman parte del ensamblaje final de la batería.

2. Flujos y Variables:

- FracALF, FracBaMaSy, FracMPak, FracSRSt, etc.: Estas fracciones representan la proporción de los distintos componentes que entran en el ensamblaje de la batería.
 - TSAPBateria: Es la variable dinámica que regula la tasa de ensamblaje de la batería.
3. Salida Final: Batería: El resultado final es una determinada cantidad de baterías ensambladas anualmente.

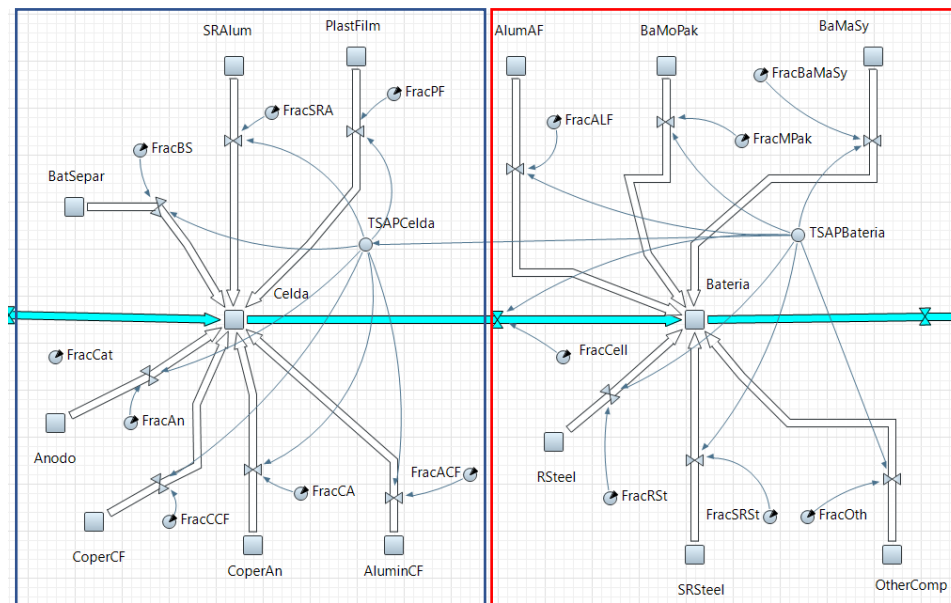


Figura 34. Fabricación de celdas y ensamblaje de baterías

4.12 Demanda, producción y capacidad de baterías

El crecimiento de las ventas de VE suele seguir una curva en forma de S (curva logística), donde las ventas aumentan rápidamente en los primeros años debido a la adopción inicial, luego el crecimiento se desacelera a medida que el mercado se satura. Sin embargo, para modelar el posible comportamiento que podría tener la demanda de vehículos eléctricos en un futuro tomaremos ciertas suposiciones con el fin de comparar la producción sostenible con los recursos existentes en los países involucrados, si esperamos un crecimiento continuo sin alcanzar la saturación del mercado para 2050, podríamos optar por una función exponencial simplificada. El submodelo que representa esta sección se encuentra ilustrado en la figura 35.

Suposiciones clave:

- Se espera que el crecimiento siga un patrón exponencial debido a factores como políticas gubernamentales, incentivos, avances tecnológicos y la transición a energías limpias.
- El incremento anual en las ventas será de 4% anual. Si bien se espera un crecimiento acelerado en los próximos años no debemos olvidar que actualmente se están desarrollando tecnologías alternas que tengan un menor impacto ambiental como las baterías de iones de sodio.
- La producción de baterías seguirá el mismo comportamiento que la demanda con el propósito de satisfacerla.

Como forma de representar dicho comportamiento se utilizó la siguiente función exponencial:

$$\text{Ecuación 32.} \quad V(t) = V0 \times (1 + r)^{(t)}$$

Donde:

- $V(t)$ es el número de vehículos eléctricos vendidos en el año t .
- $V0$ es la cantidad de vehículos eléctricos vendidos en el año 2023.
- r es la tasa de crecimiento anual (en porcentaje), que refleja el aumento en las ventas año tras año.
- t es la acumulación de años de producción.

Datos iniciales aproximados:

- Ventas de VE en 2023 ($V0$): 1,000,000.00
- Tasa de crecimiento (r): 4% anual
- Año(t): 1

4.12.1 Capacidad de las baterías

La evolución constante en la capacidad y la densidad energética de las baterías de iones de litio desempeña un papel crucial en la optimización de recursos por varias razones, debido a esto el modelo diseñado en esta tesis nos permite modificar dichos parámetros para observar la repercusión de estos en el propósito de optimizar el uso de recursos, reducir costos y

minimizar el impacto ambiental, para ello podemos relacionar la capacidad de la batería, su densidad energética y el peso final que tendrá esta con la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 33.} \quad W = \frac{C \times 1000}{ED}$$

Donde:

- C = Capacidad en Kwh
- W = Peso en kilogramos
- ED = Densidad energética en Wh/kg

A continuación, en la figura 35 se muestra la modelación en AnyLogic de esta sección.

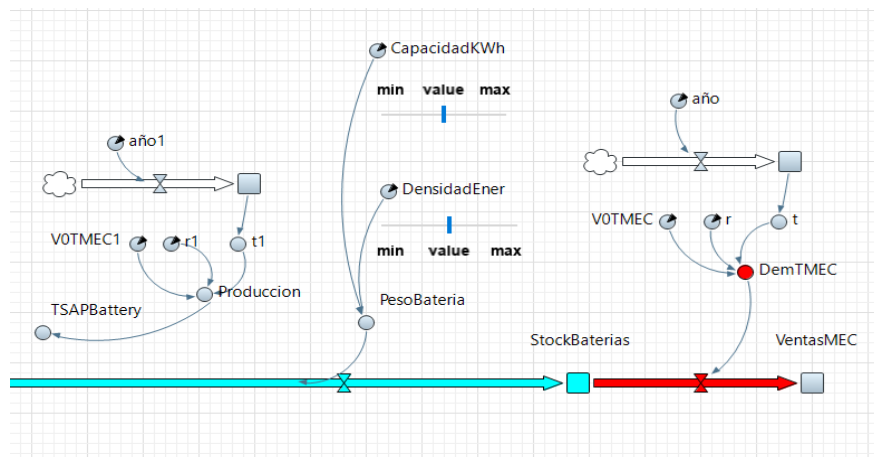


Figura 35. Demanda, producción y capacidad de baterías

4.13 Calculo de impactos

Finalmente, esta sección describe el fragmento del modelo de Dinámica de Sistemas en AnyLogic, que simula la cadena de suministro de las baterías de iones de litio para vehículos eléctricos (VE), enfocándose en el cálculo de impactos ambientales. Estos cálculos se basan en la metodología ReCiPe, que evalúa el impacto ambiental de diversas actividades industriales. En la figura 36 se puede observar cómo se estiman los impactos ambientales asociados a la

producción de baterías de iones de litio, multiplicando los factores de impacto por la cantidad de baterías fabricadas en un periodo de tiempo específico.

Variables y Componentes:

- NCMBat: Este flujo representa la cantidad de baterías de tipo NCM (Níquel, Cobalto, Manganeso) que se fabrican.
- PesoBateria: Esta variable indica el peso de las baterías fabricadas. Dado que la cantidad de impacto ambiental está fuertemente relacionada con la cantidad de material producido, el peso de las baterías es un factor clave en estos cálculos.

Impactos Ambientales Calculados:

Cada una de las líneas de salida representa un impacto ambiental específico calculado mediante la multiplicación del factor de impacto (indicado por las variables que comienzan con "F") por la cantidad de producción de baterías (representada por las variables que comienzan con las letras "G", "W", "L", "M", y "A"). Las variables clave incluyen:

- GWPNcm: (Global Warming Potential - Potencial de Calentamiento Global) Representa el potencial de calentamiento global causado por la producción de baterías.
- WUNcm: (Water Use - Uso de Agua) Calcula el impacto relacionado con el uso de agua. El factor de impacto FWUNcm se multiplica por la cantidad de baterías fabricadas para obtener el uso total de agua.
- LUNcm: (Land Use - Uso de Suelo) Representa el uso del suelo, este indicador evalúa la ocupación o transformación de suelo natural.
- MRNcm: (Mineral Resources - Recursos Minerales) Este indicador calcula el uso de recursos minerales no renovables asociados con la producción de baterías.
- ATNcm: (Acidification Terrestrial - Acidificación Terrestre) Evalúa la acidificación terrestre

Este fragmento del modelo simula la estimación de impactos ambientales en la producción de baterías de iones de litio para vehículos eléctricos, utilizando la metodología ReCiPe, esta misma lógica fue aplicada a cada una de las etapas de obtención y fabricación de los precursores de las baterías, abarcando desde la refinación de minerales críticos como el níquel, cobalto y litio hasta el ensamblaje de baterías. El objetivo es proporcionar una visión integral de los impactos ambientales asociados a la producción de baterías, facilitando la toma de decisiones en la industria y en la cadena de suministro determinando cuales son las etapas que generan más impactos al medio ambiente.

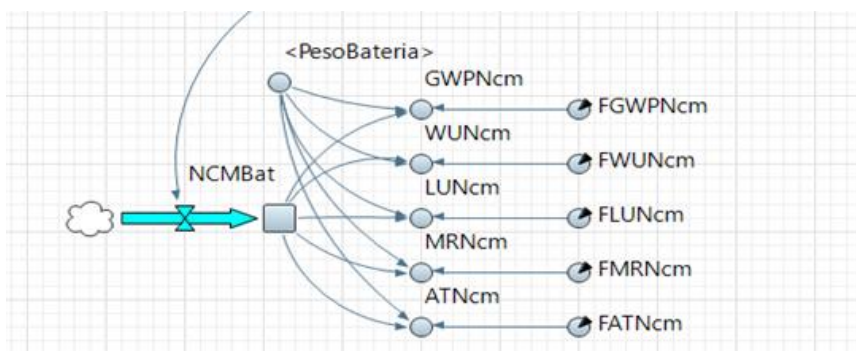


Figura 36. Submodelo para cálculo de impactos ambientales.

4.14 Verificación y validación

Esta etapa se basa en el análisis global del modelo en la que se llevan a cabo iterativamente diversas simulaciones para verificar y validar que el modelo se comporte de acuerdo a lo previsto, sin embargo, para llegar a esta etapa se deben de haber probado con anterioridad e individualmente cada uno de los submodelos que conforman el modelo global, de esta manera se simplifica la búsqueda de errores que pudieran surgir por la interacción entre submodelos. En cuanto al análisis de escenarios, la respectiva simulación de estos y la interpretación de resultados, estos se encuentran en el capítulo 5.

4.15 Conclusiones

En conclusión, el desarrollo metodológico del análisis de ciclo de vida (ACV) para baterías de iones de litio para vehículos eléctricos (VE) enfrentó desafíos significativos en la recopilación y organización de datos del inventario. La complejidad y variabilidad de las fuentes de información, así como las limitaciones de acceso a datos detallados sobre la producción y disposición de componentes críticos, hicieron que el proceso de inventario fuera una tarea demandante y meticulosa. Además, la etapa de modelado de la cadena de suministro a nivel de América del Norte, considerando los países del T-MEC (México, Estados Unidos y Canadá), requirió un análisis exhaustivo de la disponibilidad de recursos en cada país. La heterogeneidad en las capacidades de extracción, procesamiento y refinación de minerales críticos, junto con la escasa información sobre los proyectos mineros incrementó la complejidad del modelo de dinámica de sistemas.

CAPÍTULO V RESULTADOS

5.1 Introducción

Este capítulo presenta los resultados obtenidos tanto del análisis de ciclo de vida (ACV) como de la simulación de la cadena de suministro en dinámica de sistemas para las baterías de iones de litio utilizadas en vehículos eléctricos (VE) en América del Norte. En el contexto actual, donde la movilidad eléctrica juega un papel fundamental en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y en la mitigación del cambio climático, es crucial evaluar exhaustivamente tanto los impactos ambientales asociados a estas baterías como la viabilidad de su cadena de suministro. De esta manera, no solo se busca comprender el desempeño ambiental de estas tecnologías, sino también anticipar las limitaciones y desafíos en la disponibilidad de recursos críticos como el litio, el níquel y el cobalto, fundamentales para su producción.

El ACV, una herramienta robusta para evaluar los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto, permite en este estudio analizar todas las etapas de las baterías, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, proporcionando una visión detallada de sus efectos ambientales. Por otro lado, la simulación de la cadena de suministro mediante dinámica de sistemas complementa este enfoque, permitiendo modelar y analizar cómo interactúan los diferentes elementos de la cadena de valor de las baterías y cómo las fluctuaciones en los recursos y la demanda pueden afectar la sostenibilidad a largo plazo de esta tecnología.

El objetivo principal de este capítulo es presentar los resultados detallados tanto del ACV como de la modelación de la cadena de suministro en dinámica de sistemas. Se examinan aspectos clave como los diferentes impactos al medio ambiente, y en la disponibilidad de minerales críticos, así como la respuesta de la cadena de suministro ante diferentes escenarios de crecimiento de la demanda. Los resultados permiten identificar los impactos ambientales más significativos, las etapas de mayor consumo de recursos y los posibles cuellos de botella en la cadena de suministro.

Estos hallazgos proporcionan una comprensión más completa de la huella ambiental de las LIB's y de los desafíos de su suministro en América del Norte. La información obtenida resulta valiosa para la toma de decisiones tanto en políticas públicas como en la industria automotriz, y orienta la búsqueda de estrategias de optimización y mejora en la sostenibilidad de la cadena de suministro. Esto, en última instancia, contribuye a promover una transición hacia la movilidad eléctrica más responsable y sostenible en la región.

5.2 Resultados del Análisis de Ciclo de vida

Los cálculos correspondientes al análisis de ciclo de vida (ACV) fueron realizados utilizando el software especializado SimaPro, ampliamente reconocido en el ámbito de la evaluación ambiental. Este software permite integrar datos de inventarios de ciclo de vida (LCI) y evaluar múltiples categorías de impacto ambiental mediante metodologías específicas,

5.2.1 Cambio climático, potencial de calentamiento global (GWP1000).

El factor de caracterización del punto medio seleccionado para evaluar el cambio climático se basa en el potencial de calentamiento global (GWP). Esta métrica ampliamente reconocida cuantifica el aumento integrado del forzamiento radiativo infrarrojo causado por un gas de efecto invernadero (GEI). En esencia, el GWP representa la capacidad de un gas para contribuir al calentamiento global durante un período de tiempo específico y se expresa en kilogramos de dióxido de carbono equivalente (kg CO₂-eq). Esta medida es esencial para comprender y comparar el impacto climático de diferentes gases y actividades humanas, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas en políticas ambientales y prácticas industriales (Alexander et al., 2014).

Los resultados derivados del estudio de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) revelan que la batería que conlleva el mayor impacto a lo largo de su cadena de suministro hasta la etapa de fabricación es aquella que emplea la química NCA (figura 37 y 38). Este fenómeno se atribuye principalmente al elevado uso de cobalto en su proceso de manufactura, siendo un 35.5 % mayor en comparación con la cantidad utilizada en la batería que emplea la química NMC811.

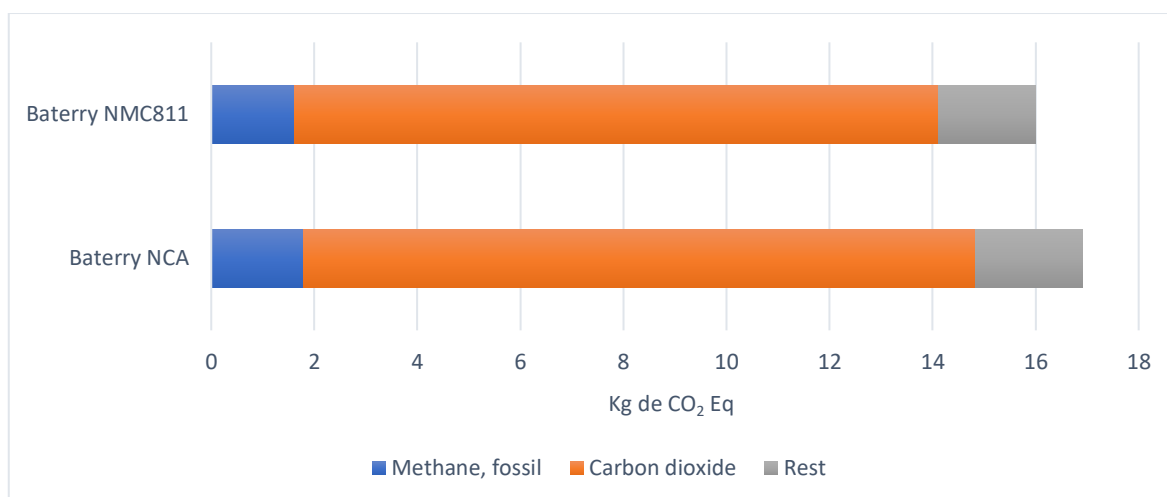


Figura 37. Potencial de calentamiento global (GWP - CO₂-Eq) Baterías NMC y NCA.

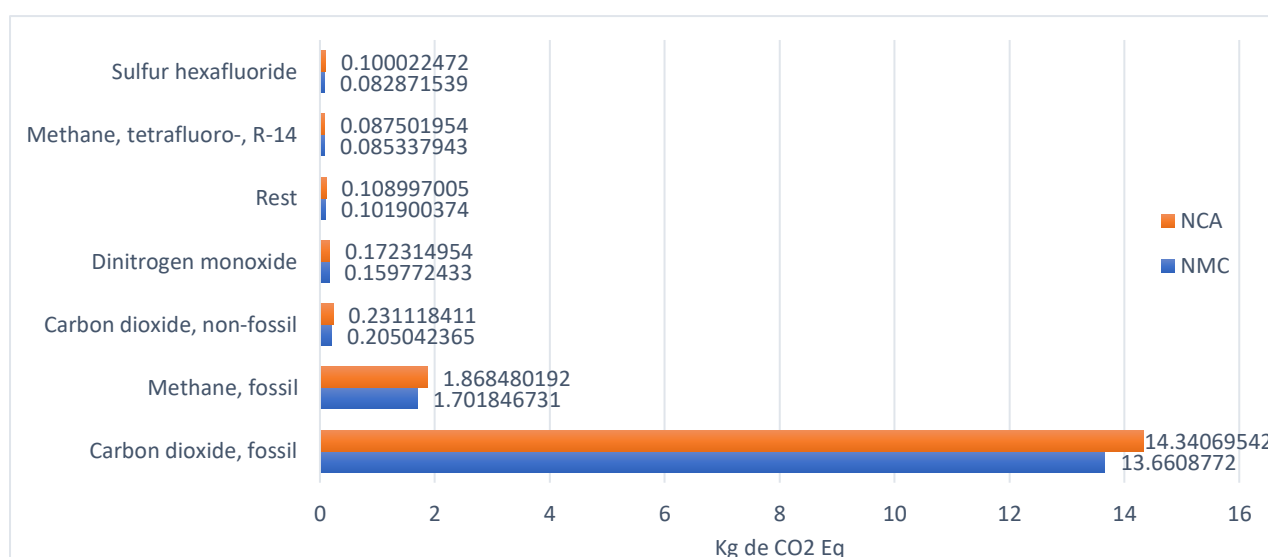


Figura 38. Comparación de Emisiones de CO₂-Eq entre Baterías NCA y NMC811

Al realizar un análisis comparativo de los minerales críticos en términos de su contribución al cambio climático (figura 39), se observa que el cobalto, en particular, es el mineral que genera más emisiones de gases de efecto invernadero, alcanzando los 30 kg de CO₂-eq por kilogramo. Este hallazgo subraya la importancia de evaluar detalladamente los materiales utilizados en la fabricación de baterías para mitigar su impacto ambiental y promover prácticas más sostenibles en la industria energética.

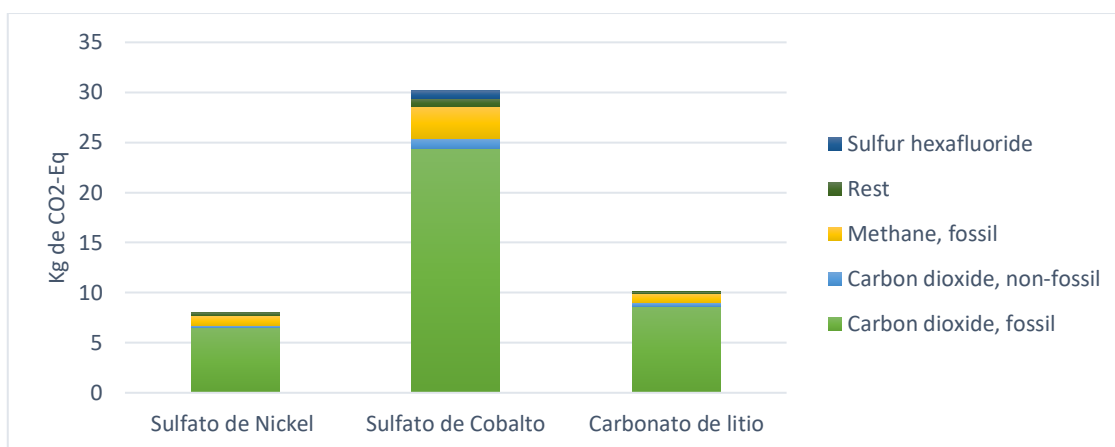


Figura 39. Comparación de Emisiones de CO2-Eq entre minerales críticos de LIB's

5.2.2 Recursos materiales: metales/minerales, potencial excedente de mineral (SPO).

El factor de caracterización del punto medio para la escasez de recursos minerales es el potencial excedente de mineral (SOP), expresado en kg Cu-eq. La extracción primaria de un recurso mineral conducirá a una disminución general de la ley del mineral, es decir, la concentración de ese recurso en minerales en todo el mundo, lo que a su vez aumentará la cantidad de mineral producido por kilogramo de recurso mineral extraído. El SPO se refiere al potencial de agotamiento de los recursos minerales y metálicos que están siendo extraídos a un ritmo más rápido que su tasa de formación geológica natural. Esto puede conducir a una disminución de las reservas minerales y, eventualmente, a la escasez de recursos (Huijbregts et al., 2017b), los resultados obtenidos para esta categoría se muestran en la figura 40.

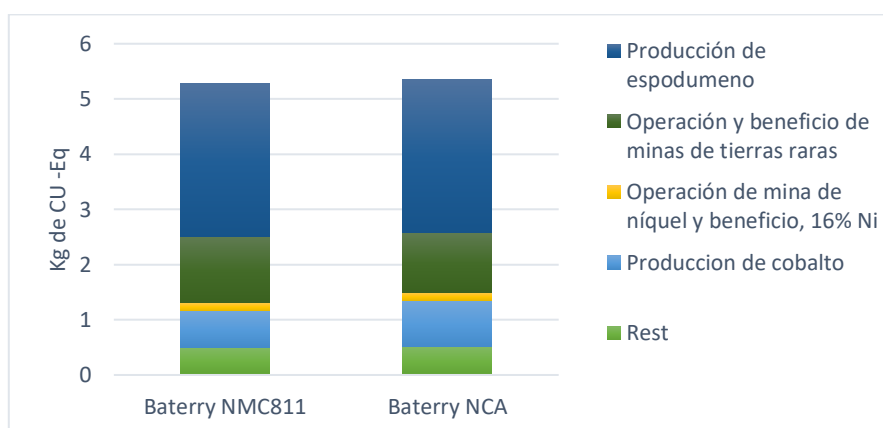


Figura 40. Recursos materiales: metales/minerales, potencial mineral excedente (SOP)

La producción de espodumeno es el mayor contribuyente al impacto en la categoría de recursos minerales para ambas baterías, lo cual es consistente, ya que el espodumeno es la principal fuente de litio, el cual es uno de los minerales más escasos utilizados en la producción de baterías, si bien este tiene una menor participación en la composición de las baterías a comparación del níquel su impacto en esta categoría es mayor, esta es una clara evidencia del papel que puede jugar México ya que entre los tres países que participan en el T-MEC es el que cuenta con una mayor cantidad de reservas de este mineral. Las operaciones mineras y de procesamiento de tierras raras también tienen una alta contribución al impacto de agotamiento de recursos. Las tierras raras son críticas en la manufactura de los componentes electrónicos

5.2.3 Uso de la tierra, ocupación de tierras agrícolas (LOP)

Este factor de caracterización de punto medio, expresado en equivalentes de cultivos anuales en metros cuadrados por año ($m^2 \cdot \text{año}$), se centran en la pérdida relativa de especies provocada por diferentes tipos de uso de la tierra, como los cultivos anuales, los cultivos permanentes, la agricultura en mosaico, la silvicultura, el suelo urbano y los pastos. Este enfoque evalúa cómo cada tipo de uso de la tierra afecta la diversidad biológica y la riqueza de especies en un área determinada. La pérdida relativa de especies se determinó mediante la comparación de datos de campo que registran la riqueza de especies locales en diversos tipos de coberturas terrestres, tanto naturales como artificiales. Este análisis se basa en investigaciones realizadas por (Elshout Pieter et al., 2014), quienes proporcionaron información crucial para comprender el impacto de la actividad humana en la biodiversidad.

En el caso de la conversión de tierras, se ha considerado un enfoque de recuperación pasiva hacia un hábitat (semi)natural previo. Esta aproximación se apoya en los tiempos promedio de recuperación, como los estudiados por (Ponsioen et al., 2014), que brindan una estimación de cuánto tiempo puede llevar que un área afectada por la conversión de tierras vuelva a alcanzar un estado de hábitat más cercano a su condición original.

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la batería con química NCA requieren más espacio de tierra para su ciclo de vida completo (Figura 41) sin embargo, en ambos casos las áreas de ocupación del suelo más significativas para esta batería son los vertederos, las áreas forestales gestionadas intensivamente, las áreas industriales y los sitios de

extracción mineral. Debido a esto podemos sugerir que se necesita implementar políticas más estrictas para el reciclaje de baterías de iones de litio de esta manera se puede prevenir una temprana escasez de minerales críticos y una menor pérdida de especies.

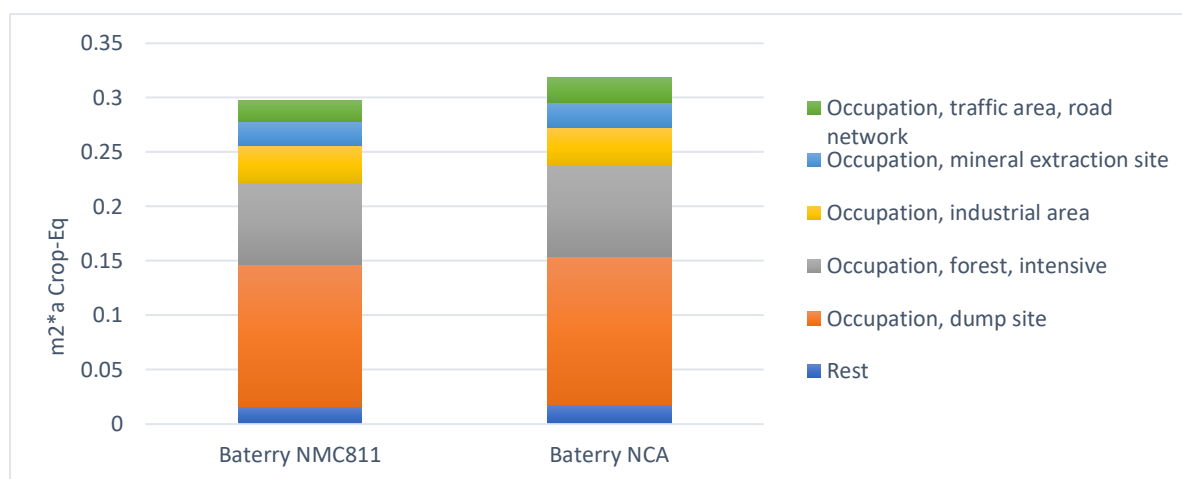


Figura 41. Comparación del Uso de suelo (LOP) entre baterías NCA y NMC811

5.2.4 Consumo potencial de agua

La figura 42 muestra una gráfica comparativa del "Potencial de Consumo de Agua (WCP) no LT" para dos tipos de baterías de iones de litio: la batería NMC811 y la batería NCA. Los resultados indican que la batería NMC811 tiene un potencial de consumo de agua de aproximadamente $0.5 \text{ m}^3/\text{Kg}$, mientras que la batería NCA presenta un mayor consumo, alcanzando aproximadamente $0.6 \text{ m}^3/\text{Kg}$. Esta diferencia sugiere que, desde la perspectiva del consumo de agua, la batería NMC811 podría ser una opción más sostenible.

El mayor consumo de agua de la batería NCA podría tener implicaciones significativas en términos de impacto ambiental, especialmente en regiones donde el agua es un recurso escaso. Por lo tanto, es crucial considerar el impacto del consumo de agua en el análisis de sostenibilidad de las baterías de iones de litio, ya que la extracción y procesamiento de materiales críticos para estas baterías pueden intensificar la demanda de agua. La información obtenida a través del ACV puede ser utilizada por los fabricantes y responsables de políticas para tomar decisiones informadas y promover el desarrollo de tecnologías de baterías más sostenibles.

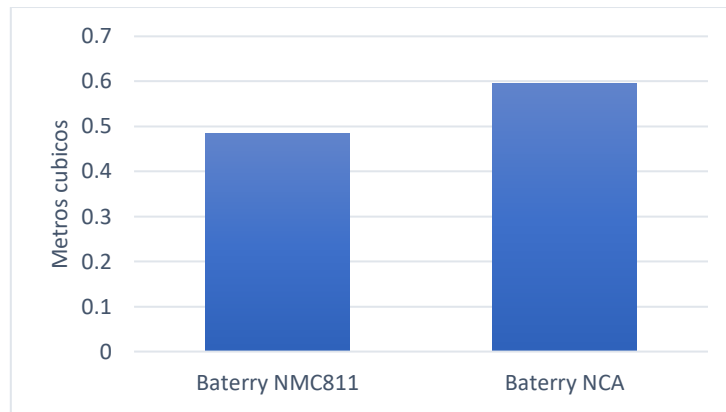


Figura 42. Comparación del Potencial de consumo de agua entre baterías

5.2.5 Potencial de acidificación terrestre (TAP) Kg SO₂-Eq

El Potencial de Acidificación Terrestre (TAP, por sus siglas en inglés) mide la capacidad que tienen ciertas sustancias, cuando se emiten al aire, de generar ácidos que después pueden depositarse en el suelo o el agua, induciendo la pérdida de especies vegetales de los ecosistemas terrestres (Roy et al., 2014). La unidad en que se mide esta categoría de impacto es kilogramos de equivalente de dióxido de azufre (Kg SO₂-Eq), lo que significa que todas las emisiones que causan acidificación (como óxidos de nitrógeno (NO_x), amoníaco (NH₃), dióxidos de azufre (SO₂), entre otros) se expresan en términos equivalentes al SO₂, ya que este compuesto es uno de los principales responsables de la acidificación tal y como podemos ver en los resultados de este caso de estudio en la figura 43.

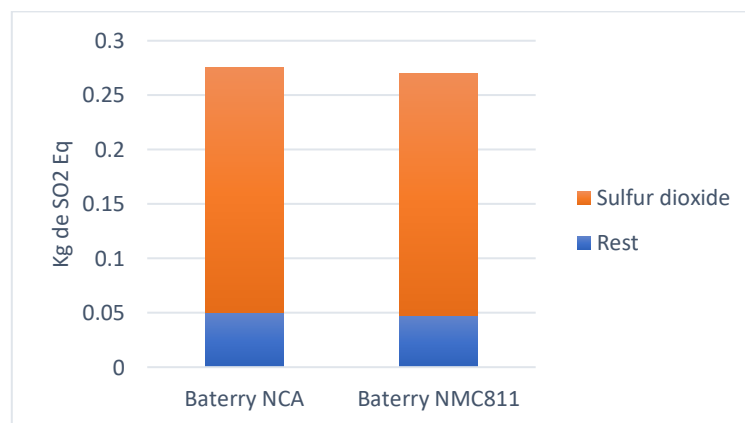


Figura 43. Comparación del potencial de acidificación terrestre (TAP)

5.2.6 Ecotoxicidad terrestre

El factor de efecto ecotoxicológico describe cómo la concentración ambiental de una sustancia química afecta la probabilidad de daño a las poblaciones de diferentes especies. Para ellos se utiliza el equivalente en kilogramos de 1,4 - dicloro benceno (1,4DCB-eq) como medida para caracterizar el destino y los efectos de las emisiones químicas en diferentes áreas, como la toxicidad humana, la ecotoxicidad en agua dulce, marina y terrestre. (Van Zelm et al., 2009).

En la figura 44, que ilustra el potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP), también se nota una similitud en los impactos entre ambas baterías, un valor total de 673.7 Kg para la batería NCA y 661.4 Kg para la NMC811 de 1,4DCB-eq. Aquí, los mayores contribuyentes al impacto son la fundición de concentrado de cobre y mineral de sulfuro, la operación y el beneficio de minas de níquel, y la producción de cobalto. De nuevo, la batería NCA muestra un impacto ligeramente mayor en algunas categorías específicas, pero en general, las diferencias entre ambas baterías no son muy pronunciadas.

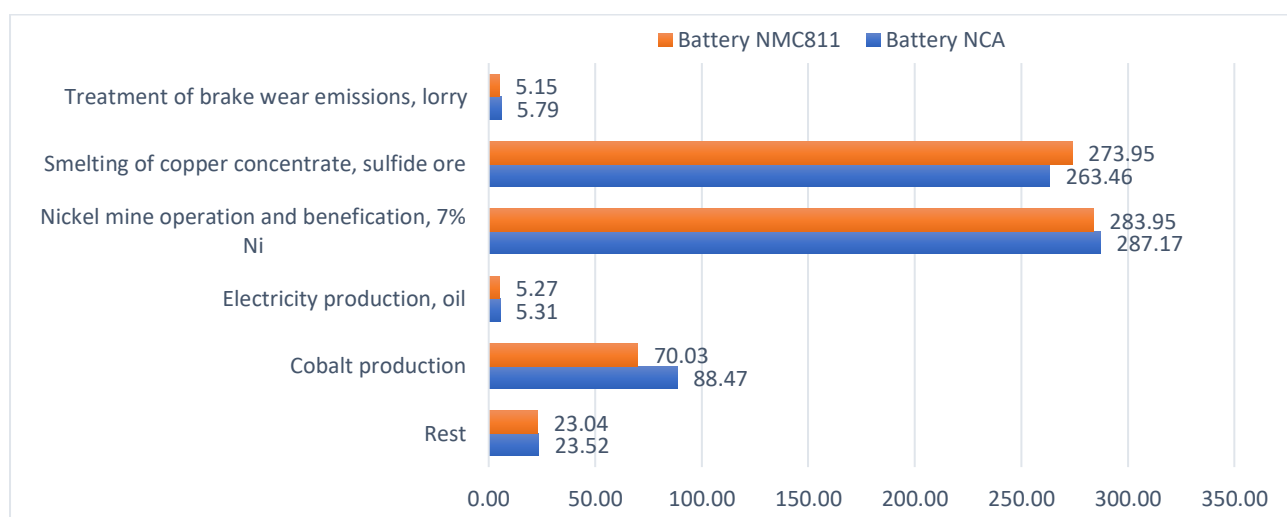


Figura 44. Potencial de ecotoxicidad terrestre (TETP) kg 1,4-DCB-Eq

En resumen, ambas químicas de baterías presentan impactos similares en términos de ecotoxicidad en el suelo. Las diferencias, aunque presentes, no son significativamente grandes, lo que sugiere que ambos tipos de baterías tienen un impacto ambiental comparable en esta categoría específica del ACV.

5.3 Resultados del modelo de Dinámica de sistemas

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del modelo de simulación de la cadena de suministro de las baterías de iones de litio, tomando en cuenta la disponibilidad de minerales críticos como el níquel, cobalto y litio en los países involucrados en el Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá (T-MEC). El propósito de este análisis es evaluar la capacidad de producción de baterías de iones de litio para vehículos eléctricos en la región de América del Norte, considerando tanto las reservas disponibles de estos recursos como las posibles limitaciones productivas.

A lo largo de este capítulo se exploran las dinámicas que determinan la eficiencia y viabilidad de la cadena de suministro, así como el impacto que tiene la disponibilidad de minerales en la producción final de baterías. Se analizan diversos escenarios que reflejan el comportamiento de la cadena de suministro en función de las variaciones en las reservas de minerales y las demandas de producción de vehículos eléctricos en la región. Estos resultados buscan contribuir al desarrollo de estrategias sostenibles y competitivas para fortalecer la autonomía productiva de los países del T-MEC, reduciendo la dependencia de materias primas y componentes provenientes de regiones externas como China.

Los resultados obtenidos permiten identificar tanto las fortalezas como las áreas críticas dentro de la cadena de suministro regional, proporcionando una visión integral del estado actual y del potencial futuro de la producción de baterías en América del Norte.

5.3.1 Escenario 1 - Producción de baterías sin rebasar las reservas de Cobalto

En este primer escenario, se analiza la producción máxima anual de baterías de iones de litio que los países del T-MEC podrían alcanzar en un horizonte de 30 años, considerando una tasa de crecimiento anual de producción del 1.5%. Para este análisis, se asume que las baterías tienen una capacidad de 80 kW y una densidad energética de 250 Wh/kg. Un aspecto clave de este escenario es que se establece como limitante las reservas de cobalto disponibles, ya que este es el mineral crítico con menor disponibilidad en la región. A partir de estas restricciones, se evalúan los impactos ambientales asociados con la producción de baterías de tipo NMC 811 y NCA, además de analizar en qué medida se podría satisfacer una demanda

hipotética de vehículos eléctricos en función de los recursos limitados de cobalto. Este escenario permite visualizar los desafíos y oportunidades para el crecimiento sostenido de la producción sin comprometer las reservas minerales.

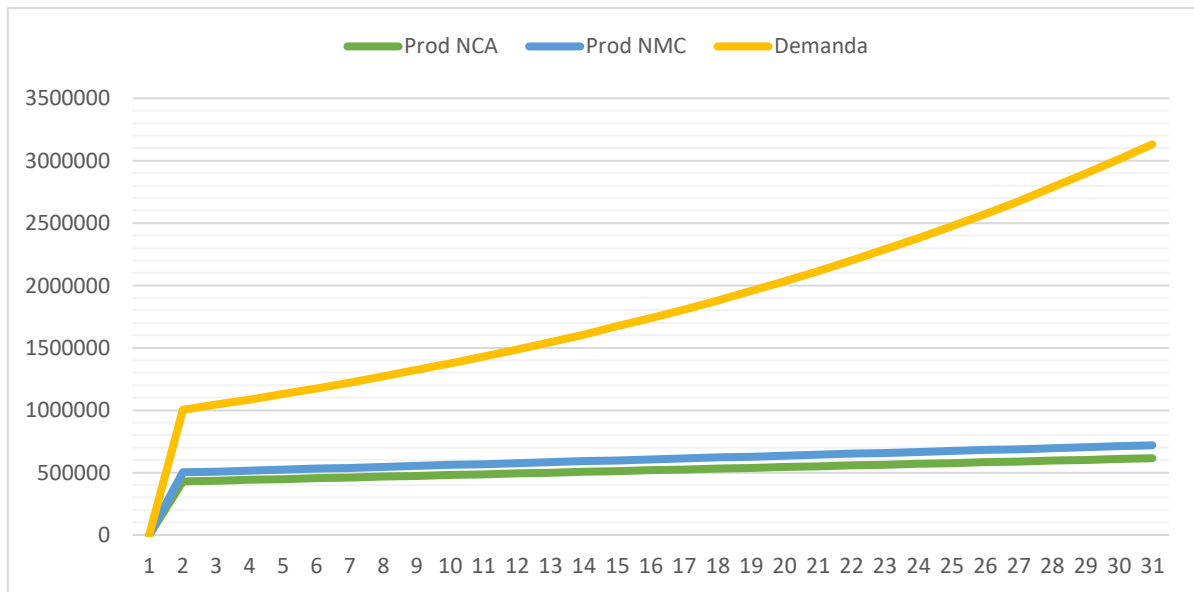


Figura 45. E1 - Producción de baterías Vs Demanda

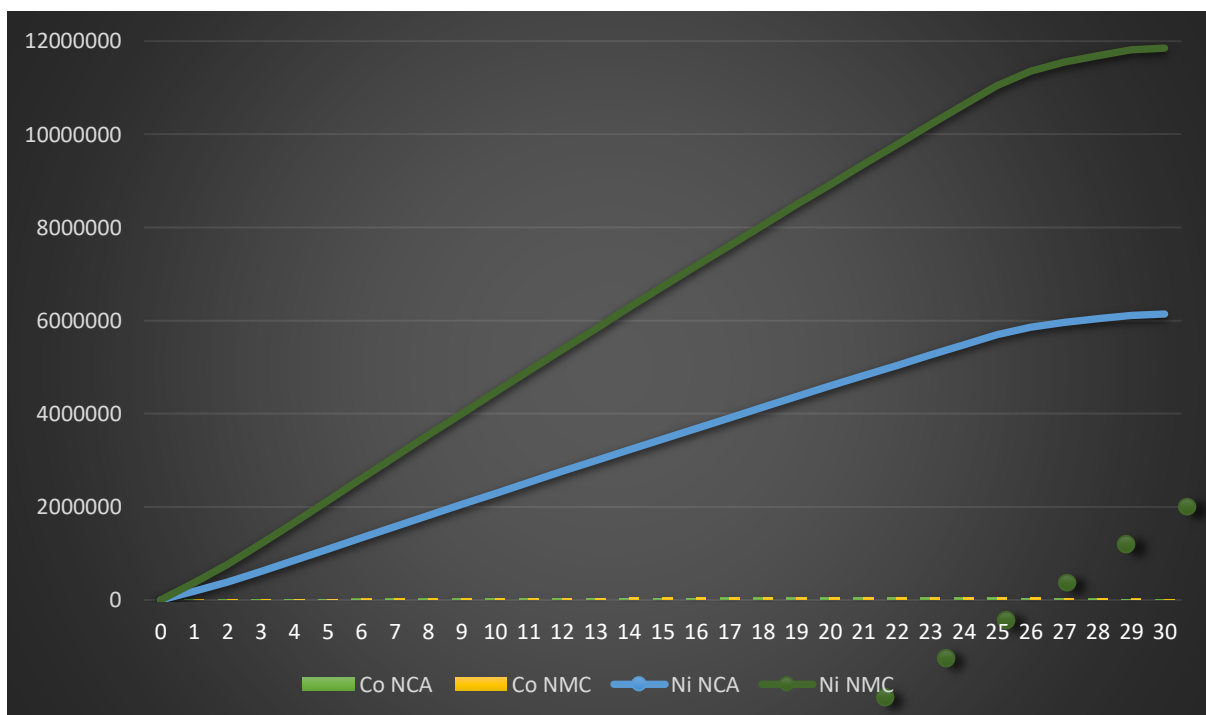


Figura 46. E1 - Acumulación de reservas de NiSO4 y CoSO4

De acuerdo con los resultados presentados en las figuras 45 y 46, se puede concluir que, al limitar la producción de baterías a las reservas disponibles de cobalto, la satisfacción de la demanda es bastante limitada en un horizonte de 30 años. Además, se observa una acumulación significativa de sulfato de níquel debido a su baja utilización en este escenario, en cuanto a las reservas de cobalto estas se mantienen en mínimos y en ambas químicas con un comportamiento similar.

En cuanto a la producción de baterías, la NMC811 muestra una producción un 14.4% mayor en comparación con la batería NCA, dado que esta última requiere una mayor cantidad de sulfato de cobalto en su composición. Sin embargo, a pesar de esta diferencia en producción, los impactos en el potencial de calentamiento global entre ambas químicas difieren solo en un 10%, y la diferencia en el consumo de agua es inferior al 1% (figuras 47 y 48). Esto hace que la batería con química NMC811 sea la opción más eficiente para producir la mayor cantidad de baterías con un menor impacto al cambio climático y al uso de agua.

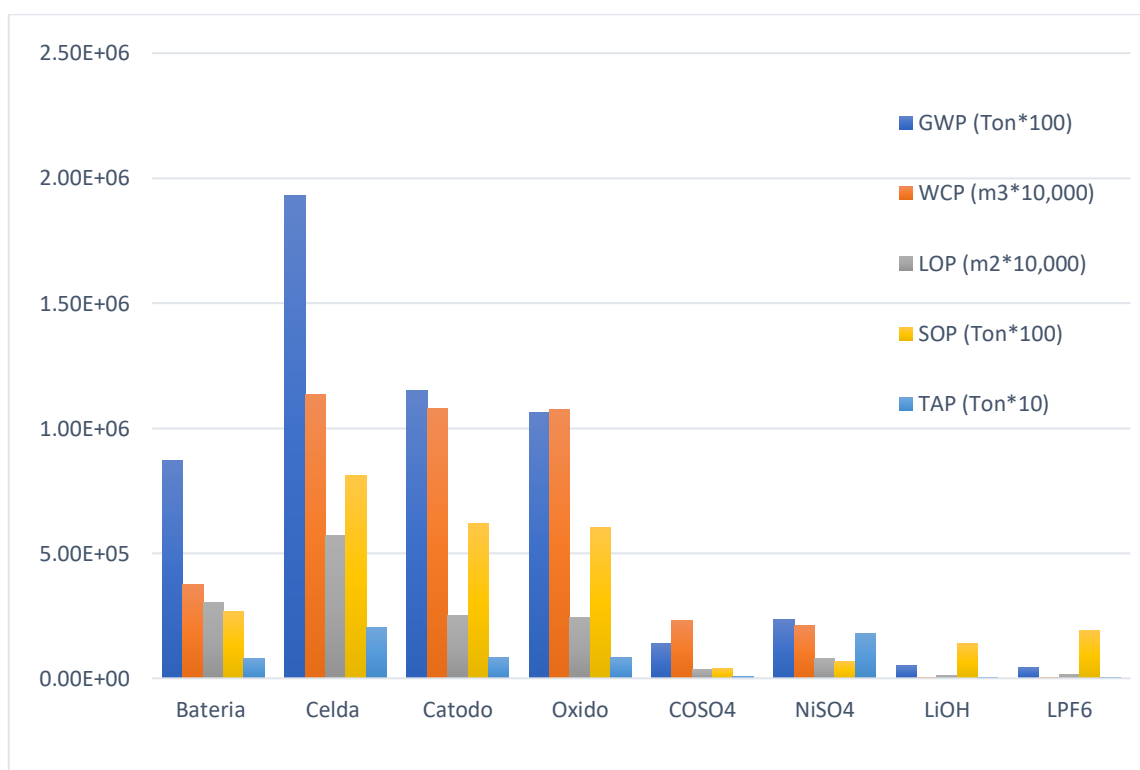


Figura 47. Impactos ambientales batería NCA

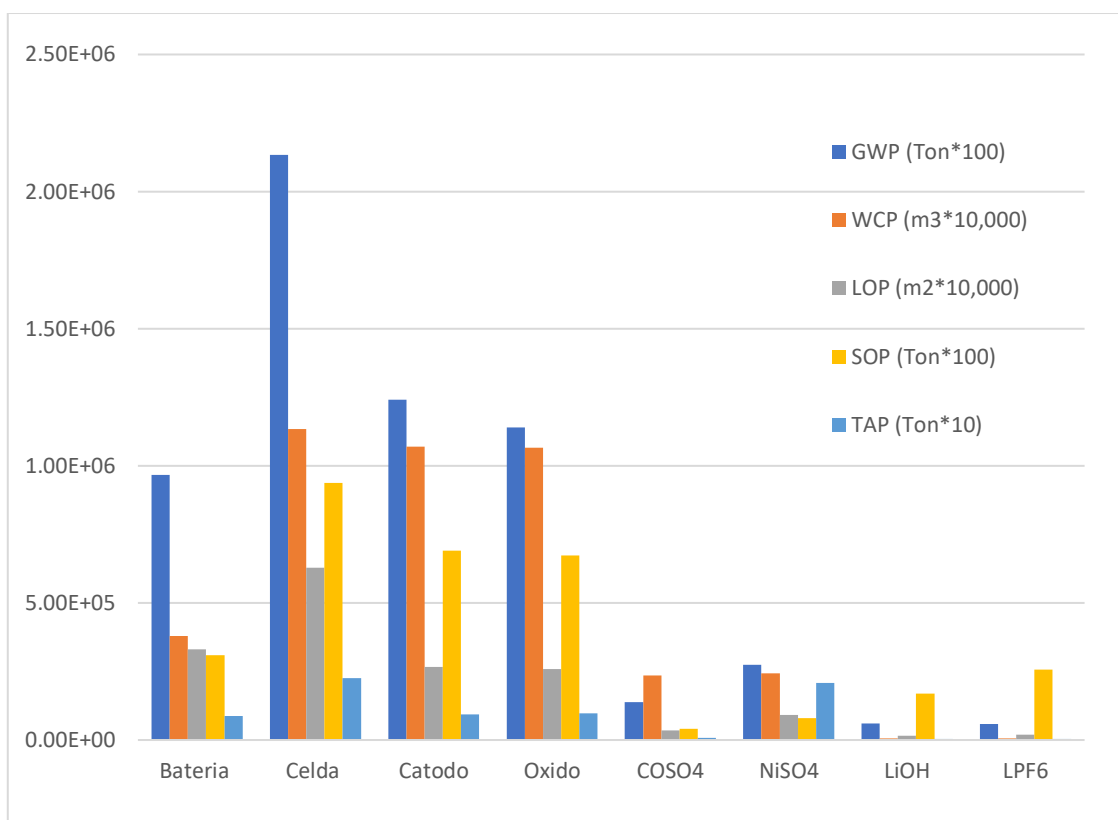


Figura 48. Impactos ambientales batería NMC811

Por otro lado, la etapa de producción de celdas es la que genera el mayor impacto en términos de Potencial de Calentamiento Global (GWP), con 19,299,1557.12 toneladas de CO₂ equivalente, seguida por la producción del cátodo y del material activo del cátodo (óxido NMC811 o NCA), además de ser los procesos con un mayor consumo de agua. Estos resultados subrayan que la fabricación de celdas, cátodos y materiales activos es intensiva tanto en energía como en recursos, lo cual tiene implicaciones significativas en las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de agua. Optimizar estos procesos clave, junto con la implementación de estrategias de reciclaje y reducción de emisiones, podría contribuir de manera importante a minimizar los impactos ambientales de la cadena de suministro de baterías para vehículos eléctricos.

5.3.2 Escenario 2 - Producción de baterías con incremento lineal en la producción y respetando las reservas de níquel.

En este escenario, a diferencia del anterior donde se establecía como limitante la producción de CoSO_4 , se utilizarán las reservas de NiSO_4 como el principal factor restrictivo. Esto permitirá un aumento en la producción de baterías y una mejor satisfacción de la demanda proyectada. Algunos de los parámetros del modelo se mantienen constantes: un horizonte temporal de 30 años, una tasa de crecimiento anual lineal de producción del 4%, una capacidad de batería de 80 kW y una densidad energética de 250 Wh/kg. Al igual que en el escenario previo, se evalúan los impactos ambientales asociados a la producción de baterías con químicas NMC811 y NCA. Este enfoque permite identificar los desafíos y oportunidades para lograr un crecimiento sostenido en la producción de baterías, lo que implicaría la posible importación de cobalto para mantener la cadena de suministro en América del Norte operativa y eficiente.

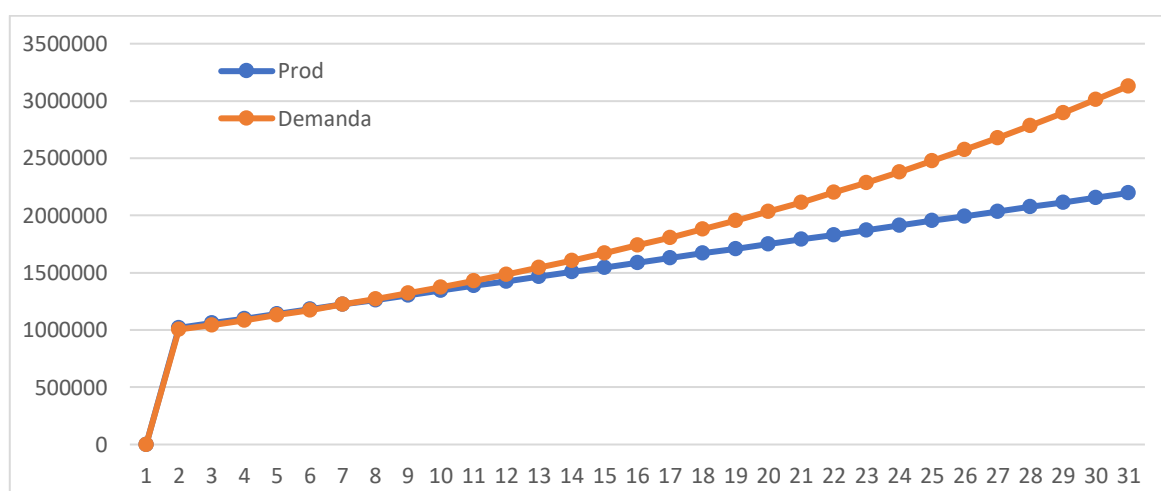


Figura 49. E2 Producción Vs demanda

Debido a que para este escenario no se limita por las reservas de cobalto esto permite incrementar la producción inicial a 1,015,000.00 de unidades para el primer año lo que estaría rebasando a la demanda hipotética planteada durante los primeros 6 años, sin embargo y debido al comportamiento exponencial de esta para el año 7 la producción volvería a quedar por debajo de la demanda como se observa en la figura 49, este comportamiento correspondería a ambas baterías ya que para este escenario se planteó una producción igualitaria para observar el comportamiento de las reservas de sulfato de níquel y cobalto respectivamente.

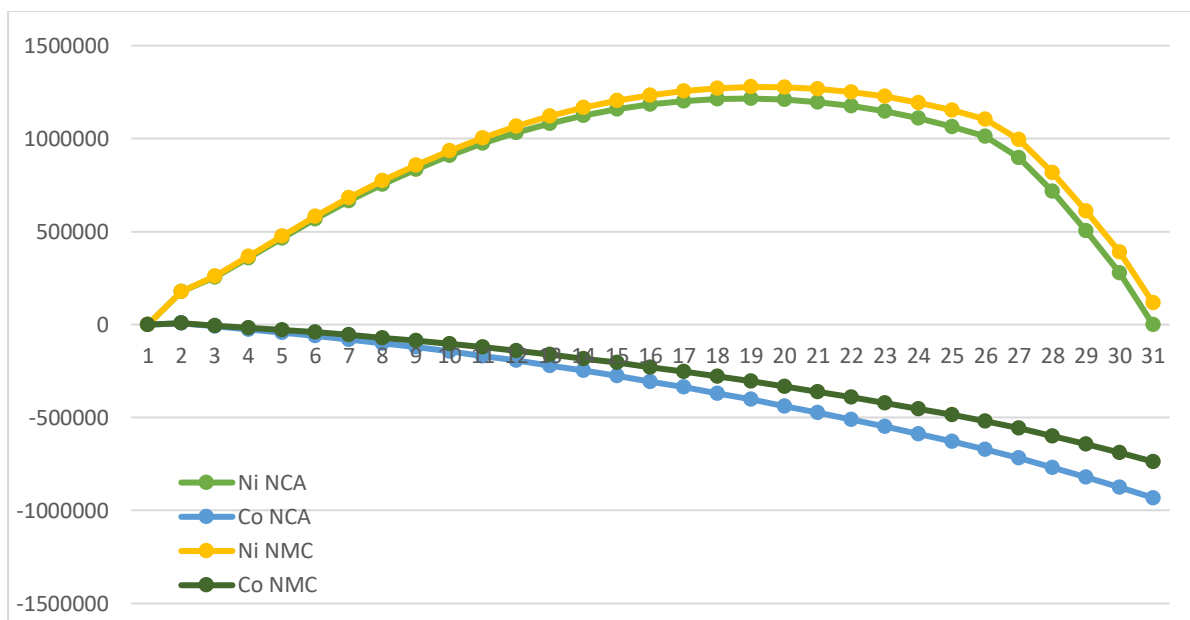


Figura 50. E2 - Acumulación de reservas de NiSO_4 y CoSO_4

En la figura 50 podemos observar que a partir del año 3 comienza a visualizarse un déficit de las reservas de cobalto el cual sigue una tendencia negativa que para el año 15 es de -306,329.239 toneladas de sulfato de cobalto para la batería con química NCA y de -228,518.002 para la batería NMC811, sin embargo, para finales del año 30 dicho déficit incrementa a poco más del triple de las cifras anteriormente mencionadas.

En cuanto a los impactos ambientales como ya se había demostrado en el escenario anterior la batería NCA es la que muestra mayores índices de impacto en todas las categorías si se iguala la producción de estas (Figuras 51 a 55), sin embargo, esto no sucede en las etapas de obtención de las sales de litio como lo son el hidróxido de litio y hexafluorofosfato de litio esto puede visualizarse de mejor manera en la figura 60 correspondiente al SPO, estas sales de litio son materiales clave en la obtención del Óxido de NCA o NMC811 y el electrolito utilizado en las baterías, este mayor impacto de la batería NMC811 ocurre como consecuencia de una mayor utilización de estos recursos.

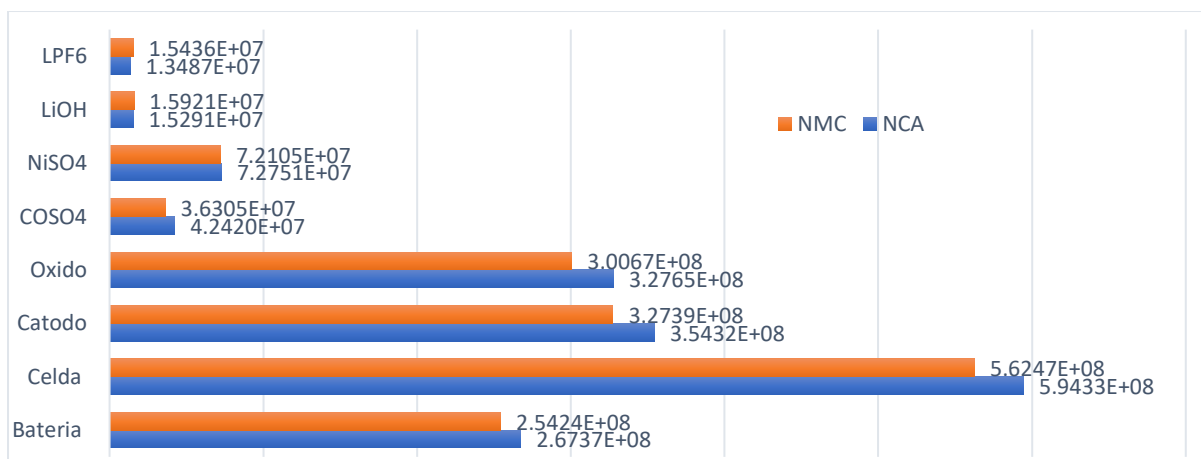


Figura 51. E2 Potencial de calentamiento global (GWP1000) Ton CO2-Eq

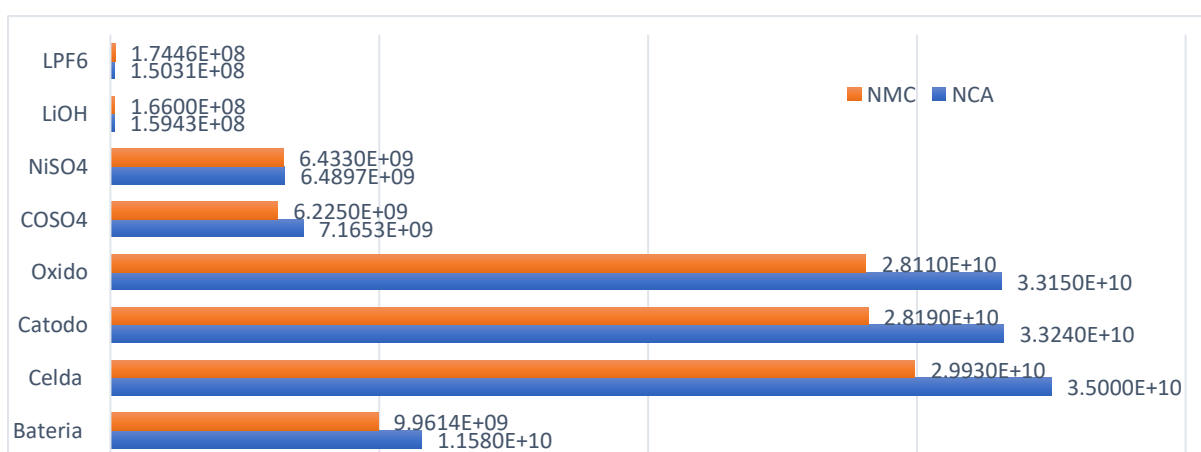


Figura 52. E2 - Potencial de consumo de agua (WCP) metro cúbico

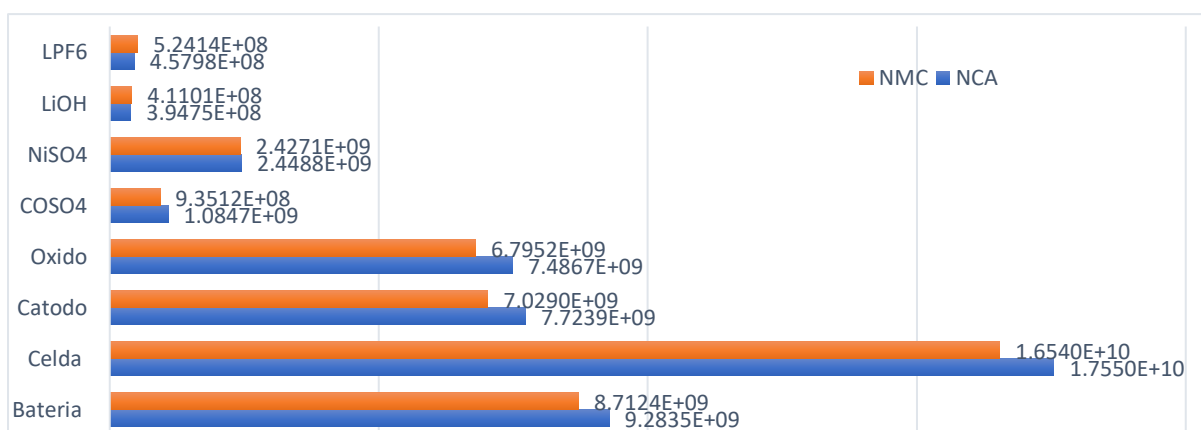


Figura 53. E2 - Uso de la tierra, ocupación de tierras agrícolas (LOP) m2*a cultivo-Eq

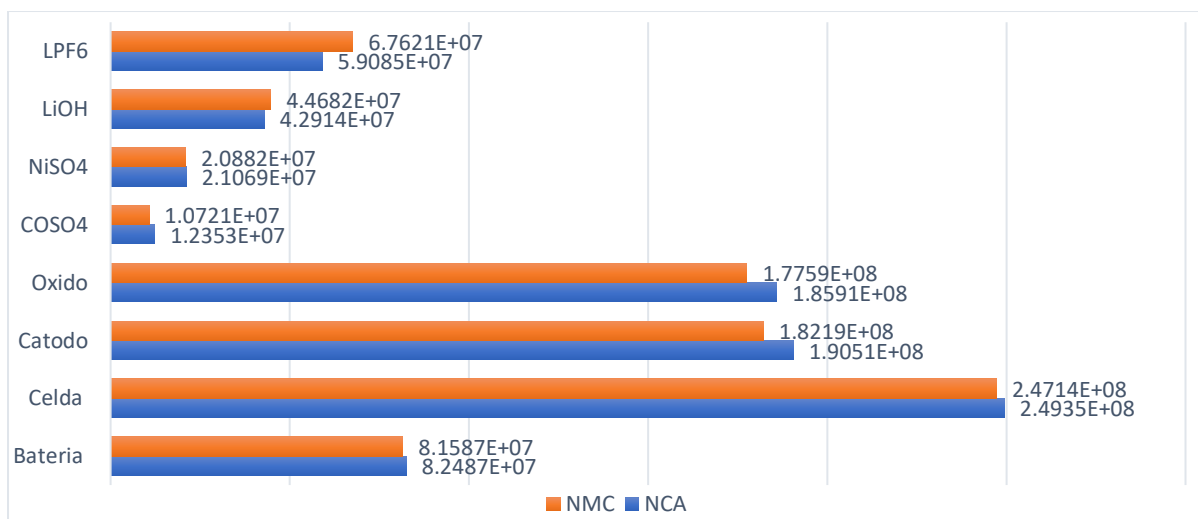


Figura 54. E2 - Recursos: metales/minerales, potencial mineral excedente (SOP) Ton Cu-Eq

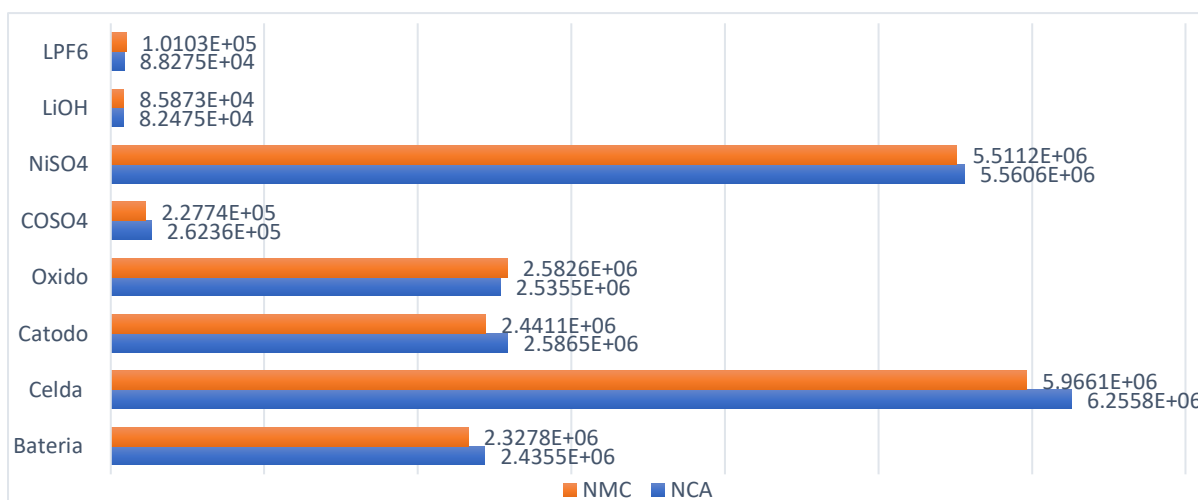


Figura 55. E2 - Potencial de acidificación terrestre (TAP) Ton SO2-Eq

Es bien sabido que el litio al igual que el cobalto y el níquel es uno de los elementos imprescindibles en la fabricación de baterías, así como también uno de los más escasos, sin embargo, el depósito reportado por el proyecto Sonora Lithium ubicado en México resulta ser lo suficientemente sustancial para satisfacer la producción de baterías de iones de litio planteada en este escenario, lo cual podemos observar dicho comportamiento en la figura 56.

Sin embargo, el gobierno de México ha tomado una medida significativa respecto a sus reservas de litio. En abril de 2022, el Senado mexicano aprobó una iniciativa presidencial para

nacionalizar la explotación del litio (El Financiero, 2022). Esta decisión prohíbe las concesiones a empresas privadas para extraer litio, significa que ahora solo el Estado Mexicano puede explotar este mineral valioso, no obstante, a la fecha de realización de este proyecto no se sabe más acerca de que acciones tomará el gobierno mexicano acerca de este recurso ya que tiene la posibilidad de ser una pieza clave en la cadena de suministro de baterías para autos eléctricos.

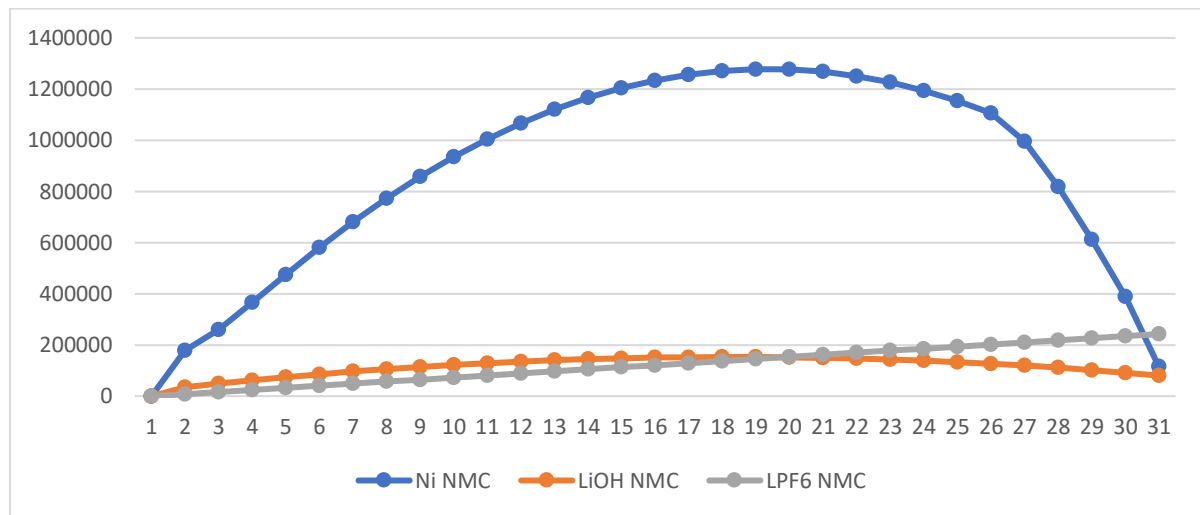


Figura 56. Reservas de Níquel y Litio

5.3.3 Escenario 3 – Aumento de la densidad energética de la batería.

La constante evolución de la capacidad y la densidad energética de las baterías de iones de litio desempeña un papel crucial en la optimización de los recursos por varias razones, al aumentar la densidad energética (Wh/kg), los fabricantes pueden lograr la misma capacidad de batería utilizando menos materias primas. Esto es particularmente importante porque materiales como el níquel, el cobalto y el litio son recursos finitos. Una batería más liviana también resulta en un menor peso total para los vehículos eléctricos, lo que mejora la eficiencia del vehículo. El desarrollo de baterías de mayor capacidad con una densidad de energía mejorada también contribuye a una mayor vida útil. Las baterías con mayor capacidad y densidad de energía serán sometidas a menos ciclos de carga para el mismo rendimiento, lo que reduce el desgaste con el tiempo. Esto se traduce en menos reemplazos, lo que reduce la demanda general de materiales y energía utilizados en la producción de nuevas baterías.

Estos hechos, inspiran a proponer el siguiente escenario en el cual mantendremos los mismos parámetros del escenario numero 2 pero se realizará un cambio en la densidad energética de las baterías la cual pasará de 250 a 320 Wh/Kg, esto repercutirá en el peso de la batería, ya que pasará de tener un peso de 320 Kg a 250 Kg sin afectar la capacidad de esta, manteniéndola en 80 KWh, de esta manera podremos observar en la figura 57 y 58 los cambios que se generan en cuanto a los impactos ambientales.

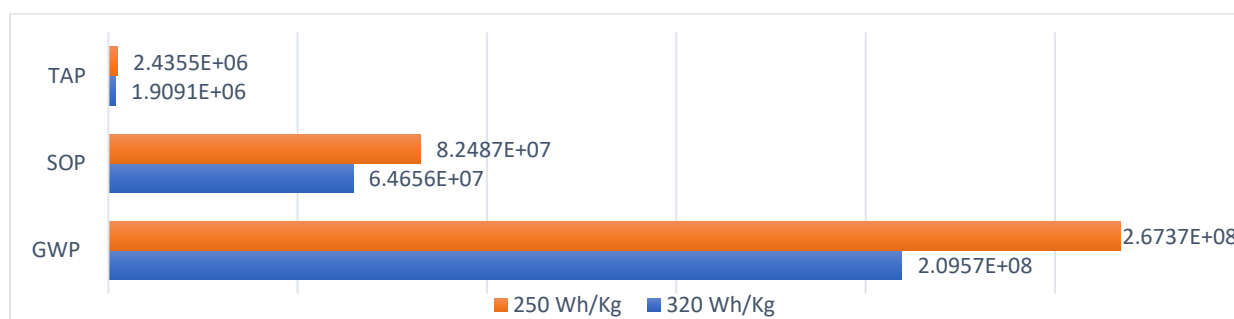


Figura 57. Batería NCA 250 Wh/Kg Vs 320 Wh/Kg (parte 1)

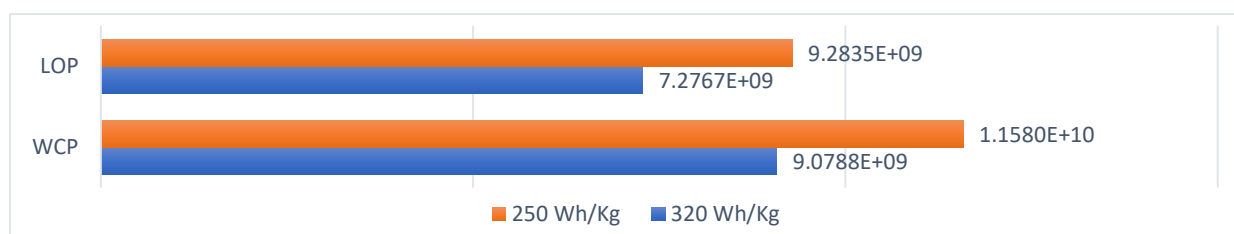


Figura 58. Batería NCA 250 Wh/Kg Vs 320 Wh/Kg (parte 2)

La disminución de impactos ambientales en lo que respecta a la fabricación de la batería es notoria, en los gráficos anteriores observamos como los impactos disminuyeron en alrededor de un 20 % en todas las categorías, este mismo comportamiento ocurre en la batería con química NMC811 por lo que la constante innovación en este aspecto de las baterías de iones de litio puede reducir significativamente los impactos generados por esta industria.

5.3.4 Escenario 4 – Cambiando a una producción con crecimiento exponencial.

Según los datos recopilados por Kelley Blue Book, una empresa especializada en la valoración de vehículos y en investigación automotriz, en 2022 se vendieron 812,821 vehículos eléctricos en Estados Unidos, y en 2023 esa cifra aumentó a 1,189,051, lo que representa un

incremento del 46.29% (Yap Laurance, 2023). Sin embargo, para este escenario se considerará un crecimiento porcentual anual compuesto del 17% para simular la demanda, con un horizonte temporal de 15 años. El objetivo será igualar la producción a este ritmo de crecimiento acelerado para analizar cómo se comportan las reservas de minerales críticos y los impactos ambientales asociados a dicha producción (ver figura 59).

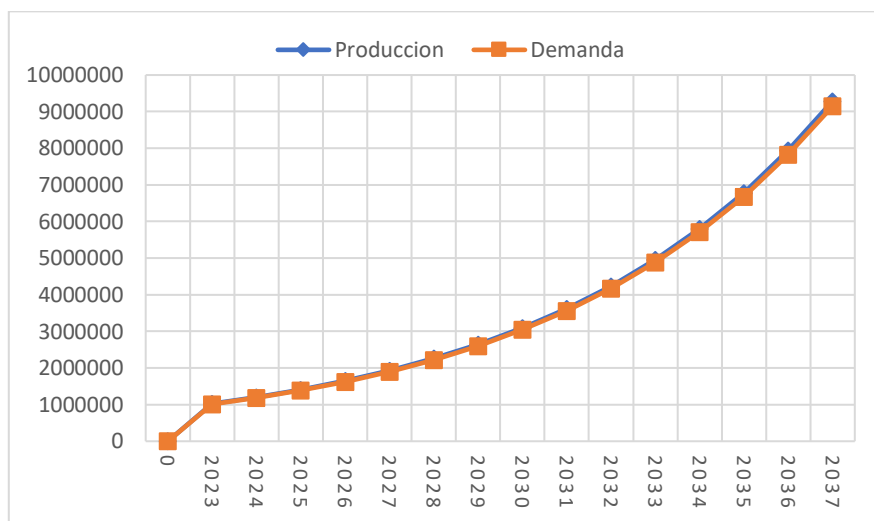


Figura 59. Producción Vs demanda

El escenario en el que la producción coincida con la demanda en una trayectoria de crecimiento exponencial como la que se muestra en el gráfico (Figura 59) es posible, pero desafiante. Dependería de la alineación de múltiples factores, incluida la disponibilidad de materia prima, los incentivos gubernamentales y el desarrollo de infraestructura global. pero, dado el ritmo actual de progreso tecnológico e industrial, no está del todo fuera de nuestro alcance, especialmente si se logran avances en la eficiencia de la cadena de suministro y en la fabricación de baterías. Sin embargo, siguen existiendo riesgos e incertidumbres importantes, en particular en torno a las limitaciones de recursos y al clima económico mundial.

En relación con las reservas de minerales críticos de grado batería, se observa que las reservas de litio son suficientes para sostener una producción con un crecimiento acelerado, como el que se plantea en este escenario (ver figura 60).

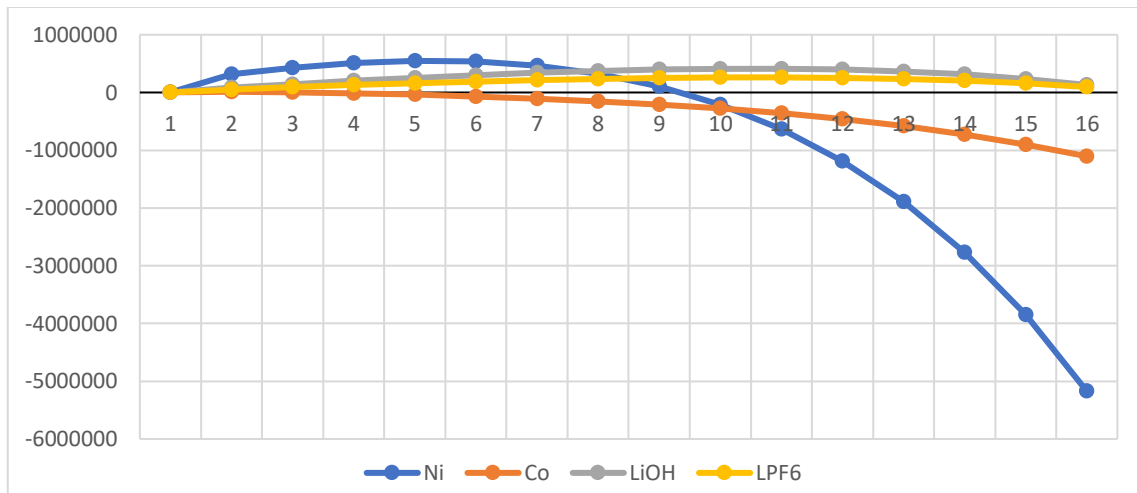


Figura 60. Reservas de minerales grado batería

Sin embargo, el sulfato de cobalto, al igual que en los escenarios anteriores, comienza a mostrar un déficit a partir del tercer año. Lo más notable es la significativa disminución de las reservas de sulfato de níquel, que experimenta una caída drástica a partir del décimo año, lo cual es sorprendente, ya que este mineral se reporta como el más abundante. Esta disminución se debe a su mayor participación en la producción del material activo del cátodo. Es necesario, además, evaluar el comportamiento de las reservas restantes en los proyectos mineros y del material ya extraído que está a la espera de ser procesado lo cual se puede observar en la figura 61 y 62.

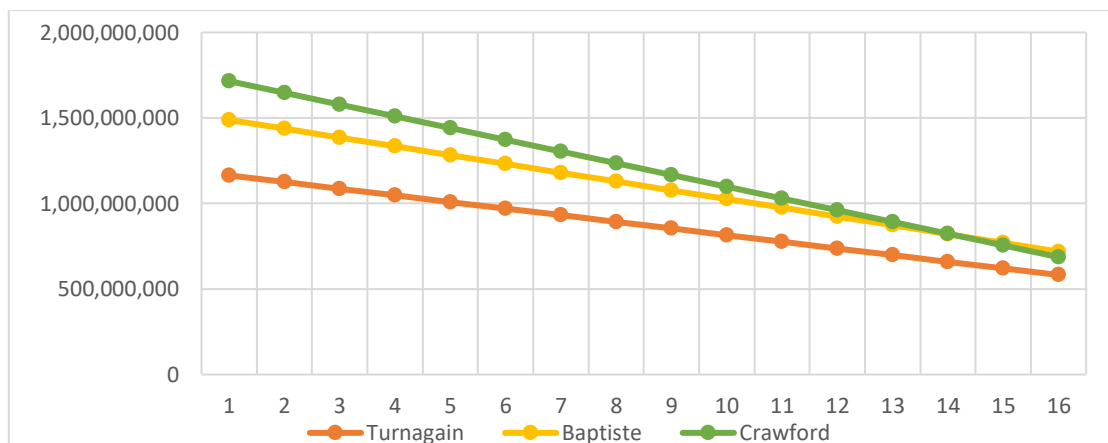


Figura 61. Reservas de proyectos mineros

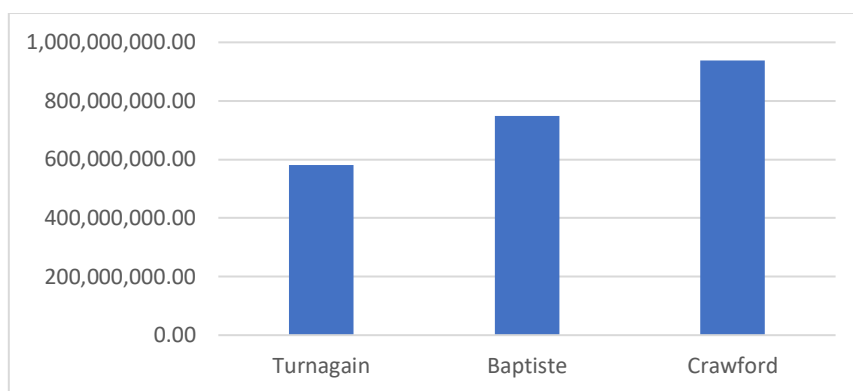


Figura 62. Mineral extraído y en espera a ser procesado.

Según los datos reportados por los proyectos mineros, después de 15 años aún existe una considerable cantidad de mineral disponible para extraer y procesar (ver Figuras 61 y 62). Esto indica que, aunque las reservas de minerales críticos como el níquel, cobalto y litio sean suficientes, la capacidad de extracción y procesamiento podría convertirse en un factor limitante para la producción de baterías de iones de litio. Esta limitación es especialmente relevante si las capacidades de extracción y refinación no logran acompañar el crecimiento exponencial de la demanda proyectada.

Es importante destacar que, aunque la disponibilidad de los recursos es favorable, el verdadero desafío radica en la infraestructura minera y la capacidad industrial para transformar estos recursos en materiales aptos para la producción de baterías. Factores como el desarrollo de nuevas plantas de procesamiento, la eficiencia en la cadena de suministro y las restricciones ambientales y regulatorias pueden influir negativamente en la capacidad de las empresas para satisfacer la creciente demanda. Por tanto, es fundamental no solo monitorear las reservas minerales, sino también garantizar que las capacidades de extracción, procesamiento y refinación se amplíen de manera proporcional al crecimiento del mercado de vehículos eléctricos. Esto requerirá inversiones continuas en infraestructura y tecnología, así como la cooperación entre los gobiernos de los países involucrados en el T-MEC para fomentar la resiliencia de la cadena de suministro y la sostenibilidad a largo plazo.

En cuanto a los impactos ambientales (figuras 63 y 64) seguimos observando un comportamiento similar al escenario 2, la fabricación de las celdas es la principal fuente de impactos ambientales, especialmente en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero y

uso de agua, la batería NCA es la que muestra mayores índices de impacto en todas las categorías si se iguala la producción de estas.

Sin embargo debido al cambio en la densidad energética en categorías como la ocupación de tierras (LOP) donde la etapa de la fabricación de la batería ocupaba el segundo lugar solo después de la fabricación de la celda ahora pasa al cuarto lugar después del material activo del cátodo (Oxido), así como también los impactos de las sales (CoSO_4 , NiSO_4 , LiOH) son menores en comparación con los otros componentes, aunque el sulfato de níquel (NiSO_4) muestra un mayor impacto en términos de GWP pero sobre todo en acidificación terrestre (TAP) donde ocupa el segundo lugar después de la fabricación de celdas.

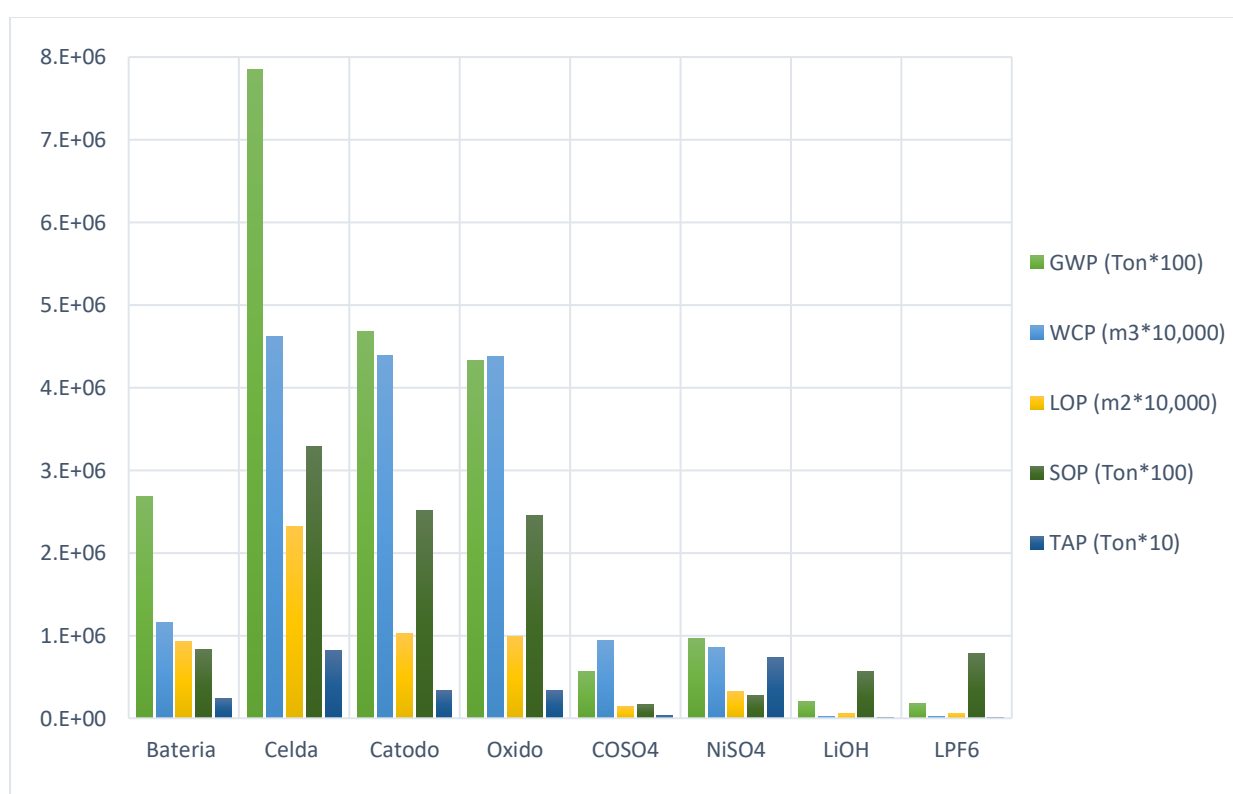


Figura 63. Impactos ambientales batería NCA escenario 4

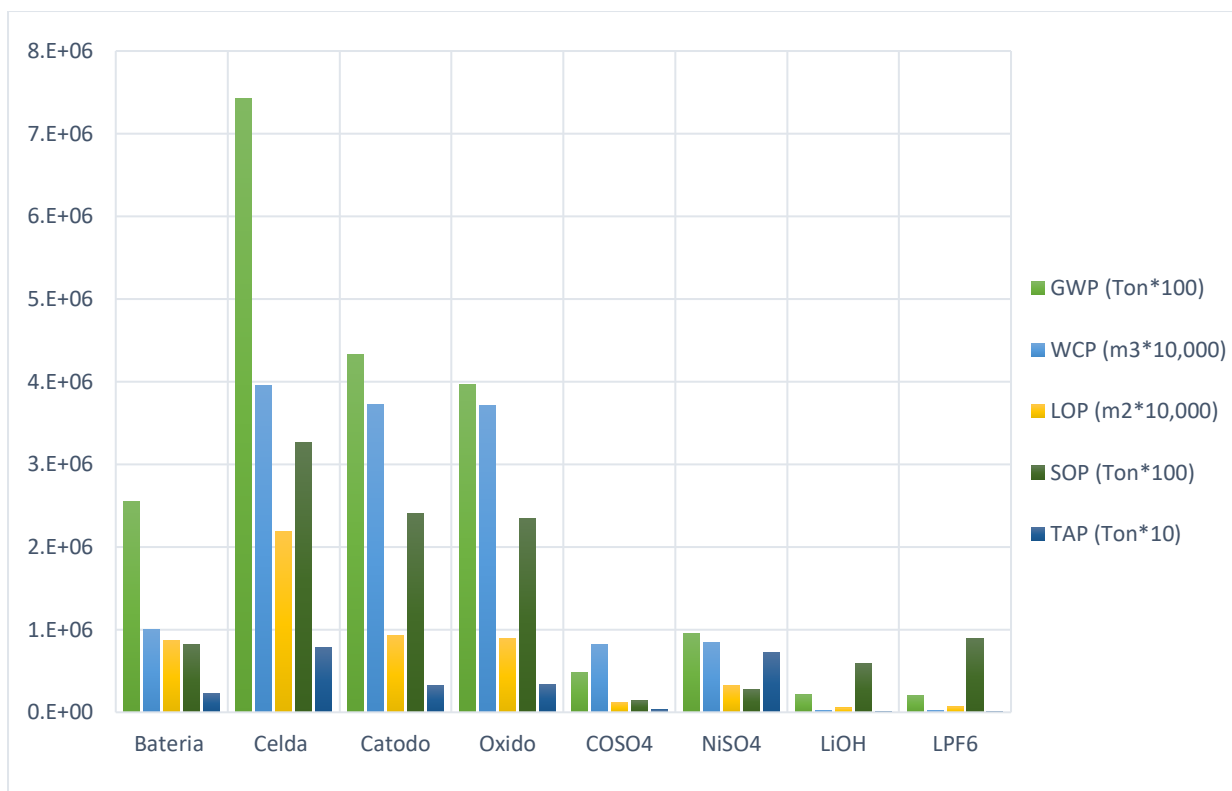


Figura 64. Impactos ambientales batería NMC811 escenario 4

5.3.5 Escenario 5 – Aumento de la producción con respecto a la demanda.

Dado que igualar la producción a la demanda no es un comportamiento común en la producción masiva de automóviles, se plantea un nuevo escenario que busca abordar esta realidad. En este caso, la producción anual de baterías será un 3% mayor que la demanda proyectada, para reflejar un margen de sobreproducción más acorde con los patrones industriales reales. Además, para solventar la limitación observada en el escenario anterior en relación con la capacidad de procesamiento de los minerales críticos, se propone triplicar la capacidad de procesamiento anual reportada por los proyectos mineros. Esta medida tiene como objetivo asegurar que la cadena de suministro pueda sostener el incremento en la producción sin que la extracción y refinación de recursos se conviertan en un cuello de botella.

La tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) de la demanda se mantendrá en el 17%, en línea con las proyecciones iniciales de crecimiento acelerado en la demanda de vehículos eléctricos, posteriormente en el año 15 esta se estabilizará cambiando a un comportamiento más lineal. El horizonte de simulación se ampliará a 20 años, lo que permitirá

analizar no solo el comportamiento de las reservas de minerales críticos como el níquel, el cobalto y el litio, sino también los impactos ambientales generados a largo plazo.

Este escenario permite observar cómo la sobreproducción (ver figura 65), junto con una capacidad minera ampliada, afecta el agotamiento de las reservas, así como las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso del agua y otros impactos ambientales. En particular, se analiza si esta expansión en la capacidad de procesamiento y producción puede mantener un equilibrio sostenible entre la demanda del mercado y los recursos disponibles.

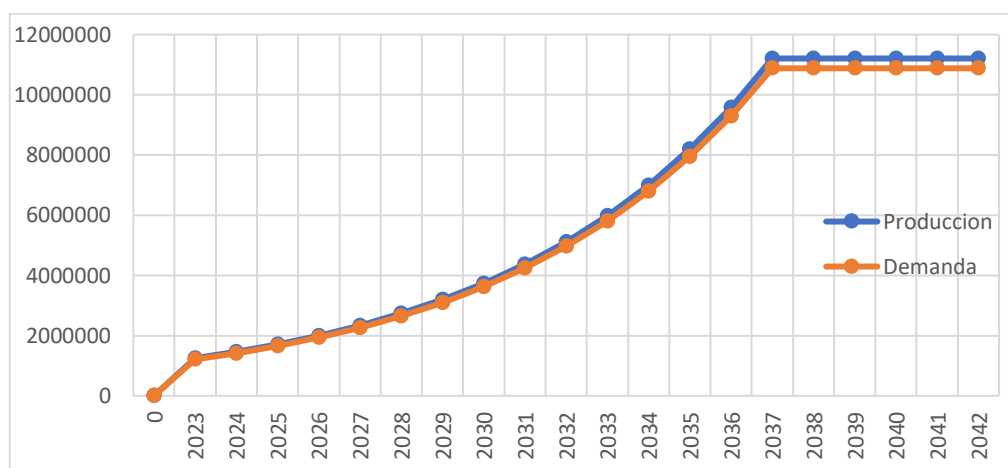


Figura 65. Producción Vs Demanda

Si bien la demanda sigue una tendencia de crecimiento exponencial, llega un punto en el que parece estabilizarse (Figura 73). Esto indica que, a partir de 2037, la demanda podría alcanzar un nivel máximo o de saturación. Esto podría reflejar una estabilización del mercado de vehículos eléctricos, donde la mayor parte del parque automotriz ya sería eléctrico y el crecimiento de la demanda podría disminuir. Sin embargo, esto no es más que una suposición planteada para este posible escenario, la realidad es que esto dependerá de cómo se desarrollen los mercados y las tecnologías en los próximos años, además de factores económicos y políticos que afecten tanto la oferta como la demanda.

En la figura 66 se observan las reservas de minerales críticos para la fabricación de baterías, proyectadas a lo largo de un periodo de tiempo hasta el año 2042. Cada uno de los

minerales clave para la producción de estas baterías tiene un comportamiento particular en cuanto a la disponibilidad de sus reservas.

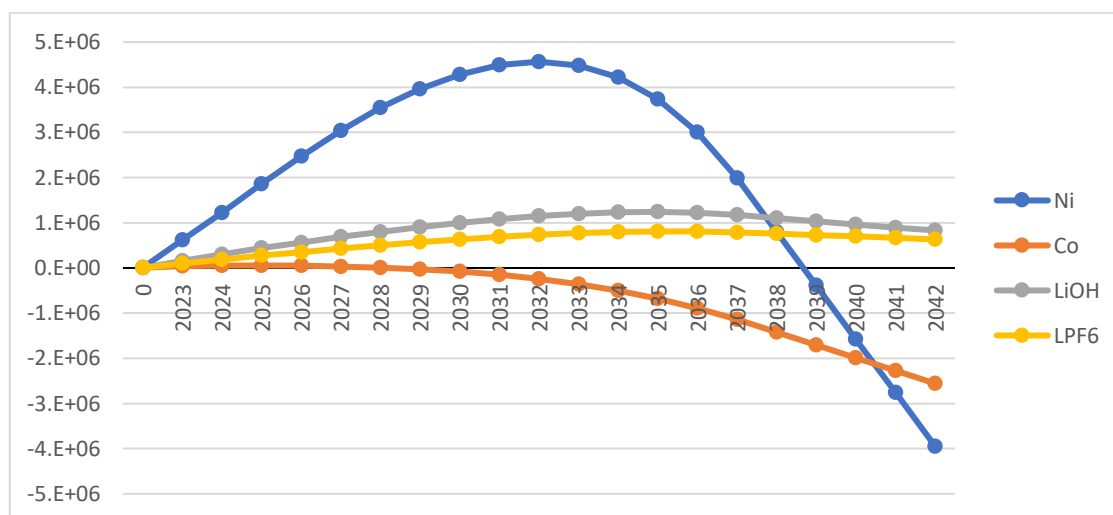


Figura 66. Reservas de minerales grado batería E5

Las reservas de níquel muestran un incremento rápido en los primeros años, alcanzando su punto máximo alrededor de 2031, después de lo cual se produce una disminución acelerada (ver figura 66). Esto sugiere que la demanda de níquel para la producción de baterías, que utilizan cátodos ricos en níquel (como las baterías NCA y NMC), está superando la tasa de extracción o reposición, lo que lleva a un agotamiento significativo de este recurso hacia el final del periodo proyectado. El cobalto muestra un comportamiento similar al níquel, aunque en menor escala.

En cuanto a las sales de litio muestran una tendencia más estable a lo largo del tiempo, esto sugiere que, aunque la demanda de litio está en aumento, las reservas actuales y las capacidades de extracción podrían ser suficientes para satisfacer esta demanda en el corto y mediano plazo. Sin embargo, a largo plazo (hacia 2040), las reservas podrían comenzar a declinar, lo que es preocupante dada la creciente dependencia del litio en la industria de vehículos eléctricos.

Las baterías NCA tienen un mayor impacto ambiental debido al mayor contenido de níquel y cobalto lo que se refleja en las etapas de celdas, cátodos y óxidos (ver fig. 67). El procesamiento de estos minerales y la energía involucrada en su refinamiento generan una mayor huella de carbono. Tanto en NMC811 como en NCA, la etapa de fabricación de la celda

representa el mayor impacto ambiental, lo que sugiere que las tecnologías y procesos utilizados en esta fase son fundamentales para reducir las emisiones.

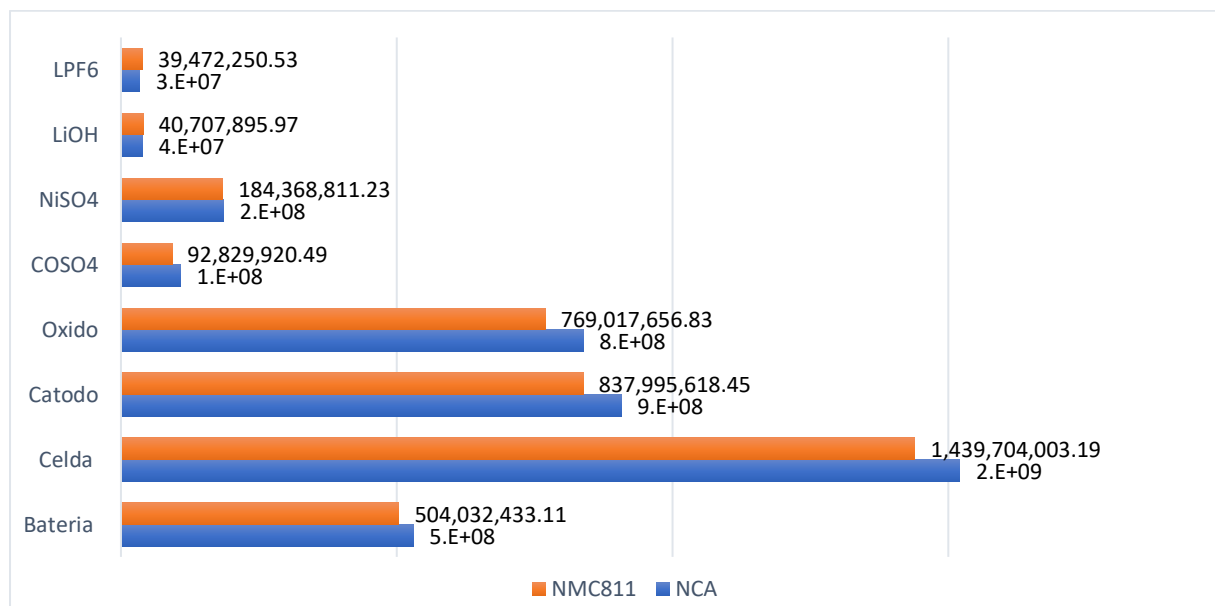


Figura 67. E5 - Potencial de calentamiento global (GWP1000) Ton CO2-Eq

En cuanto al potencial de consumo de agua, en general, para la batería con química NCA se utiliza un volumen mayor de agua en todas las etapas analizadas en comparación con NMC811 (ver Fig. 68).

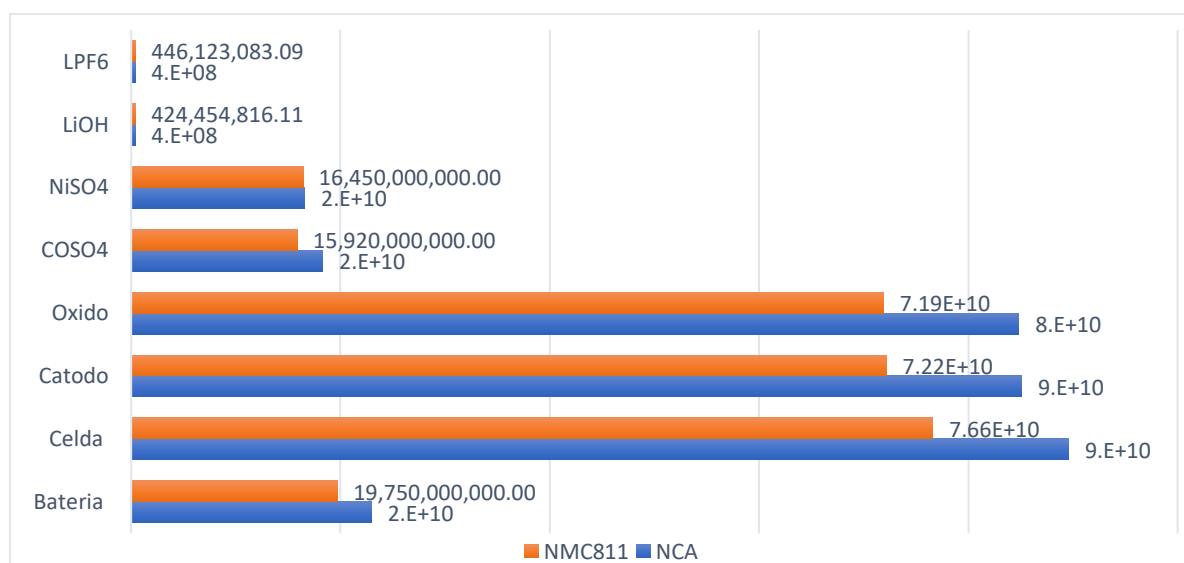


Figura 68. E5 - Potencial de consumo de agua (WCP) metro cúbico

Esto sugiere que, aunque ambas tecnologías tienen ventajas y desventajas, el uso de recursos hídricos es un factor importante a considerar en el desarrollo y selección de tecnologías de baterías esto debido a que México ha mostrado un creciente estrés hídrico en gran parte del país los últimos años, si bien tal y como se muestra en la figura 76 la extracción de sales de litio muestra los menores índices de consumo de agua en la cadena de suministro de las baterías, si se quiere introducir nuevas empresas para la fabricación del cátodo, celdas o material activo del cátodo (Oxido) en el territorio Mexicano se deben establecer en zonas que sufran un menor estrés hídrico durante todo el año y cuenten con una gran cantidad de territorio disponible ya que son estas mismas etapas las que muestran una mayor ocupación de tierras (LOP) como se muestra en la figura 69, donde vemos la etapa de elaboración de las celdas con un impacto bastante superior al del resto de etapas.

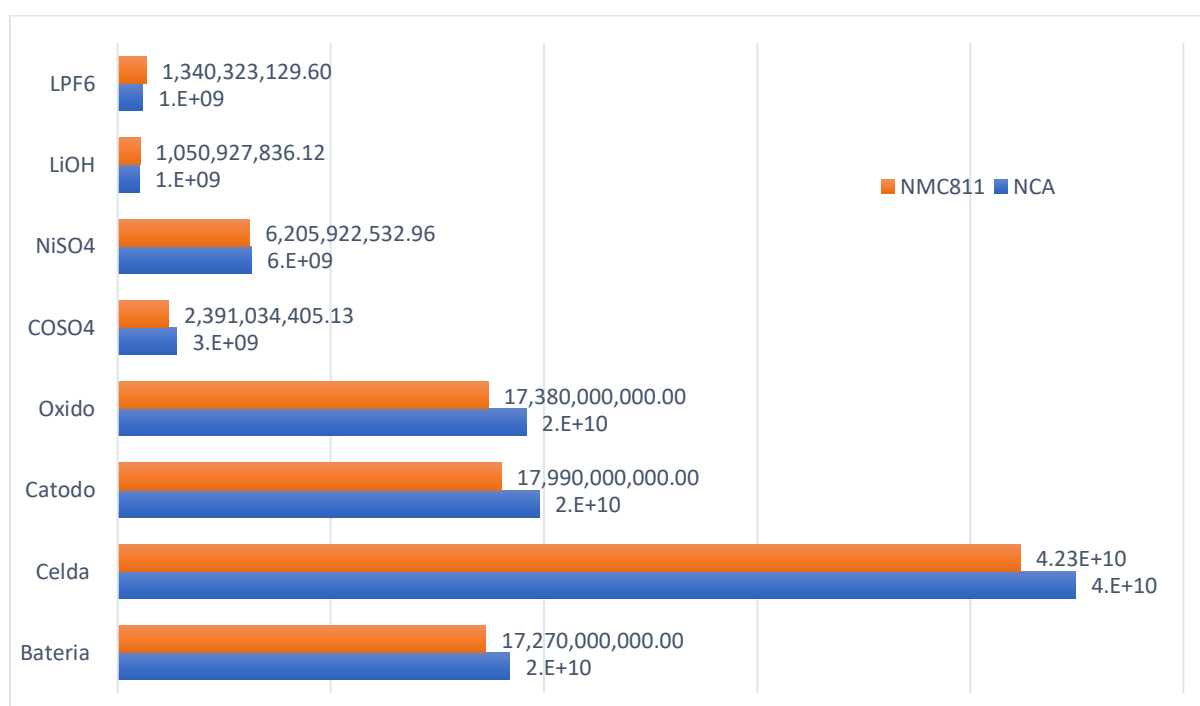


Figura 69. E5 - Uso de tierra, ocupación de tierras agrícolas (LOP) m²*a cultivo-Eq

Los datos mostrados en la figura 70 indican que las baterías NCA requieren una cantidad significativamente mayor de metales y minerales en comparación con las baterías NMC811. Esto sugiere que la producción de baterías NCA ejerce una presión más intensa sobre los recursos naturales, lo que puede llevar a la escasez de ciertos minerales críticos tal y como

lo observamos en la figura 66 correspondiente a la acumulación de recursos minerales en este escenario.

La dependencia de un número limitado de países para el suministro de estos minerales también plantea riesgos geopolíticos y de suministro. Si bien esto no ocurre en minerales como el Níquel, Manganese y Aluminio, debido a su mayor disponibilidad geográfica, en el caso del Cobalto y Litio la situación es totalmente opuesta ya que su producción se encuentra delimitada a unos cuantos países con reservas de estos minerales.

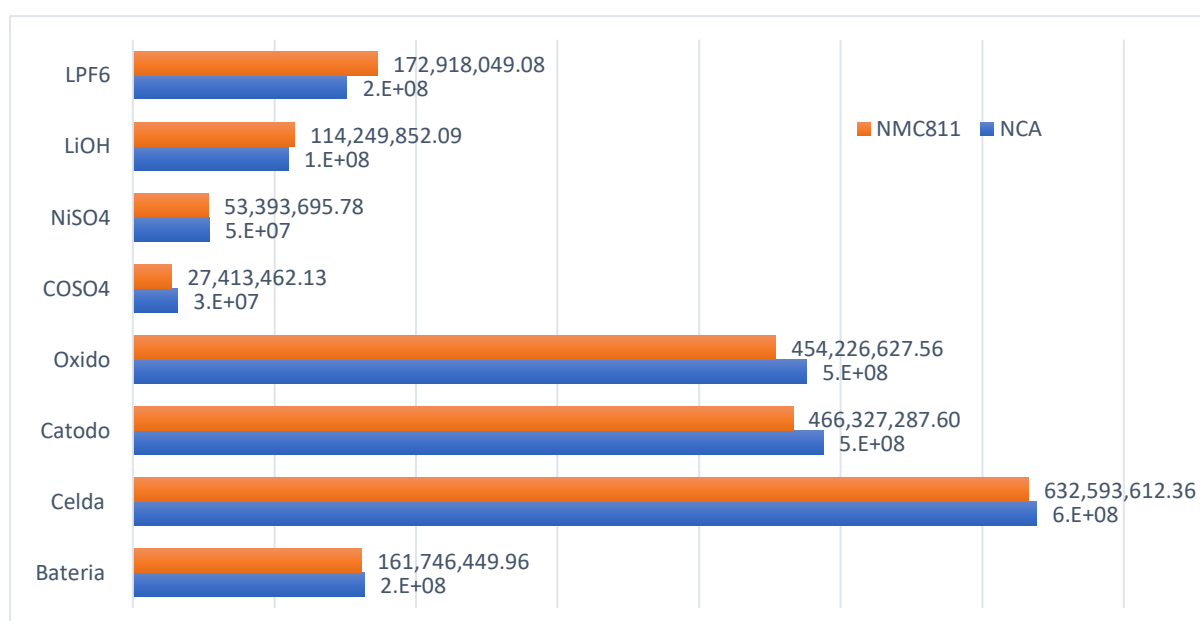


Figura 70. E5 - Recursos materiales: metales, potencial mineral excedente (SOP) Ton Cu-Eq

La figura 71 muestra que las baterías con química NCA (Níquel-Cobalto-Aluminio) presentan un mayor potencial de acidificación terrestre en comparación con las baterías NMC811 (Níquel-Manganese-Cobalto en proporción 8:1:1). Este potencial de acidificación, expresado en toneladas de equivalentes de SO₂, es particularmente elevado en las etapas de producción de los componentes de las baterías, especialmente en la fabricación de celdas y el procesamiento de materiales como el sulfato de níquel (NiSO₄).

La mayor contribución al potencial de acidificación en las baterías NCA se debe en gran medida a las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) generadas durante la producción de cátodos y en la fase de fabricación de las celdas, que alcanza un valor aproximado de 15,270,815.79 toneladas de SO₂ equivalente en las baterías NMC811, comparado con un valor

de 20,000,000 toneladas de SO₂ equivalente en las baterías NCA. Además, el sulfato de níquel, utilizado en mayor cantidad en la batería NCA, es otro componente crítico que contribuye al aumento de estas emisiones.

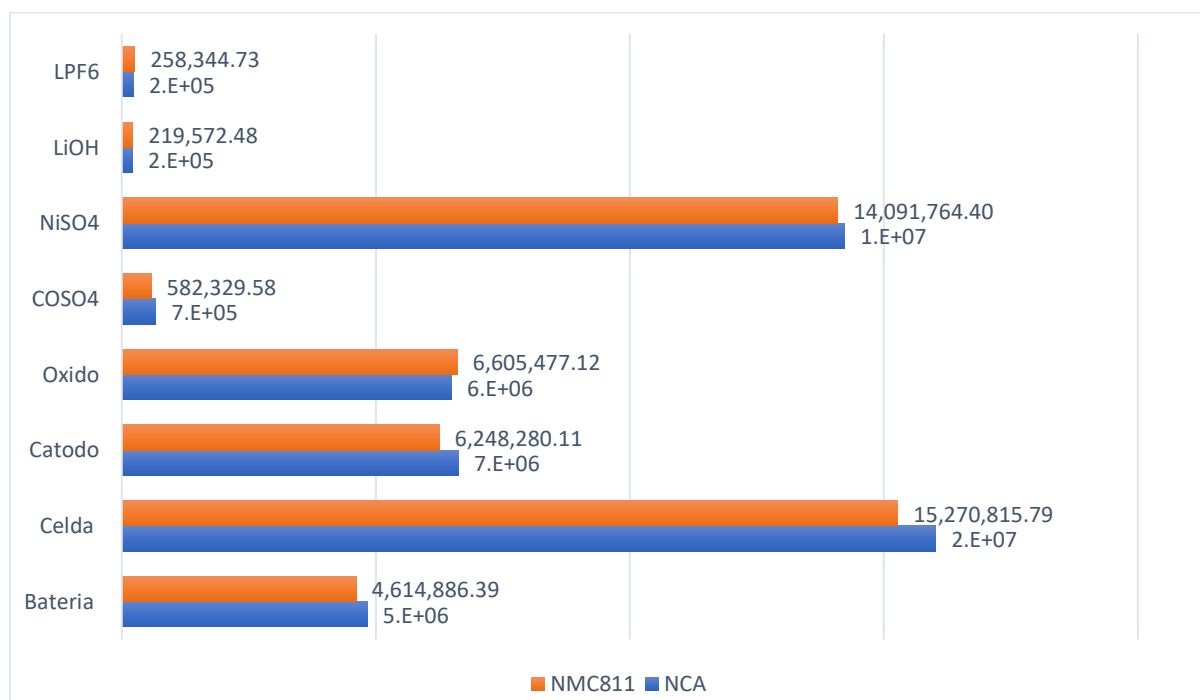


Figura 71. E5 - Potencial de acidificación terrestre (TAP) Ton SO₂-Eq

La comparación de ambas químicas de baterías en términos de acidificación terrestre sugiere que, si bien las baterías NCA ofrecen ciertas ventajas de desempeño, su impacto ambiental es considerablemente mayor en este aspecto. Esto subraya la necesidad de considerar los efectos ambientales a lo largo del ciclo de vida de las baterías y explorar alternativas que minimicen las emisiones de SO₂, como el uso de materiales menos intensivos en ácido o la implementación de procesos de producción más limpios.

5.4 Conclusiones y discusión de resultados

De acuerdo con los resultados del análisis de ciclo de vida (ACV), la batería con química NCA presenta un mayor impacto ambiental en todas las categorías evaluadas en

comparación con la batería NMC811. En términos de emisiones de gases de efecto invernadero, la batería NCA emite aproximadamente 0.912 kg más de CO₂ equivalente que la batería NMC811. Estas emisiones están compuestas principalmente de dióxido de carbono de origen fósil, que representa entre el 77% y el 78% de las emisiones totales para ambas químicas. El metano también constituye alrededor del 10% de estas emisiones.

En cuanto a la comparación de los resultados de esta tesis con otros proyectos, el autor (Peters & Weil, 2018a) nos provee información sobre el Potencial de calentamiento global (GWP) de distintos tipos de baterías y autores en una misma unidad funcional (1 Kg de batería) con lo que podemos observar que los resultados obtenidos en este proyecto son bastante similares a los existentes en la bibliografía (véase figura 72).

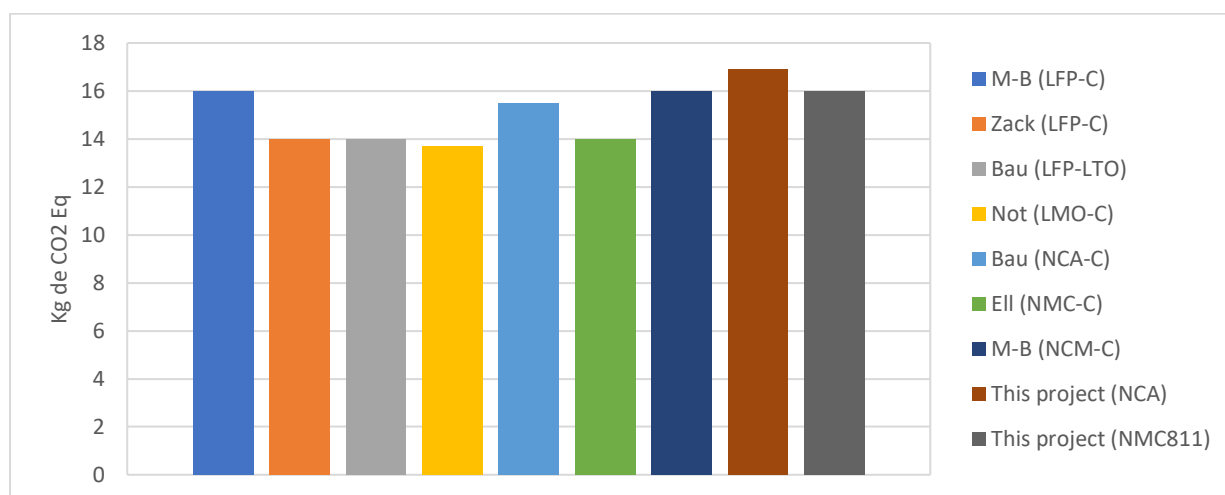


Figura 72. Impacto total de GWP de cada batería (FU = 1 kg) con datos LCI unificados.

La principal causa del impacto ambiental más alto de la batería NCA es su mayor contenido de cobalto en el cátodo. Este material genera más del doble de emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con el litio y aproximadamente el triple de las que produce el níquel, lo que lo convierte en el mineral crítico con el impacto más alto en cuanto a emisiones como se observa en la figura 39 del tema 5.2.1.

Sin embargo, es importante destacar que los resultados del ACV muestran los impactos ambientales por unidad de peso de cada componente, lo cual puede no reflejar con precisión los impactos totales en una cadena de suministro a gran escala, ya que algunos materiales son producidos en mayores cantidades que otros. Esta observación motivó la segunda etapa de la

metodología, en la cual se modela la cadena de suministro utilizando simulación de dinámica de sistemas. Este enfoque permite simular de manera más precisa la interacción de los distintos eslabones de la cadena de suministro y proporciona una visión holística tanto de los impactos ambientales totales como de la utilización y disponibilidad de recursos en distintos escenarios.

Los resultados de las simulaciones realizadas en dinámica de sistemas muestran que, al analizar la cadena de suministro desde la obtención de los precursores del material activo del cátodo hasta el ensamblaje final de la batería, la etapa con mayor impacto ambiental es la fabricación de las celdas, seguida de la producción del cátodo y su material activo. Este hallazgo indica que los esfuerzos por reducir los impactos ambientales de las baterías de iones de litio no deben centrarse únicamente en disminuir el uso de minerales críticos, sino que también deben orientarse a reducir las emisiones en estas etapas clave de la producción, especialmente en la fabricación de celdas, que resulta ser particularmente intensiva en consumo de energía y recursos, estos resultados coinciden con los analizados por (Sun et al., 2020) los cuales podemos observar en la figura 73.

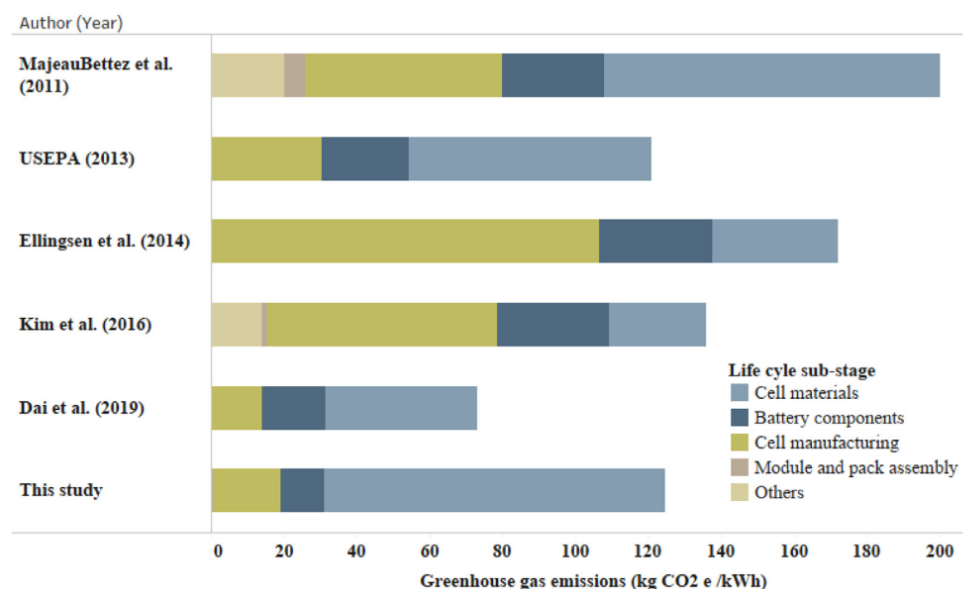


Figura 73. GHG emissions of per kWh NCM battery production. (Sun et al., 2020)

Otro aporte relevante de la simulación es su capacidad para analizar la autosuficiencia de América del Norte en la cadena de suministro de baterías. Esto es especialmente importante en el contexto de las crecientes tensiones comerciales con China y el aumento de los aranceles sobre vehículos eléctricos importados desde este país (Hernández Enrique, 2024). La

dependencia de América del Norte de los materiales y componentes clave provenientes de China plantea riesgos significativos en términos de seguridad de suministro. Los resultados del modelo sugieren que, si bien algunos materiales pueden obtenerse localmente, la región enfrenta limitaciones serias en cuanto a ciertos minerales críticos, principalmente en el suministro de cobalto, lo cual podría motivar políticas para fomentar una cooperación igualitaria entre América del Norte y el país asiático.

En cuanto a las reservas de minerales críticos en América del Norte, el cobalto es particularmente escaso y comienza a presentar déficits significativos desde los primeros años en todos los escenarios analizados. Esto resalta la necesidad de optimizar el uso de este recurso, mejorando tanto la eficiencia en la extracción y el refinado del cobalto como en la implementación de políticas de reciclaje que permitan recuperar cobalto al final de la vida útil de las baterías. Respecto al níquel, si bien existe una disponibilidad mayor en comparación con el cobalto, las capacidades de extracción y procesamiento actuales son insuficientes para satisfacer el crecimiento proyectado de la demanda. Esto puede generar cuellos de botella en la cadena de suministro, especialmente en la etapa de producción del material activo del cátodo (óxidos de NCA o NMC811), por lo que resulta imprescindible incrementar la capacidad en estas áreas para evitar interrupciones en el suministro.

Finalmente, en lo que respecta a las reservas de litio, los resultados sugieren que las reservas de México son lo suficientemente grandes para abastecer la demanda de vehículos eléctricos en América del Norte en el corto y mediano plazo. Esto convierte a México en un actor potencialmente clave en la cadena de suministro de baterías en la región T-MEC. La disponibilidad de litio en México podría ofrecer una ventaja estratégica para reducir la dependencia de importaciones y asegurar un suministro estable de este mineral crítico.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados y hallazgos presentados en esta tesis se presentan las siguientes conclusiones:

Impacto de las Químicas de las Baterías: La batería con química NCA genera mayores impactos ambientales en comparación con la NMC811, principalmente debido a su alto contenido de cobalto en el cátodo. Esto subraya la importancia de investigar y desarrollar tecnologías que permitan reducir o reemplazar el cobalto en las baterías de iones de litio.

Etapas Críticas en la Producción: La fabricación de las celdas y del material activo del cátodo son las etapas con mayor impacto ambiental en la cadena de suministro de baterías. Este hallazgo indica que las estrategias de reducción de impactos deben enfocarse no solo en la reducción del uso de minerales críticos, sino también en la optimización de los procesos de fabricación, particularmente en términos de eficiencia energética.

Aportaciones científicas de la metodología: La metodología desarrollada, que combina el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con la simulación en dinámica de sistemas, ofrece una herramienta integral para evaluar impactos ambientales a nivel de componente de batería y escalarlos a la cadena de suministro completa. Esta aproximación permite no solo analizar los impactos específicos de cada componente obtenidos en el ACV, sino también simular la producción en condiciones reales y evaluar los impactos ambientales en toda la cadena de suministro, además de visualizar la disponibilidad de recursos críticos en la región. Los resultados sugieren que América del Norte enfrenta limitaciones significativas en minerales críticos, especialmente cobalto y níquel, lo cual podría comprometer la sostenibilidad de la producción local de baterías a largo plazo.

Autosuficiencia Regional: La dependencia de América del Norte en materiales y componentes importados, particularmente desde China, plantea riesgos para la seguridad de la cadena de suministro de baterías. La posibilidad de desarrollar una cadena de suministro regional en el contexto del T-MEC podría reducir esta dependencia y fortalecer la industria de baterías en América del Norte.

Oportunidad Estratégica para México: Las reservas de litio en México representan una oportunidad clave para impulsar la producción de baterías de iones de litio en América del Norte. Además, el país ofrece una mano de obra capacitada y competitiva en costos, lo que lo

posiciona como un socio estratégico en la cadena de suministro regional dentro del T-MEC. Aprovechar plenamente esta ventaja requiere inversiones en infraestructura de extracción y procesamiento de litio, así como el desarrollo de políticas que promuevan la consolidación de esta industria a nivel local.

En conclusión, los hallazgos de esta tesis proporcionan una comprensión profunda de los impactos ambientales de las baterías de iones de litio, las limitaciones en la cadena de suministro en América del Norte y el importante papel que puede desempeñar México en la cadena de suministro. Estos resultados pueden informar la toma de decisiones en políticas de sostenibilidad, incentivando tanto la reducción de los impactos ambientales de las baterías como el desarrollo de una cadena de suministro autosuficiente en la región. A manera de resumen en las tablas 17 y 18 se presentan los resultados concentrados de las dos etapas de este estudio.

Tabla 17. Comparative table of LCA results

<i>Midpoint impact category</i>	<i>Battery NCA</i>	<i>Battery NMC811</i>	<i>Unit</i>
<i>Climate change</i>	16.9091304	15.9976486	kg CO ₂ -eq to air
<i>Water use</i>	0.59625711	0.48366716	m ³ water-eq consumed
<i>Land use</i>	0.31813333	0.29760059	m ² × yr annual cropland-eq
<i>Mineral resource scarcity</i>	5.35724882	5.27715231	kg Cu-eq
<i>Terrestrial acidification</i>	0.27502972	0.27017383	kg SO ₂ -eq to air
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	673.714866	661.378399	kg 1,4-DCB-eq to industrial soil
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	0.06515683	0.0625465	kg 1,4-DCB-eq to freshwater

Tabla 18. Comparative table of simulation results in system dynamics

	Midpoint impact category	Battery NCA	Battery NMC811	Unit	Time lapse (yrs)
Scenario 1	Climate change	86,998,250.75	96,644,309.04	kg CO ₂ -eq to air	30
	Water use	3,768,878,205.99	3,786,619,024.04	m ³ water-eq consumed	
	Land use	3,020,771,021.41	3,311,849,454.00	m ² × yr annual cropland-eq	
	Mineral resource scarcity	26,840,325.61	31,013,627.04	kg Cu-eq	
	Terrestrial acidification	792,500.84	884,868.67	kg SO ₂ -eq to air	
Scenario 2	Climate change	267,365,880.10	254,240,956.40	kg CO ₂ -eq to air	30
	Water use	11,580,000,000.00	9,961,410,576.00	m ³ water-eq consumed	
	Land use	9,283,532,666.00	8,712,440,298.00	m ² × yr annual cropland-eq	
	Mineral resource scarcity	82,486,569.74	81,587,154.77	kg Cu-eq	
	Terrestrial acidification	2,435,539.61	2,327,812.76	kg SO ₂ -eq to air	
Scenario 3	Climate change	209,569,993.30	199,282,255.20	kg CO ₂ -eq to air	30
	Water use	9,078,846,687.00	7,808,074,641.00	m ³ water-eq consumed	
	Land use	7,276,732,089.00	6,829,091,486.00	m ² × yr annual cropland-eq	
	Mineral resource scarcity	64,655,631.70	63,950,641.26	kg Cu-eq	
	Terrestrial acidification	1,909,054.44	1,824,614.66	kg SO ₂ -eq to air	
Scenario 4	Climate change	268,209,480.00	255,043,144.20	kg CO ₂ -eq to air	15
	Water use	11,620,000,000.00	9,992,841,083.00	m ³ water-eq consumed	
	Land use	9,312,824,315.00	8,739,930,021.00	m ² × yr annual cropland-eq	
	Mineral resource scarcity	82,746,833.55	81,844,580.73	kg Cu-eq	
	Terrestrial acidification	2,443,224.29	2,335,157.54	kg SO ₂ -eq to air	
Scenario 5	Climate change	530,052,580.80	504,032,433.10	kg CO ₂ -eq to air	15
	Water use	22,960,000,000.00	19,750,000,000.00	m ³ water-eq consumed	
	Land use	18,400,000,000.00	17,270,000,000.00	m ² × yr annual cropland-eq	
	Mineral resource scarcity	163,529,539.20	161,746,450.00	kg Cu-eq	
	Terrestrial acidification	4,828,454.76	4,614,886.39	kg SO ₂ -eq to air	

BIBLIOGRAFÍA

- Abdullah Khalil, S. M. (2022). Lithium recovery from brine: Recent developments and challenges. *Desalination*.
- Andrés, J. J. (Noviembre 2015). *Optimizacion multicriterio de los impactos ambientales, económicos y de salud del ciclo de vida en una planta procesadora de aves a travez de la norma ISO 14040 y tecnicas de inteligencia artificial*. Orizaba, Ver. Mexico .
- ARENTSEN, G. W. (2020). *NUEVA RUTA DE PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE CARBONATO DE LITIO GRADO TÉCNICO MEDIANTE LA REACCIÓN REVERSIBLE DE CARBONATOBICARBONATO-BICARBONATO*. CONCEPCIÓN-CHILE.
- Boon-Brett, N. P. (25 February 2016). *Considerations on the Chemical Toxicity of Contemporary Li-Ion Battery Electrolytes and Their Components*.
- Daniel Calisaya-Azpilcueta, S. H.-L. (2020). Assessment of the Supply Chain under Uncertainty.
- El mercado del litio, desarrollo reciente y proyecciones al 2030. (2021). *Comision chilena del cobre*.
- EVvolumenes.com. (2023). Obtenido de <https://www.ev-volumes.com>
- FUKUDA, H. (2017). *LITHIUM EXTRACTION FROM BRINE WITH ION EXCHANGE RESIN AND FERRIC PHOSPHATE*. Japon: B.Eng., Waseda University.
- Goonan, T. G. (2012). *Lithium use in batteries*. U.S. Geological Survey Circular.
- Hiturribarria, F. d. (2020). *Servicio Geológico Mexicano. Recursos de Litio en México*. . Obtenido de http://www.sgm.gob.mx/DocsSGM/Publicaciones/Estudios/RecursosMinerales/Litio_en_Mexico.pdf
- Jamasmie, C. (12 de septiembre de 2019). *La demanda de litio de los fabricantes de baterías casi se duplicará para 2027*. Obtenido de <https://www.mining.com/lithium-demand-battery-makers-almost-double-2027/>

- Klöppfer, W. &. (2005). International Journal of Life Cycle Assessment. Editorial. The 10th Anniversary Volume of Int LCA.
- Lahuerta, I. H. (2016). *Analisis de ciclo de vida del proceso de reciclado de una bateria de ion-litio en el sector de la automocion* . Barcelona.
- MC., M. (2012). Environmental consequences of the use of batteries in low carbon systems: The impact of battery production.
- Michael Feitó Cespón, R. C. (2015). Optimization model to sustainable design of multiple-products recycling supply chain. *Revista chilena de ingeniería*, vol. 24 N° 1, 2016, pp. 135-148.
- Romare M, D. (2017). *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries*. Estocolmo.
- Sonnemann, G. F. (2003). Integrated life-cycle and risk assessment for industrial processes. USA: Lewis publishers.
- Sorolla, M. A. (2015). EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA COMO METODOLOGÍA PARA EVALUAR LOS.
- Susana, G. (2011). Extracción de Litio en el Norte argentino. *Revista Exactamente*.
- Xin Sun, H. H. (2020). *Global Lithium Flow 1994-2015: Implications for Improving Resource Efficiency and Security*. Beijing 100084, China.
- Ager-Wick Ellingsen, L., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A. K., Ole Valøen, L., & Hammer Strømman, A. (2014a). *Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack*.
- Ager-Wick Ellingsen, L., Majeau-Bettez, G., Singh, B., Srivastava, A. K., Ole Valøen, L., & Hammer Strømman, A. (2014b). *Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack*.
- Aguilar Lasserre Alberto Alfonso, & Cessa Valdés Fabián. (2022). *Desarrollo de un Sistema Multi-Agente para el análisis de escenarios de impacto ambiental de la cadena productiva del café mediante la aplicación de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida*.

- Alexander, L., Allen, S., & Bindoff, N. L. (2014). *Climate change 2013: The physical science basis, in contribution of Working Group I (WGI) to the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*.
<https://www.researchgate.net/publication/266208027>
- Alina, P. M. I. I., Badillo, E., Asesor, M., Alberto, A., Aguilar, L., Co, A., Augusto, M., & Ackerman, M. (2021). *Evaluación de vulnerabilidad y riesgo agrícola ante el cambio climático a través de un sistema multi-agentes*.
- Ausenco Services Pty Ltd. (2018). *TECHNICAL REPORT ON THE FEASIBILITY STUDY FOR THE SONORA LITHIUM PROJECT, MEXICO*.
- Bacanora Minerals Ltd. (2018). *bacanora technical report 2501 2018_compressed*.
- Baum, Z. J., Bird, R. E., Yu, X., & Ma, J. (2022). Lithium-Ion Battery Recycling—Overview of Techniques and Trends. *ACS Energy Letters*, 7(2), 712–719.
<https://doi.org/10.1021/acsenenergylett.1c02602>
- CEDILLO CAMPOS, M. G. (2008). *ANÁLISIS DINÁMICO DE SISTEMAS INDUSTRIALES*.
<https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=35611>
- Chagnes, A., & Światowska, J. (s/f). *Lithium process chemistry: resources, extraction, batteries, and recycling*.
- Chung, D., Elgqvist, E., & Santhanagopalan, S. (2016). *Automotive Lithium-ion Cell Manufacturing: Regional Cost Structures and Supply Chain Considerations*.
www.nrel.gov/publications.
- Comisión Chilena del cobre. (2023). *El mercado de litio, desarrollo reciente y proyecciones al 2035*. <https://www.cochilco.cl/web/litio/>
- Dai, Q., Kelly, J. C., Gaines, L., & Wang, M. (2019). Life cycle analysis of lithium-ion batteries for automotive applications. *Batteries*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/batteries5020048>
- Dana Hurlbut. (1959). *Manual de mineralogía* (segunda).
- Dirección general de desarrollo minero. (2018). *Perfil de mercado del Litio*.
- Dr. B.V. Babu. (2006). *Life Cycle Inventory Analysis (LCIA)*. <http://discovery.bits-pilani.ac.in/discipline/chemical/BVb/>

- El Financiero. (2022, abril 22). *Es oficial: AMLO publica reforma a Ley Minera para nacionalizar el litio*. <https://www.elfinanciero.com.mx/economia/2022/04/20/es-oficial-amlo-publica-reforma-a-ley-minera-para-nacionalizar-el-litio/>.
- Elshout Pieter, Van Zelm R., & Karuppiah R. (2014). A spatially explicit data-driven approach to assess the effect of agricultural land occupation on species groups. *The International Journal of Life Cycle Assessment*.
- Gabriela Benveniste Pérez. (2020). *Análisis de Ciclo de Vida de sistemas innovadores de almacenamiento eléctrico en litio-azufre (Li-S) para vehículos*.
- Gassó, S., Beatriz, D., & García, A. (2016). *Análisis del ciclo de vida del proceso de reciclado de una batería de Li-ión en el sector de la automoción*.
- Giga Metals Corporation. (2022). *The Turnagain Nickel Project*.
- Hernández Enrique. (2024, octubre 17). *Las declaraciones de Trump sobre imponer aranceles a autos chinos producidos en México son electoreras: Comce*. <https://forbes.com.mx/las-declaraciones-de-trump-sobre-imponer-aranceles-a-autos-chinos-producidos-en-mexico-son-electoreras-comce/>.
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017a). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017b). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Igogo, T., Sandor, D., Mayyas, A., & Engel-Cox, J. (2019). *SUPPLY CHAIN OF RAW MATERIALS USED IN THE MANUFACTURING OF LIGHT-DUTY VEHICLE LITHIUM-ION BATTERIES*. www.nrel.gov/publications.
- INCyTU. (2018). *Residuos electrónicos*. <http://www.foroconsultivo.org.mx/>

- ISO 14044, *Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices*. (2006). www.iso.org/standard/54556.html
- Julio Calvo Ernesto. (2022). *Nuevos métodos de extracción directa de litio Impacto en la explotación sustentable de los salares de la puna*.
- Kelly, J. C., Wang, M., Dai, Q., & Winjobi, O. (2021). Energy, greenhouse gas, and water life cycle analysis of lithium carbonate and lithium hydroxide monohydrate from brine and ore resources and their use in lithium ion battery cathodes and lithium ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105762>
- Kushnir, D., & Sandén, B. A. (2012). The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles. *Resources Policy*, 37(1), 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.11.003>
- Lane, G., Pty Ltd Jonathan Cooper, A., Sustainability ULC David Penswick, A., Inc John Siriunas, G. M., Jobin-Bevans, S., Arthur Bocking, K., Hales, S., Fraser, M., Murray, G., Richards, J., Limited Colin Hardie, A., & Inc Bruce Andrew Murphy, B. (2023). *Crawford Nickel Sulphide Project NI 43-101 Technical Report and Feasibility Study*.
- Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., & Ouyang, M. (2013). A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. En *Journal of Power Sources* (Vol. 226, pp. 272–288). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.10.060>
- Manrique, A. (2014a). *Explotación del litio, producción y comercialización de baterías de litio en Argentina*.
- Manrique, A. (2014b). *Explotación del litio, producción y comercialización de baterías de litio en Argentina*.
- Meza Palacios Ramiro. (2019). *OPTIMIZACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES EN EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA CADENA DE SUMINISTRO DEL AZÚCAR DE CAÑA*.

- Miao, Y., Hynan, P., Von Jouanne, A., & Yokochi, A. (2019). Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. En *Energies* (Vol. 12, Número 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en12061074>
- Murray, K., Eng, P., Jaap Voordouw, R., Geo, P., Explorations Ltd Jeffrey Austin, E. B., Garcia Jimenez, C. H., Barret Reimer, D., Piésold Ltd Richard Flynn, K. F., John Baldwin, D., Mysak, P., & Rolf Schmitt, H. (2023). *Baptiste Nickel Project NI 43-101 Technical Report and Prefeasibility Study*.
- Nansai, K., Nakajima, K., Kagawa, S., Kondo, Y., Suh, S., Shigetomi, Y., & Oshita, Y. (2014). Global flows of critical metals necessary for low-carbon technologies: The case of neodymium, cobalt, and platinum. *Environmental Science and Technology*, 48(3), 1391–1400. <https://doi.org/10.1021/es4033452>
- Narins, T. P. (2017). The battery business: Lithium availability and the growth of the global electric car industry. *Extractive Industries and Society*, 4(2), 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2017.01.013>
- Olivetti, E. A., Ceder, G., Gaustad, G. G., & Fu, X. (2017). Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals. En *Joule* (Vol. 1, Número 2, pp. 229–243). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.08.019>
- Pesaran, A. A., Mann, M., Putsche, V., & Greenberger, J. (2023). *NAATBatt North American Lithium-ion Battery Supply Chain Database Documentation and User Guide*.
- Peters, J. F., & Weil, M. (2018a). Providing a common base for life cycle assessments of Li-Ion batteries. *Journal of Cleaner Production*, 171, 704–713. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.016>
- Peters, J. F., & Weil, M. (2018b). Providing a common base for life cycle assessments of Li-Ion batteries. *Journal of Cleaner Production*, 171, 704–713. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.016>
- Ponsioen, T. C., Vieira, M. D. M., & Goedkoop, M. J. (2014). Surplus cost as a life cycle impact indicator for fossil resource scarcity. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(4), 872–881. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0676-z>

- Porta Atilio Andrés. (2020). El litio, un recurso de valor estratégico para la región. Análisis de las implicancias ambientales. Perspectivas y propuestas. *Universidad Nacional de La Plata*.
- Porzio, J., & Scown, C. D. (2021). Life-Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials. En *Advanced Energy Materials* (Vol. 11, Número 33). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/aenm.202100771>
- Romare, M., & Dahllöf, L. (2017). *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles*. www.ivl.se
- Romero Rodríguez Blanca Iris. (2003a). *El análisis de ciclo de vida y la gestión ambiental*.
- Romero Rodríguez Blanca Iris. (2003b). *El Análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental*.
- Roy, P. O., Azevedo, L. B., Margni, M., van Zelm, R., Deschênes, L., & Huijbregts, M. A. J. (2014). Characterization factors for terrestrial acidification at the global scale: A systematic analysis of spatial variability and uncertainty. *Science of the Total Environment*, 500–501, 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.099>
- Schmidt, T., Buchert, M., & Schebek, L. (2016). Investigation of the primary production routes of nickel and cobalt products used for Li-ion batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 112, 107–122. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.04.017>
- Schoenenberger, L., Schmid, A., Tanase, R., Beck, M., & Schwaninger, M. (2021). Structural Analysis of System Dynamics Models. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 110. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102333>
- SEMARNAT. (2023). *GUÍA PARA EL CONSUMO Y MANEJO SUSTENTABLE DE PILAS*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/300512/Gu_a_para_el_consumo_sustentable_de_pilas.pdf
- Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). (20223). *Lithium Statistics and Information*.
- Sonderegger, F. D. &. (2022). *Documentation of changes implemented in the ecoinvent database v3.9.1 (2022.12.15)*.

- Sticco, L. M., Scravaglieri, P., & Damiani, A. (2018). *Estudio de los Recursos Hídricos y el Impacto por Explotación Minera de Litio Cuenca Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc- Provincia de Jujuy*.
- Suárez Alcántara Karina. (2024). Reciclaje de baterías de Ion-Li, una necesidad presente y futura. *Revista materiales avanzados*, 40, 84–92.
- Sun, X., Hao, H., Zhao, F., & Liu, Z. (2017). Tracing global lithium flow: A trade-linked material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 124, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.04.012>
- Sun, X., Luo, X., Zhang, Z., Meng, F., & Yang, J. (2020). Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123006>
- Sverdrup, H. U. (2016). Modelling global extraction, supply, price and depletion of the extractable geological resources with the LITHIUM model. *Resources, Conservation and Recycling*, 114, 112–129. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.07.002>
- Temporelli, A., Carvalho, M. L., & Girardi, P. (2020). Life cycle assessment of electric vehicle batteries: An overview of recent literature. En *Energies* (Vol. 13, Número 11). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en13112864>
- Thies, C., Kieckhäfer, K., Spengler, T. S., & Sodhi, M. S. (2019). Assessment of social sustainability hotspots in the supply chain of lithium-ion batteries. *Procedia CIRP*, 80, 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.009>
- Tran, M. K., Dacosta, A., Mevawalla, A., Panchal, S., & Fowler, M. (2021). Comparative study of equivalent circuit models performance in four common lithium-ion batteries: LFP, NMC, LMO, NCA. *Batteries*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/batteries7030051>
- Van Zelm, R., Huijbregts, M. A. J., & Van De Meent, D. (2009). USES-LCA 2.0-a global nested multi-media fate, exposure, and effects model. En *International Journal of Life Cycle Assessment* (Vol. 14, Número 3, pp. 282–284). <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0066-8>
- Winjobi, O., Dai, Q., & Kelly, J. C. (2020a). *Update of Bill-of-Materials and Cathode Chemistry addition for Lithium-ion Batteries in GREET ® 2020*.

- Winjobi, O., Dai, Q., & Kelly, J. C. (2020b). *Update of Bill-of-Materials and Cathode Chemistry addition for Lithium-ion Batteries in GREET ® 2020*.
- Wu, Y., & Zhang, L. (2017). Can the development of electric vehicles reduce the emission of air pollutants and greenhouse gases in developing countries? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, 129–145. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.12.007>
- Yap Laurance. (2023, diciembre 7). *Las ventas de vehículos eléctricos en EE. UU. superarán los 1,3 millones de unidades en 2023*. <https://www.greencars.com/es-us/noticias/las-ventas-de-vehiculos-electricos-en-ee-uu-superaran-los-1-3-millones-de-unidades-en-2023>.
- Yin, R., Hu, S., & Yang, Y. (2019). Life cycle inventories of the commonly used materials for lithium-ion batteries in China. *Journal of Cleaner Production*, 227, 960–971. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.186>
- Zhao, S., & You, F. (2019). Comparative Life-Cycle Assessment of Li-Ion Batteries through Process-Based and Integrated Hybrid Approaches. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(5), 5082–5094. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b05902>

Anexo

En esta sección de la tesis se presenta el inventario y los sub-inventarios de flujo de materiales de algunos componentes de baterías utilizados en el inventario de ciclo de vida, la duplicación de ciertos productos hace referencia a etapas previas de la obtención de estos materiales, estos son obtenidos de la base de datos de Ecoinvent 3.9.1 (Sonderegger, 2022).

Tabla 19. Inventario de materiales para 1 Kg de Baterías NCA y NMC811

<i>Input Materials</i>	<i>Unit</i>	<i>Value / Kg (NMC)</i>	<i>Value /Kg (NCA)</i>	<i>Source</i>
Nickel sulfate	Kg	0.310421883	0.313926729	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Graphite	Kg	0.1547065	0.163541177	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Aluminium, wrought alloy	Kg	0.141978825	0.145343939	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Copper collector foil, for Li-ion battery	Kg	0.070023863	0.066608067	BOM Greet (2020)
Lithium hydroxide	Kg	0.062545838	0.062966861	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Cobalt sulfate	Kg	0.038862914	0.060015404	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Ethylene carbonate	Kg	0.057305469	0.050524508	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Dimethyl carbonate	Kg	0.046234446	0.038173879	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Ethylene Glycol	Kg	0.022882816	0.023867593	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Manganese sulfate	Kg	0.037862443		Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Aluminium sulfate	Kg		0.020774563	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Lithium hexafluorophosphate	Kg	0.01345395	0.011861943	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Carbon black	Kg	0.006690826	0.007242334	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
polyvinylfluoride	Kg	0.006690826	0.006628091	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Reinforcing steel	Kg	0.006381741	0.006215564	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Sheet rolling, steel	Kg	0.006381741	0.006215564	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Polypropylene, granulate	Kg	0.007630312	0.005993656	BOM Greet (2020)
Electronic component, passive, unspecified	Kg	0.004284315	0.004641623	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Insulation	Kg	0.00367515	0.003710358	BOM Greet (2020)
Polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade	Kg	0.001986145	0.002127798	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Copper, anode	Kg	0.000994041	0.000611531	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
<i>Energy</i>				
Heat, district or industrial, natural gas	MJ	23.7543681	23.6729639	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Electricity, medium voltage	KWh	9.72303081	9.70728003	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
<i>Water</i>				
Tap water	Kg	13.275729	13.1847445	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
<i>Outputs</i>				
Carbon dioxide, fossil	Kg	13.6608772	14.34069542	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Carbon dioxide, non-fossil	Kg	0.205042365	0.231118411	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Dinitrogen monoxide	Kg	0.159772433	0.172314954	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Methane, fossil	Kg	1.701846731	1.868480192	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Methane, tetrafluoro-, R-14	Kg	0.085337943	0.087501954	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Sulfur hexafluoride	Kg	0.082871539	0.100022472	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Ammonia	Kg	0.002965262	0.003004519	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Nitrogen oxides	Kg	0.014642675	0.015308326	Ecoinvent 3.9.1 (2022)
Sulfur dioxide	Kg	0.251749493	0.255803998	Ecoinvent 3.9.1 (2022)

Tabla 20. Material flow for a 1 kg of nickel sulfate

<i>Tecnosfera</i>		
<i>Product</i>	<i>Amount</i>	<i>Unit</i>
<i>chemical factory, organics</i>	4.00E-10	unit
<i>electricity, medium voltage</i>	0.416	kilowatt hour
<i>heat, district or industrial, natural gas</i>	2.15	megajoule
<i>heat, from steam, in chemical industry</i>	0.029977153	megajoule
<i>heat, from steam, in chemical industry</i>	0.170022847	megajoule
<i>nickel, class 1</i>	0.39924074	kilogram
<i>nitrogen, liquid</i>	0.014907885	kilogram
<i>nitrogen, liquid</i>	0.004092115	kilogram
<i>sulfuric acid</i>	0.077175068	kilogram
<i>sulfuric acid</i>	0.589928979	kilogram
<i>tap water</i>	0.026	kilogram
<i>wastewater, average</i>	-2.16E-06	cubic meter
<i>wastewater, average</i>	-7.70E-09	cubic meter
<i>wastewater, average</i>	-5.17E-07	cubic meter
<i>wastewater, average</i>	-1.30E-08	cubic meter
<i>Biosfera</i>		
<i>Nitrogen</i>	0.019	kilogram
<i>Water</i>	0.0167	cubic meter
<i>Water, cooling, unspecified natural origin</i>	0.0164	cubic meter
<i>Nickel II</i>	0.002101267	kilogram
<i>Water</i>	0.0014	cubic meter
<i>Sulfur</i>	0.001147779	kilogram
<i>Water, river</i>	0.00086	cubic meter
<i>Water, well, in ground</i>	0.00083	cubic meter

Tabla 21. Material flow for a 1 kg of graphite

<i>Tecnosfera</i>		
Product	Amount	Unit
heat, district or industrial, other than natural gas	0.089758417	megajoule
electricity, medium voltage	0.021203167	kilowatt hour
diesel, burned in building machine	0.018	megajoule
electricity, medium voltage	0.007406131	kilowatt hour
heat, central or small-scale, other than natural gas	0.0033746	megajoule
electricity, medium voltage	0.002310951	kilowatt hour
electricity, medium voltage	0.001159783	kilowatt hour
electricity, medium voltage	0.000351148	kilowatt hour
industrial machine, heavy, unspecified	0.000231	kilogram
blasting	7.73E-05	kilogram
electricity, medium voltage	6.88E-05	kilowatt hour
heat, district or industrial, other than natural gas	4.16E-05	megajoule
recultivation, limestone mine	6.52E-06	square meter
conveyor belt	2.78E-08	meter
limestone quarry infrastructure	5.25E-11	unit
<i>Biosfera</i>		
Graphite	1.0526	kilogram
Particulate Matter, > 10 um	0.000121	kilogram
Occupation, mineral extraction site	8.48E-05	square meter-year
Particulate Matter, > 2.5 um and < 10um	4.78E-05	kilogram
Water, well, in ground	2.93E-05	cubic meter
Water	1.47E-05	cubic meter
Water	1.47E-05	cubic meter
Particulate Matter, < 2.5 um	8.87E-06	kilogram
Transformation, from forest, unspecified	6.52E-06	square meter
Transformation, to mineral extraction site	6.52E-06	square meter

Tabla 22. Material flow for a 1 kg of aluminium, wrought alloy

<i>Tecnosfera</i>		
Product	Amount	Unit
heat, district or industrial, natural gas	3.091138052	megajoule
aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting	1.008979921	kilogram
electricity, medium voltage	0.132983554	kilowatt hour
heat, district or industrial, other than natural gas	0.106589674	megajoule
silicon, metallurgical grade	0.015165997	kilogram
copper, cathode	0.013832086	kilogram
heat, district or industrial, other than natural gas	0.012123282	megajoule
argon, liquid	0.002243971	kilogram
refractory, fireclay, packed	0.001400464	kilogram
nitrogen, liquid	0.001250126	kilogram
sodium chloride, powder	0.00049995	kilogram
chlorine, liquid	0.000140046	kilogram
aluminium melting furnace	2.00E-09	unit
aluminium casting facility	1.54E-10	unit
hazardous waste, for incineration	-1.53E-06	kilogram
hazardous waste, for incineration	-5.85E-05	kilogram
inert waste, for final disposal	-0.001600242	kilogram
hazardous waste, for underground deposit	-0.00268994	kilogram
<i>Biosfera</i>		
Water, cooling, unspecified natural origin	9.66E-03	cubic meter
Hydrochloric acid	3.30E-05	kilogram
Particulate Matter, > 2.5 um and < 10um	1.97E-05	kilogram
Particulate Matter, < 2.5 um	1.31E-05	kilogram
Water	9.17E-06	cubic meter
Particulate Matter, > 10 um	8.20E-06	kilogram
Chlorine	6.00E-06	kilogram
Hydrocarbons, chlorinated	3.90E-06	kilogram

Tabla 23. Material flow for a 1 kg of copper collector foil, for Li-ion battery

Tecnosfera		
Product	Amount	Unit
copper, cathode	1	kilogram
sheet rolling, copper	1	kilogram
sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	0.333333333	kilogram
sulfuric acid	0.182758081	kilogram
sulfuric acid	0.023908585	kilogram
metal working factory	4.58E-10	unit
spent solvent mixture	-0.00353123	kilogram
spent solvent mixture	-0.15072396	kilogram
spent solvent mixture	-0.38574481	kilogram

Tabla 24. Material flow for a 1 kg of lithium hydroxide

Tecnosfera		
Product	Amount	Unit
heat, district or industrial, natural gas	3.489013664	megajoule
lithium carbonate	1.622797053	kilogram
lime, hydrated, loose weight	1.60913797	kilogram
electricity, medium voltage	0.675083574	kilowatt hour
heat, from steam, in chemical industry	0.275912575	megajoule
heat, from steam, in chemical industry	0.048646836	megajoule
tap water	0.042192723	kilogram
lime, hydrated, loose weight	0.013659083	kilogram
chemical factory, organics	6.49E-10	unit
wastewater, average	-1.25E-08	cubic meter
wastewater, average	-2.11E-08	cubic meter
wastewater, average	-8.39E-07	cubic meter
wastewater, average	-3.51E-06	cubic meter
inert waste	-0.003957931	kilogram
inert waste	-0.45954651	kilogram
inert waste	-1.619842415	kilogram
Biosfera		
Carbonate	0.065789815	kilogram
Calcium II	0.043859336	kilogram
Hydroxide	0.037280517	kilogram
Water	0.027100711	cubic meter
Water, cooling, unspecified natural origin	0.026613872	cubic meter
Lithium I	0.015350849	kilogram
Water	0.002271916	cubic meter
Water, river	0.001395605	cubic meter
Water, well, in ground	0.001346922	cubic meter

Tabla 25. Material flow for a 1 kg of Cobalt sulfate

<i>Tecnosfera</i>		
Product	Amount	Unit
heat, district or industrial, natural gas	10.76887958	megajoule
electricity, medium voltage	1.152	kilowatt hour
sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	1.039909127	kilogram
sulfuric acid	0.977172379	kilogram
cobalt hydroxide	0.600320092	kilogram
hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	0.535733806	kilogram
ammonium carbonate	0.218247839	kilogram
soda ash, dense	0.033459599	kilogram
disodium disulphite	0.030417817	kilogram
limestone, crushed, washed	0.022813363	kilogram
kerosene	0.017870468	kilogram
chemical factory, organics	4.00E-10	unit
wastewater, average	-0.01884126	cubic meter
hazardous waste, for incineration	-2.243486877	kilogram
<i>Biosfera</i>		
Water	0.000232458	cubic meter
Water, cooling, unspecified natural origin	0.01884126	cubic meter

Tabla 26. Material flow for a 1 kg of lithium hexafluorophosphate

<i>Tecnosfera</i>		
Product	Amount	Unit
lime, hydrated, packed	7.4373	kilogram
tap water	4.250941176	kilogram
hydrogen fluoride	4.0404	kilogram
phosphorus pentachloride	1.9765	kilogram
electricity, medium voltage	0.54074	kilowatt hour
lithium fluoride	0.19697	kilogram
nitrogen, liquid	0.0012506	kilogram
chemical factory, organics	4.00E-10	unit
wastewater, average	-0.0036133	cubic meter
limestone residue	-8.607	kilogram
<i>Biosfera</i>		
Phosphorus trichloride	0.26288	kilogram
Water	0.000637641	cubic meter

Recomendaciones para trabajos futuros

Debido a los diversos desafíos enfrentados durante la elaboración de esta tesis, se proponen las siguientes recomendaciones para futuros proyectos que busquen expandir o mejorar el análisis utilizando los datos y técnicas aquí empleados:

1. Mejorar la precisión de los datos de minería de cobalto: Aunque la versión 3.9.1 de la base de datos Ecoinvent ha avanzado en algunos aspectos del inventario de ciclo de vida, la información sobre la extracción de minerales críticos, como el cobalto, sigue siendo limitada. Sería valioso repetir este análisis en futuras investigaciones utilizando una versión más detallada o actualizada de la base de datos, que proporcione información específica sobre la minería de cobalto y su impacto ambiental.
2. Acceso a datos específicos sobre la síntesis del material activo del cátodo: La falta de datos detallados sobre la producción de óxidos de NCA y NMC obligó a recurrir a cálculos estequiométricos para estimar los materiales necesarios en la síntesis. Sin embargo, este enfoque podría no reflejar con precisión el rendimiento real de cada mineral crítico. Contar con información específica sobre los procesos de obtención del material activo del cátodo mejoraría la exactitud del inventario y de los resultados del análisis de ciclo de vida (ACV).
3. Considerar software más robusto para la simulación de dinámica de sistemas: Si bien AnyLogic es un software intuitivo y útil para el modelado de sistemas dinámicos, la versión gratuita impone restricciones significativas que limitaron el alcance del modelo. Para futuros trabajos, sería conveniente optar por un software que permita desarrollar modelos más completos o, si es posible, adquirir la versión completa de AnyLogic en instituciones académicas que puedan aprovecharla en investigaciones adicionales.
4. Profundizar en el modelo de dinámica de sistemas: Incluir el consumo energético en cada etapa de la cadena de suministro, así como una mayor variedad de variables relacionadas con los sistemas de producción, podría enriquecer los resultados. Estas adiciones permitirían obtener una visión más completa de los impactos ambientales asociados y mejorarían la calidad de la información para la toma de decisiones.
5. Incluir agentes inteligentes en la simulación de dinámica de sistemas: Mejorar la profundidad del modelo permitiría incorporar agentes inteligentes en distintas etapas de la cadena de suministro, lo que ayudaría a optimizar la toma de decisiones para

reducir impactos ambientales. La intervención de estos agentes en el modelo podría simular ajustes en tiempo real ante variaciones en la demanda, suministro de materiales y eficiencia de procesos, promoviendo así una gestión más sostenible.

Estas recomendaciones buscan abordar las limitaciones encontradas y optimizar la calidad de los datos y el alcance de los análisis en futuros estudios sobre la sostenibilidad de las baterías de iones de litio y sus cadenas de suministro.

Productividad

1. Se participo en un proyecto financiado por el Tecnológico Nacional de México de la Convocatoria de Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica del 2024 con título” Análisis de Ciclo de Vida de la Cadena de Suministro de Baterías de Iones de Litio (Parte I)” y clave: 19887.24-P.
2. Se está trabajando en la primera versión de dos artículos que llevaran por nombre:
 - “Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for EV’s within a Supply Chain Framework Among USMCA Countries”.
 - “System Dynamics Simulation of the Lithium-Ion Battery Supply Chain for EV’s: Analysis of Critical Resources and Environmental Impacts in North America”.

Estos serán enviados a la revista “Journal of Environmental Science and Health – Part A” indizado por el JCR con factor de impacto 1.9

