



**Universidad Michoacana de San
Nicolas de Hidalgo**



Facultad de Ingeniería Química

División de Estudios de Posgrado

**“MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA
PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA DE COMPUESTOS DE
LITIO CON UN ALTO VALOR AGREGADO EN MÉXICO”**

Tesis presentada por:

Victor Osvaldo Vega Muratalla

**A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de
Ingeniería Química como requisito parcial para
obtener el grado de:**

Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Director:

Dr. Luis Fernando Lira Barragán

Morelia, Michoacán

Febrero 2024

Índice

Resumen	I
Abstract.....	II
Índice de Tablas.....	III
Índice de Figuras	IV
Nomenclatura.....	VI
Nomenclatura para modelo en capítulo 3 y capítulo 4	VI
Nomenclatura adicional para modelo en el capítulo 4	XV
Agradecimientos.....	XVII
Glosario	XVIII
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivo	3
1.2.1 Objetivos Particulares.....	3
1.3 Justificación	3
1.4 Antecedentes.....	4
1.5 Alcance	5
1.6 Hipótesis.....	6
Capítulo 2. Marco Teórico.....	7
2.1 Calentamiento Global.....	7
2.2 Electromovilidad	7
2.3 Principales reservas y países productores de litio	9
2.4 Litio en México	10
2.5 Tipos de depósitos de litio y su procesamiento	12
2.5.1 Salmueras.....	12

2.5.2 Depósitos de pegmatita o roca dura.....	13
2.5.3 Depósitos de rocas sedimentarias	13
2.6 Procesamiento de depósitos de litio.....	13
2.6.1 Procesamiento de salmueras	14
2.6.2 Procesamiento de roca dura	16
2.7 Usos y aplicaciones de compuestos de litio.....	17
2.7.1 Industria del aluminio	17
2.7.2 Industria del vidrio y la cerámica	17
2.7.3 Industria de grasas y lubricantes.....	18
2.7.4 Industria farmacéutica.....	18
2.7.5 Industria de tratamiento de aire	18
2.8 Baterías de ion-litio	18
2.9 Demanda de compuestos de litio	19
2.10 Reciclo de baterías de litio.....	21
2.11 Requerimiento y pérdida de agua durante producción de compuestos de litio	21
2.12 Unidades de desalinización o desaladoras para el procesamiento de salmuera virgen	22
2.13 Planteamiento del problema	24
Capítulo 3. Modelo sin unidades de desalinización	26
3.1 Desarrollo de superestructura escenario I.....	26
3.2 Formulación y desarrollo del modelo matemático	27
3.3 Escenario I.....	47
3.4 Resultados y discusión de escenario I	49
Capítulo 4. Modelo con unidades de desalinización de salmuera	57
4.1 Desarrollo superestructura escenario II	57
4.2 Formulación del modelo matemático	58

4.3 Escenario II.....	82
4.3 Resultados y discusión.....	82
Capítulo 5. Comparación de escenario I y escenario II.....	90
Capítulo 6. Conclusiones.....	94
Bibliografía.....	95
Capítulo 7. Apéndices.....	101
Apéndice I.....	101

Dedicatoria

A mis padres: María de Jesús Muratalla Torres y Ramiro Vega Oregel

Les agradezco profundamente haber recibido el regalo de la vida gracias a ustedes. Su apoyo inquebrantable y amor incondicional han sido mi mayor fortaleza en momentos decisivos. También gracias por guiarme en cada aspecto significativo de la vida, moldeando mi carácter y convirtiéndome en una persona íntegra y de bien. Sus valiosas enseñanzas y respaldo me han impulsado a seguir en momentos difíciles. Siempre los llevo en lo más profundo de mi corazón.

A mi novia: Gabriela Abigail García Guerrero

Por todos los momentos felices que hemos compartido a lo largo de este tiempo y por no desistir cuando las circunstancias no fueron favorables. Valoro profundamente el amor y apoyo constante que me brindas en cada decisión permaneciendo siempre a mi lado. Este logro también es tuyo. ¡Te amo!

A mi hermana: María Carolina Vega Muratalla

Agradezco, querida hermana, todas las experiencias que hemos compartido. Tu habilidad para sacarme siempre una sonrisa y tu apoyo incondicional son cosas invaluableles. ¡Te quiero!

A mis abuelos: José Ignacio Muratalla Oregel y Jorge Vega Cuevas

Queridos abuelos, quiero expresar mi profundo agradecimiento por las valiosas lecciones de vida y apoyo que siempre me impartieron. Aunque no estén físicamente presentes para celebrar, quiero que sepan que su influencia y respaldo son una presencia constante en mi vida. ¡Los quiero mucho!

A mis amigos

Por siempre estar dispuestos a ayudarme sin importar la naturaleza del problema. Sus palabras de aliento y compañía hicieron este viaje más ameno. Ustedes son la familia universitaria que he elegido y quiero que sepan que siempre podrán contar conmigo.

Resumen

Modelo de optimización para la planificación estratégica de compuestos de litio con un alto valor agregado en México

Por

I.Q. Victor Osvaldo Vega Muratalla

Febrero de 2024

Maestro en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. Luis Fernando Lira Barragán

El presente proyecto presenta un enfoque de programación matemática para establecer y operar una cadena de suministro de derivados de litio de alto valor agregado en México. La estrategia de planificación considera la explotación de recursos naturales como salmueras ricas en litio y depósitos arcillosos para su posterior procesamiento en un conjunto de unidades con diversas tecnologías adaptadas a las necesidades existentes en el mercado y ubicadas estratégicamente. Sin duda, el aspecto económico es fundamental en este tipo de proyectos, por lo cual la función objetivo consiste en la maximización de las ganancias a partir de las ventas de los productos derivados de litio, productos secundarios e incluso materia prima para su exportación y procesamiento externo. Sin embargo, se valora también la importancia del aspecto ambiental debido a los grandes requerimientos y el desperdicio de agua en distintas etapas del proceso productivo. En este sentido, la metodología desarrollada considera este aspecto a través de la implementación de operaciones unitarias de separación que permiten la recuperación de agua residual para el procesamiento de salmuera virgen, reduciendo así el consumo de agua fresca y haciendo el proceso menos dependiente de los fenómenos meteorológicos locales de la zona de explotación. Es importante mencionar que en este trabajo se desarrollaron dos modelos: el primero se basa en el procesamiento mediante evaporación solar de la salmuera virgen; mientras que el segundo incorpora las tecnologías mencionadas anteriormente como separación por membrana y osmosis inversa. Ambos modelos son mixtos-enteros no lineales y tienen una aplicabilidad general para sistemas similares. Finalmente, para mostrar el alcance de los modelos, se proponen dos casos de estudio con escenarios diferentes, ofreciendo un análisis exhaustivo tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

Palabras Clave: Cadena de suministro, Producción de litio, Minimización de consumo de agua, Exportación, Producción sostenible.

Abstract

Optimization Model for the Strategic Planning of Lithium Compounds with High added Value in Mexico

By

I.Q. Victor Osvaldo Vega Muratalla

February 2024

Master of Science in Chemical Engineering

Directed by: Dr. Luis Fernando Lira Barragán

This project presents a mathematical programming approach to establish and operate a supply chain of high value-added lithium compounds in Mexico. The planning strategy considers the exploitation of natural resources such as brines rich in lithium and clay deposits for subsequent processing in a set of technologies adapted to the existing needs in the market and strategically located. Undoubtedly, the economic aspect is fundamental in this type of project, owing to this fact, the objective function consists of maximizing profits from the sales of lithium derivative products, secondary products and even raw materials for export and external processing. However, the importance of the environmental aspect is also valued due to the high requirements and the waste of water in various stages of the productive process. In this sense, the developed approach considers this aspect through the implementation of unit operations of separation allowing the recovery of wastewater for the processing of virgin brine, reducing the freshwater consumption and making the process with a low dependence of local meteorological phenomena in the exploitation area. It is important to mention that in this work two models were developed: the first is based on processing by solar evaporation of virgin brine; while the second one incorporates the technologies mentioned above such as membrane separation and reverse osmosis. Both models are mixed-integer nonlinear models and have general applicability for similar systems. Finally, to show the importance of the models, two case studies with different scenarios are proposed, offering an exhaustive analysis considering the economic and the environmental points of view.

Keywords: Supply chain, Lithium production, Minimization of water consumption, Export, Sustainable production.

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Asignaciones de litio del SGM.	11
Tabla 3.1 Plantas de procesamiento y tecnologías seleccionadas en Escenario I.	54
Tabla 3.2 Capacidades óptimas de Escenario I.	54
Tabla 3.3 Desglose de costos e ingresos en Escenario I.	56
Tabla 4.1 Tecnologías seleccionadas en Escenario II.	86
Tabla 4.2 Capacidades óptimas en Escenario II.	87
Tabla 4.3 Desglose de costos e ingresos en Escenario II.	89
Tabla 5.1 Diferencias de modelos.	90
Tabla 5.2 Diferencias en función objetivo de Escenario I y II.	93

Índice de Figuras

Figura 1.1 Representación general de escenarios analizados.	2
Figura 2.1 Representación general de tipo de vehículos eléctricos.	8
Figura 2.2 Reservas de litio por país.	9
Figura 2.3 Principales países productores de litio	9
Figura 2.4 Ubicaciones con litio en México.	10
Figura 2.5 Procesamiento general a partir de fuentes de litio.	14
Figura 2.6 Representación del proceso de evaporación solar para la producción de litio a partir de salmuera.	15
Figura 2.7 Proceso de producción de Li_2CO_3 mediante método de H_2SO_4.	16
Figura 2.8 Proceso de producción de Li_2CO_3 mediante método de NaOH.	16
Figura 2.9 Usos del litio en el año 2011.	19
Figura 2.10 Usos del litio durante el año 2017.	20
Figura 2.11 Usos del litio durante el año 2022.	20
Figura 2.12 Representación de implementación de unidades de desalinización para procesamiento de salmuera de litio.	23
Figura 3.1 Superestructura propuesta para Escenario I.	26
Figura 3.2 Caso de estudio analizado.	48
Figura 3.3 Representación de caso de estudio.	48
Figura 3.4 Solución al caso A1 del Escenario I.	50
Figura 3.5 Solución al caso B1 del Escenario I.	51
Figura 3.6 Solución al caso C1 del Escenario I.	52
Figura 3.7 Solución al caso D1 del Escenario I.	53
Figura 4.1 Superestructura propuesta para el Escenario II.	57
Figura 4.2 Solución al caso A2 del Escenario II.	83
Figura 4.3 Solución al caso B2 del Escenario II.	84
Figura 4.4 Solución al caso C2 del Escenario II.	85
Figura 4.5 Solución al caso D2 del Escenario II.	86
Figura 5.1 Satisfacción de demanda caso A1.	90

Figura 5.2 Satisfacción de demanda caso A2.	91
Figura 5.3 Satisfacción de demanda casos B1 y B2.	91
Figura 5.4 Satisfacción de demanda caso C1 y C2.	91
Figura 5.5 Satisfacción de demanda caso D1 y D2.	91
Figura 5.6 Agua Producida vs agua necesaria.	92

Nomenclatura

Nomenclatura para modelo en capítulo 3 y capítulo 4

k_F Factor de anualidad.

Flujos

$F_{s,t}^{b-prod}$ Flujo de salmuera concentrada producido por zona (ton/t).

$f_{s,i,t}^{b-process}$ Flujo de salmuera concentrada enviado por zona a planta de procesamiento (ton/t).

$f_{s,t}^{b-export}$ Flujo de salmuera concentrada exportado por zona (ton/t).

$F_{s,t}^{b-max-prod}$ Flujo máximo posible de extraer de salmuera concentrada (ton/t).

$F_{s,t}^{Potash-produced}$ Flujo de potasa producido por zona (ton/t).

$F_{r,t}^{c-prod}$ Flujo de arcilla concentrada producido por zona (ton/t).

$f_{r,i,t}^{c-process}$ Flujo de arcilla concentrada enviado por zona a planta de procesamiento (ton/t).

$f_{r,t}^{c-export}$ Flujo de arcilla concentrada exportado por zona (ton/t).

$F_{r,t}^{c-max-prod}$ Flujo máximo posible de extraer de arcilla concentrada (ton/t).

$F_t^{tot-b-export}$ Flujo total de salmuera concentrada exportada (ton/t).

$F_t^{tot-c-export}$ Flujo total de arcilla concentrada exportada (ton/t).

$F_{i,t}^{b-process-in}$ Flujo de salmuera concentrada que entra a unidad de procesamiento (ton/t).

$f_{i,t}^{b-process-out}$ Flujo de Li_2CO_3 producido por unidad a partir de salmuera concentrada (ton/t).

$f_{r,i,t}^{c-Li_2CO_3-process}$ Flujo de arcilla concentrada para la producción de Li_2CO_3 (ton/t).

$f_{r,i,t}^{c-OH-process}$ Flujo de arcilla concentrada para la producción de LiOH (ton/t).

$F_{i,t}^{c-process-in}$ Flujo de arcilla concentrada que entra a procesamiento para Li_2CO_3 (ton/t).

$F_{i,t}^{c-OH-in}$ Flujo de arcilla concentrada que entra a unidad de procesamiento para LiOH (ton/t).

$f_{i,t}^{c-process-out}$ Flujo de Li_2CO_3 producido por unidad a partir de arcilla concentrada (ton/t).

$F_{i,t}^{LiOH-clay-produced}$ Flujo de LiOH producido por unidad a partir de arcilla concentrada (ton/t).

$F_{i,t}^{Na_2SO_4-Li_2CO_3-produced}$ Flujo de Na_2SO_4 producido a partir de la producción de Li_2CO_3 (ton/t).

$F_{i,t}^{Na_2SO_4-LiOH-produced}$ Flujo de Na_2SO_4 producido a partir de la producción de LiOH (ton/t).

$F_{i,t}^{tot-Li_2CO_3-produced}$ Flujo total de Li_2CO_3 producido por planta de procesamiento (ton/t).

$f_{k,i,t}^{import-deriv-uses}$ Flujo de Li_2CO_3 importado para producción de derivados (ton/t).

$f_{i,t}^{deriv-uses}$ Flujo de Li_2CO_3 destinado para producción de derivados (ton/t).

$f_{i,t}^{available-Li_2CO_3}$ Flujo de Li_2CO_3 disponible por planta de procesamiento (ton/t).

$f_{i,t}^{Br-proc-in}$ Flujo de Li_2CO_3 que entra a la unidad de producción de LiBr (ton/t).

$f_{i,t}^{Br-proc-out}$ Flujo de LiBr producido por unidad (ton/t).

$F_t^{tot-Br-produced}$ Flujo total de LiBr producido (ton/t).

$f_{i,q,t}^{Br-sent-market}$ Flujo de LiBr enviado a cada mercado (ton/t).

$f_{i,t}^{Cl-proc-in}$ Flujo de Li_2CO_3 que entra a la unidad de producción de LiCl (ton/t).

$f_{i,t}^{Cl-proc-out}$ Flujo de LiCl producido por unidad (ton/t).

$F_t^{tot-Cl-produced}$ Flujo total de LiCl producido (ton/t).

$f_{i,q,t}^{Cl-sent-market}$ Flujo de LiCl enviado a cada mercado (ton/t).

$f_{i,t}^{OH-proc-in}$ Flujo de Li_2CO_3 que entra a la unidad de producción de LiOH (ton/t).

$f_{i,t}^{OH-proc-out}$ Flujo de LiOH producido por unidad (ton/t).

$F_t^{tot-OH-produced}$ Flujo total de LiOH producido (ton/t).

$f_{i,q,t}^{OH-sent-market}$ Flujo de LiOH enviado a cada mercado (ton/t).

$f_{q,t}^{tot-market}$ Flujo total de Li_2CO_3 enviado a cada mercado (ton/t).

$f_{k,q,t}^{import-market}$ Flujo de Li_2CO_3 importado por cada mercado (ton/t).

$f_{q,t}^{tot-market-demand}$ Demanda máxima de Li_2CO_3 de cada mercado (ton/t).

$F_t^{tot-export}$ Flujo total de Li_2CO_3 exportado (ton/t).

$f_{j,t}^{export}$ Flujo de Li_2CO_3 segregado hacia cada mercado de exportación (ton/t).

$f_{k,t}^{import}$ Flujo de Li_2CO_3 importado de cada fuente (ton/t).

$F_{i,t}^{b-water-req}$ Flujo de agua requerida para el procesamiento de salmuera (ton/t).

$F_{i,t}^{c-water-req}$ Flujo de agua requerida para el procesamiento de arcilla (ton/t).

$F^{c-OH-water-req}$ Flujo de agua requerida para el procesamiento de arcilla para la producción de LiOH (ton/t).

$F^{water-in-pp}$ Flujo total de agua que entra a planta de procesamiento (ton/t).

Factores de eficiencia

$\alpha_i^{b-process}$ Factor de eficiencia de la producción de Li_2CO_3 a partir de salmuera concentrada

$\alpha_i^{c-Li_2CO_3-process}$ Factor de eficiencia para producción de Li_2CO_3 mediante arcilla concentrada.

$\alpha_i^{c-OH-process}$ Factor de eficiencia para producción de LiOH mediante arcilla concentrada.

μ_s^{potash} Factor de eficiencia de la producción de potasa por zona.

$\mu_i^{Na_2SO_4-Li_2CO_3}$ Factor de eficiencia para producción de Na_2SO_4 mediante Li_2CO_3 .

$\mu_i^{Na_2SO_4-LiOH}$ Factor de eficiencia para producción de Na_2SO_4 mediante LiOH .

$\delta^{Br-process}$ Factor de eficiencia para producción de LiBr mediante Li_2CO_3 .

$\delta^{Cl-process}$ Factor de eficiencia para producción de LiCl mediante Li_2CO_3 .

$\delta^{OH-process}$ Factor de eficiencia para producción de LiOH mediante Li_2CO_3 .

$\varphi^{c-water}$ Factor que relaciona la cantidad de agua necesaria para el procesamiento de arcilla concentrada para la producción de Li_2CO_3 .

$\varphi^{b-water}$ Factor que relaciona la cantidad de agua necesaria para el procesamiento de salmuera concentrada.

$\varphi^{c-OH-water}$ Factor que relaciona la cantidad de agua necesaria para el procesamiento de arcilla concentrada para la producción de LiOH .

Demandas máximas

$f_{q,t}^{Br-max-demand}$ Demanda máxima de LiBr (ton/t).

$f_{q,t}^{Cl-max-demand}$ Demanda máxima de LiCl (ton/t).

$f_{q,t}^{OH-max-demand}$ Demanda máxima de LiOH (ton/t).

$f_{j,t}^{max-demand}$ Demanda máxima de Li_2CO_3 de cada mercado de exportación (ton/t).

Capacidades óptimas

$F_i^{b-process-cap}$ Capacidad óptima de unidades de procesamiento de salmuera concentrada (ton).

$F_i^{c-process-cap}$ Capacidad óptima de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producción de Li_2CO_3 (ton).

$F_i^{c-OH-process-cap}$ Capacidad óptima de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producción de LiOH (ton).

$F_i^{Br-process-cap}$ Capacidad óptima de unidades de producción de LiBr (ton).

$F_i^{Cl-process-cap}$ Capacidad óptima de unidades de producción de LiCl (ton).

$F_i^{OH-process-cap}$ Capacidad óptima de unidades de producción de LiOH a partir de Li_2CO_3 (ton).

Capacidades mínimas

$F_i^{b-min-process}$ Capacidad mínima de unidades de procesamiento de salmuera concentrada (ton).

$F_i^{c-min-process}$ Capacidad mínima de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producción de Li_2CO_3 (ton).

$F_i^{c-OH-min-process}$ Capacidad mínima de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producción de LiOH (ton).

$F_i^{Br-min-process}$ Capacidad mínima de unidades de producción de LiBr (ton).

$F_i^{Cl-min-process}$ Capacidad mínima de unidades de producción de LiCl (ton).

$F_i^{OH-min-process}$ Capacidad mínima de unidades de producción de LiOH a partir de Li_2CO_3 (ton).

Capacidades máximas

$F_i^{b\max-process-cap}$ Capacidad máxima de unidades de procesamiento de salmuera concentrada (ton).

$F_i^{c-max-process-cap}$ Capacidad máxima de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producción de Li_2CO_3 (ton).

$F_i^{c-OH-max-process-cap}$ Capacidad máxima de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producción de LiOH (ton).

$F_i^{Br-max-process}$ Capacidad máxima de unidades de producción de LiBr (ton).

$F_i^{OH-max-process}$ Capacidad máxima de unidades de producción de LiOH a partir de Li_2CO_3 (ton).

$F_i^{Cl-max-process}$ Capacidad máxima de unidades de producción de LiCl (ton).

Variables Binarias

y_i^b Variable binaria que determina la existencia de unidades de procesamiento de salmuera concentrada.

y_i^c Variable binaria que determina la existencia de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producción de Li_2CO_3 .

y_i^{c-OH} Variable binaria que determina la existencia de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producción de LiOH .

y_i^{Br} Variable binaria que determina la existencia de unidades de producción de LiBr .

y_i^{Cl} Variable binaria que determina la existencia de unidades de producción de LiCl .

y_i^{OH} Variable binaria que determina la existencia de unidades de producción de LiOH a partir de Li_2CO_3 .

Costos de capital

$CapCost_i^{b-process}$ Costo capital de unidades de procesamiento de salmuera concentrada (USD).

$CapCost_i^{c-process}$ Costo capital de unidades de procesamiento de arcilla concentrada (USD).

$CapCost_i^{c-OH-process}$ Costo capital de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para la producción de LiOH (USD).

$CapCost_i^{Br-process}$ Costo capital de unidades de producción de LiBr (USD).

$CapCost_i^{Cl-process}$ Costo capital de unidades de producción de LiCl (USD).

$CapCost_i^{OH-process}$ Costo capital de unidades de producción de LiOH a partir de Li_2CO_3 (USD).

$CapCost_i^{process-plant}$ Costo total de planta de procesamiento (USD)

TCC Costo total de capital (USD).

Costos fijos

$FC_i^{b-process}$ Costo fijo de unidades de procesamiento de salmuera concentrada (USD).

$FC_i^{c-process}$ Costo fijo de unidades de procesamiento de arcilla concentrada (USD).

$FC_i^{c-OH-process}$ Costo fijo de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para la producción de LiOH (USD).

$FC_i^{Br-process}$ Costo fijo de unidades de producción de LiBr (USD).

$FC_i^{Cl-process}$ Costo fijo de unidades de producción de LiCl (USD).

$FC_i^{OH-process}$ Costo fijo de unidades de producción de LiOH a partir de Li_2CO_3 (USD).

Costos variables

$VC_i^{b-process}$ Costo variable de unidades de procesamiento de salmuera concentrada (USD/ton).

$VC_i^{c-process}$ Costo variable de unidades de procesamiento de arcilla concentrada (USD/ton).

$VC_i^{c-OH-process}$ Costo variable de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para la producción de LiOH (USD/ton).

$VC_i^{Br-process}$ Costo variable de unidades de producción de LiBr (USD/ton).

$VC_i^{Cl-process}$ Costo variable de unidades de producción de LiCl (USD/ton).

$VC_i^{OH-process}$ Costo variable de unidades de producción de LiOH a partir de Li_2CO_3 (USD/ton).

Economías de escala

$\beta^{b-process}$ Exponente que relaciona las economías de escala en unidades procesamiento de salmuera concentrada.

$\beta^{c-process}$ Exponente que relaciona las economías de escala en unidades procesamiento de arcilla concentrada.

$\beta^{c-OH-process}$ Exponente que relaciona las economías de escala en unidades procesamiento de arcilla concentrada para la producción de LiOH.

$\beta^{Br-process}$ Exponente que relaciona las economías de escala en unidades producción de LiBr (USD).

$\beta^{Cl-process}$ Exponente que relaciona las economías de escala en unidades producción de LiCl (USD).

$\beta^{OH-process}$ Exponente que relaciona las economías de escala en unidades producción de LiOH a partir de Li_2CO_3 (USD).

Costos de transporte

$Cost^{trans-brine-pp}$ Costo de transporte de salmuera concentrada hacia planta de procesamiento (USD).

$Cost^{trans-clay-pp}$ Costo de transporte de arcilla concentrada hacia planta de procesamiento (USD).

$Cost^{trans-Br-pp-market}$ Costo de transporte de LiBr hacia mercados (USD).

$Cost^{trans-Cl-pp-market}$ Costo de transporte de LiCl hacia mercados (USD).

$Cost^{trans-OH-pp-market}$ Costo de transporte de LiOH hacia mercados (USD).

$Cost^{trans-Li_2CO_3-pp-market}$ Costo de transporte de Li_2CO_3 hacia mercados (USD).

$Cost^{trans-Li_2CO_3-pp-market}$ Costo de transporte de Li_2CO_3 hacia exportación (USD).

TTC Costos totales de transporte (USD).

Costos unitarios de transporte

$UTC_{s,i}^{trans-brine}$ Costo unitario de transporte de salmuera concentrada (USD).

$UTC_{r,i}^{trans-clay}$ Costo unitario de transporte de arcilla concentrada (USD).

$UTC_{i,q}^{trans-Br}$ Costo unitario de transporte de LiBr (USD).

$UTC_{i,q}^{trans-Cl}$ Costo unitario de transporte de LiCl (USD).

$UTC_{i,q}^{trans-OH}$ Costo unitario de transporte de LiOH (USD).

$UTC_{i,q}^{trans-Li_2CO_3}$ Costo unitario de transporte de Li_2CO_3 hacia mercados (USD).

$UTC_{i,j}^{trans-Li_2CO_3-export}$ Costo unitario de transporte de Li_2CO_3 hacia exportación (USD).

$UTC_{s,t}^b$ Costo unitario de transporte de salmuera a mercados de exportación (USD).

$UTC_{r,t}^c$ Costo unitario de transporte de arcilla a mercados de exportación (USD).

Costos de extracción de materia prima

$Cost^{b-ext}$ Costo de extracción de salmuera virgen (USD).

$Cost^{c-ext}$ Costo de extracción de arcilla (USD).

Precio unitario de extracción de materia prima

UP^{b-ext} Precio unitario de extracción de salmuera virgen (USD/ton).

UP^{c-ext} Precio unitario de extracción de arcilla (USD/ton).

Costos de operación

$Cost^{op-b-process}$ Costo de operación de unidades de procesamiento de salmuera concentrada (USD).

$Cost^{op-c-process}$ Costo de operación de unidades de procesamiento de arcilla concentrada (USD).

$Cost^{op-c-OH-process}$ Costo de operación de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para la producción de LiOH (USD).

$Cost^{op-Br-process}$ Costo de operación de unidades de producción de LiBr (USD).

$Cost^{op-Cl-process}$ Costo de operación de unidades de producción de LiCl (USD).

$Cost^{op-OH-process}$ Costo de operación de unidades de producción de LiOH a partir de Li_2CO_3 (USD).

TOPC Costo total de operación de plantas de procesamiento (USD).

TIC Costo total de importación de Li_2CO_3 (USD).

TOC Costo total de operación del proyecto (USD).

Costos unitarios de operación

$UOC_i^{b-process}$ Costo unitario de operación de procesamiento de salmuera concentrada (USD/ton).

$UOC_i^{c-process}$ Costo unitario de operación de procesamiento de arcilla concentrada (USD/ton).

$UOC_i^{c-OH-process}$ Costo unitario de operación de procesamiento de arcilla concentrada para la producción de LiOH (USD/ton).

$UOC_i^{Br-process}$ Costo unitario de operación de producción de LiBr (USD/ton).

$UOC_i^{Cl-process}$ Costo unitario de operación de producción de LiCl (USD/ton).

$UOC_i^{OH-process}$ Costo unitario de operación de producción de LiOH a partir de Li_2CO_3 (USD/ton).

$UC_{k,t}$ Costo unitario de Li_2CO_3 importado (USD/ton).

Precio unitario del agua

$UP^{water-pp}$ Precio unitario del agua para la planta de procesamiento (USD/ton).

Ventas de Li_2CO_3 , LiOH , LiBr , LiCl , Na_2SO_4 , potasa y materia prima

$Sales^{Br}$ Ventas de LiBr (USD).

$Sales^{Cl}$ Ventas de LiBr (USD).

$Sales^{OH}$ Ventas de LiBr (USD).

$Sales^{direct-uses}$ Ventas de Li_2CO_3 a mercados nacionales (USD).

$Sales^{Li_2CO_3-export}$ Ventas de Li_2CO_3 a mercados de exportación (USD).

$Sales^{rm-export}$ Ventas de arcilla y salmuera para exportación (USD).

$Sales^{potash}$ Ventas de potasa (USD).

$Sales^{Na_2SO_4}$ Ventas de Na_2SO_4 (USD).

TS Ingresos totales generados por ventas (USD).

Precios unitarios de venta

UP_t^{Br} Precio unitario de venta de LiBr (USD/ton).

UP_t^{Cl} Precio unitario de venta de LiBr (USD/ton).

UP_t^{OH} Precio unitario de venta de LiBr (USD/ton).

$UP_{q,t}^{Li_2CO_3}$ Precio unitario de venta de Li_2CO_3 a mercados nacionales (USD/ton).

$UP_{q,t}^{Li_2CO_3}$ Precio unitario de venta de Li_2CO_3 a mercados de exportación (USD/ton).

$UP_{s,t}^b$ Precio unitario de venta de salmuera concentrada a mercados de exportación (USD/ton).

$UP_{r,t}^c$ Precio unitario de venta de arcilla concentrada a mercados de exportación (USD/ton).

UP_t^{potash} Precio unitario de venta de potasa (USD/ton).

$UP_t^{Na_2SO_4}$ Precio unitario de venta de Na_2SO_4 (USD/ton).

Función objetivo

TP Ganancias totales del proyecto (USD).

Nomenclatura adicional para modelo en el capítulo 4

El modelo presentado en el capítulo 4 sigue la misma nomenclatura que el capítulo 3 únicamente se adicionan las siguientes expresiones:

$F_{s,t}^{bvirg-prod}$ Flujo de salmuera virgen producido (ton/t).

$F_{w,t}^{in-desal}$ Flujo de salmuera virgen que entra a unidades de desalinización (ton/t).

δ_w^{b-prod} Factor de eficiencia de procesamiento de salmuera virgen.

$F_w^{bvirg-process-cap}$ Capacidad óptima de unidades de procesamiento de salmuera virgen (ton).

$F_w^{bvirg-min-process-cap}$ Capacidad mínima de unidades de procesamiento de salmuera virgen (ton).

$F_w^{bvirg-max-process-cap}$ Capacidad máxima de unidades de procesamiento de salmuera virgen (ton).

y_w^b Variable binaria que determina la existencia de unidades de procesamiento de salmuera virgen.

-
- $CapCost_w^{bvirg-process}$ Costo capital de unidades de procesamiento de virgen (USD).
- $FC_w^{bvirg-process}$ Costo fijo de unidades de procesamiento de salmuera virgen (USD).
- $VC_w^{bvirg-process}$ Costo variable de unidades de procesamiento de salmuera virgen (USD).
- $\beta^{bvirg-process}$ Exponente que relaciona las economías de escala en unidades procesamiento de salmuera virgen.
- $Cost^{op-bvirg-process}$ Costo de operación de unidades de procesamiento de salmuera virgen (USD).
- $UOC_w^{bvirg-process}$ Costo unitario de operación de procesamiento de salmuera virgen (USD/ton).
- $Sales^{Water}$ Ventas de agua generada (USD).
- UP_t^{water} Precio unitario de venta de agua (USD/ton).
- $Cost^{trans_water_city}$ Costo de transporte de agua producida a ciudades (USD).
- $UTC_{w,i}^{water-city}$ Costo unitario de transporte de agua hacia ciudades (Ton).
- $TotWater^{Available}$ Agua total producida por unidades de desalinización (Ton).

Agradecimientos

A mi asesor: Dr. Luis Fernando Lira Barragán

Mi mas sincero agradecimiento por su invaluable apoyo y orientación durante la elaboración de este proyecto. Sin duda su compromiso, dedicación, conocimiento y paciencia a lo largo de nuestras reuniones y revisiones así como también sus comentarios y consejos han enriquecido significativamente este trabajo y a su vez me han motivado ha seguir en el camino de la investigación. Agradezco profundamente el tiempo y esfuerzo que ha invertido en mi formación profesional y su influencia en mi persona. Usted es un gran ejemplo de persona y es realmente un gusto trabajar bajo su dirección.

A mi comité tutorial: Dr. José María Ponce Ortega, Dr. Agustín Jaime Castro Montoya, Dr. Fabricio Nápoles Rivera y Dr. Fernando Israel Gómez Castro.

Agradezco sus valiosas contribuciones y mejoras a este proyecto. Es un placer contar con comentarios tan acertados de profesionales ejemplares como ustedes.

Al CONAHCyT

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de maestría. Gracias por su patrocinio.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Agradezco sinceramente a mi apreciada universidad por brindarme la oportunidad de continuar mi formación a través de mis estudios de posgrado. Expreso mi gratitud a la destacada labor de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, así como a todos quienes la integran.

Victor Osvaldo Vega Muratalla

Glosario

Caso: Sección de un escenario que se concentra en una demanda de compuestos de litio específica.

Escenario: Caso de estudio representado por un modelo matemático y analizado a través de diversos casos.

Li₂CO₃ grado batería: Li₂CO₃ con pureza superior al 99.5 % y con punto de fusión de 721.1 °C

Li₂CO₃ grado técnico: Li₂CO₃ con pureza inferior al 99.5 %.

Potasa: Conjunto de sales que precipitan al momento de la evaporación solar de la salmuera virgen u obtenidas a través de las unidades de desalinización. Usualmente son sales de K, Na y Mg, pero depende específicamente de la salmuera tratada.

Salmuera concentrada: Salmuera concentrada mediante evaporación solar o unidades de desalinización, con una concentración de litio superior a las 6000 ppm y apta para la producción de compuestos de litio.

Salmuera virgen: Salmuera recién extraída de los salares sin ningún procesamiento previo.

Capítulo 1. Introducción

1.1 Generalidades

En la sociedad contemporánea, la electricidad se ha convertido en un recurso fundamental para llevar a cabo tanto las actividades diarias como las productivas, lo que genera un incremento constante en la demanda de energía. Se estima que el consumo mundial de energía aumentará en un promedio anual del 1.4% durante el lapso entre 2013 y 2035 (BP, 2015).

El crecimiento en la demanda de energía eléctrica está influenciado por diversos factores, incluyendo el crecimiento económico y demográfico, así como la eficiencia energética y la adopción de la movilidad eléctrica. En términos de generación de energía eléctrica, existen diversas tecnologías disponibles como las centrales termoeléctricas, geotérmicas, nucleares, además de aquellas que se basan en fuentes renovables como la eólica, hidroeléctrica y solar fotovoltaica. En México la mayor parte de la energía eléctrica se produce mediante centrales termoeléctricas (Ramonés Fernández, 2016).

El CO₂ es uno de los principales gases de efecto invernadero (GEI) responsables del cambio climático (Castilla y col., 2019). En este sentido, se reconoce ampliamente que la producción de electricidad es una de las principales industrias generadoras de las emisiones totales de CO₂ a nivel global, contribuyendo aproximadamente con el 40% de estas emisiones (Gallego, 2020).. Paralelamente, el sector del transporte es otro gran emisor de GEI debido a la quema de combustibles fósiles en los motores de los vehículos. Por lo anterior, una de las acciones que se busca aplicar en el presente consiste en reducir la comercialización de vehículos de motor convencionales en favor de la adopción de vehículos eléctricos.

En la fabricación de vehículos eléctricos, la disponibilidad de baterías para almacenar energía es crucial. En este aspecto, las baterías de ion-litio adquieren una importancia especial debido a las numerosas ventajas que ofrecen, como una mayor densidad energética, alta eficiencia, tiempos de carga reducidos, larga durabilidad y procesos de fabricación más seguros. Estas baterías son empleadas en una amplia gama de dispositivos como vehículos

eléctricos, teléfonos móviles, cámaras portátiles, laptops, relojes inteligentes, entre otros. Además, el litio tiene una gran cantidad de aplicaciones incluyendo las aleaciones con aluminio, la industria del vidrio y cerámica, el procesamiento de aire e incluso la industria farmacéutica.

Generalmente, el litio se obtiene a partir de dos vías; distintos tipos de salmueras y depósitos de roca dura o arcilla. En este contexto, informes recientes señalan la existencia de potenciales reservas de litio en México que podrían ser explotadas para el aprovechamiento de este recurso. Por lo tanto, es crucial el establecimiento de una cadena de suministro que planifique la producción integral del litio, así como su procesamiento para obtener los derivados que se emplean para diversas aplicaciones. Este proyecto presenta un enfoque de programación matemática para simular la explotación de los recursos de litio en el país, su procesamiento para obtener los compuestos con mayor demanda y su distribución en los mercados nacionales existentes considerando importación y exportación. El objetivo principal es obtener el máximo beneficio económico considerando también aspectos ambientales. La **Figura 1.1** muestra una representación esquemática de los dos escenarios analizados en el proyecto; el primero no incorpora la implementación de unidades de desalinización de salmuera mientras que el segundo si lo hace, permitiendo así la recuperación de agua proveniente de la salmuera.

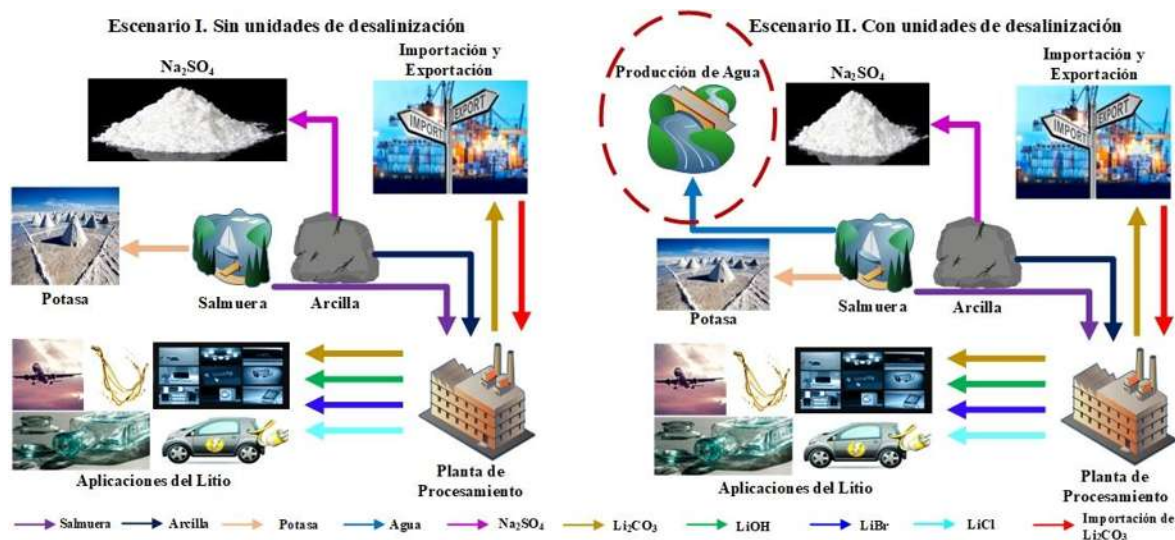


Figura 1.1 Representación general de escenarios analizados.

1.2 Objetivo

Desarrollar y aplicar un modelo de formulación matemática para la planificación estratégica de una cadena de suministro de litio en México en el que se considere inicialmente la etapa de explotación de los recursos a partir de sus distintas fuentes como la salmuera y la arcilla, así como procesamiento, producción, exportación e importación de compuestos de litio con valor agregado.

1.2.1 Objetivos Particulares

- a) Generar una superestructura en la que se consideren múltiples zonas de explotación de litio, unidades de procesamiento y mercados.
- b) Desarrollar un modelo de optimización en el que se modelen todas las interacciones consideradas en la superestructura desde las zonas de explotación, las plantas de procesamiento y el envío a los mercados.
- c) Implementar el modelo matemático desarrollado en la plataforma de optimización GAMS misma que permita generar soluciones atractivas.
- d) Evaluar los aspectos económicos y ambientales más relevantes involucrados en la implementación de unidades de desalinización para el procesamiento de la salmuera virgen.
- e) Analizar el caso de estudio de México para determinar la factibilidad técnica, económica y ambiental para la implementación de una cadena de suministro de compuestos de litio.

1.3 Justificación

En la actualidad, el calentamiento global es uno de los desafíos más apremiantes a nivel mundial mismos que se encuentra ligado a diversos factores como el uso excesivo de combustibles fósiles. En este sentido, se han desarrollado distintas tecnologías destinadas a mitigar el impacto del cambio climático, por ejemplo, las baterías de litio para el almacenamiento de energía eléctrica, por lo que el litio ha tenido un gran auge. Esta situación ha generado un aumento significativo en la demanda mundial de compuestos de litio, aunado a la diversidad de aplicaciones que ofrece este metal. Por lo tanto, se vuelve crucial llevar a

cabo un análisis exhaustivo que permita evaluar y optimizar el suministro de este recurso tanto a nivel nacional como internacional. Además, informes recientes muestran el potencial e interés que tiene México en la explotación de litio. Esto subraya la importancia de realizar una planificación estratégica integral que permita evaluar la explotación eficiente y sostenible de este recurso considerando también el escenario futuro donde se disponga del litio extraído en el país.

1.4 Antecedentes

Durante 2019 en México se vendieron 25,608 automóviles eléctricos entre los cuales se encuentran los híbridos (HEV por sus siglas en inglés), híbridos enchufables (PHEV por sus siglas en inglés) y completamente eléctricos (EV por sus siglas en inglés), representado el 1.9% del total de vehículos automotores comercializados (SENER, 2020). Hoy en día, en el país alrededor de 37 marcas y modelos producen y/o comercializan vehículos en México, de las cuales la mayoría ofrece al menos una opción de vehículo eléctrico (INEGI, 2023). En este contexto, las ventas de vehículos híbridos y eléctricos crecieron 40.5% en Diciembre de 2022 con respecto a las cifras de Diciembre de 2021. Además, durante 2022 se vendieron en el mercado interno 51,065 vehículos con este tipo de tecnologías, lo cual representa el 4.7% de las ventas totales de vehículos ligeros en el país durante el mismo año (AMIA, 2023).

Por otro lado, el aumento en las ventas de vehículos eléctricos generará un incremento en la demanda de componentes utilizados en la fabricación de sus baterías, especialmente el litio. En este sentido, actualmente México no cuenta con ningún yacimiento de litio en explotación, pero se están realizando operaciones de exploración en áreas prometedoras dentro del territorio nacional. Durante el 2018 las exportaciones de litio desde las plantas piloto existentes en México alcanzaron aproximadamente 36 ton, mientras que las importaciones principalmente provenientes de Chile para satisfacer la demanda interna ascendieron a 195 ton, evidenciando un marcado déficit de este recurso (SE, 2021).

De acuerdo con *Bowell y col. (2020)*, aproximadamente del 70% de las reservas globales de litio se localizan en el sur del continente americano, principalmente en Bolivia, Chile y Argentina. Además de comercializarse como salmuera, el litio se vende en forma de

compuestos de valor añadido como el Li_2CO_3 y LiOH , en forma metálica y como minerales concentrados (USGS, 2017). Sus propiedades, como su baja masa atómica, reducido coeficiente de expansión térmica y alta reactividad electroquímica, entre otras, han propiciado su aplicación en numerosos productos comerciales como aleaciones con diversos metales, vidrio, cerámica y baterías.

Por otra parte, el procesamiento de litio puede requerir grandes cantidades de agua y energía para obtener los compuestos de interés, lo cual puede generar impactos ambientales significativos, especialmente donde los recursos hídricos son escasos. En este sentido Baspineiro y col. (2020) analizaron la recuperación de agua durante la producción de litio a partir de salmueras. Macedonio & Enrico (2017) evaluaron los costos de las unidades de desalinización, así como sus capacidades y requerimientos energéticos. Dai y col. (2019), realizaron un análisis del ciclo de vida de las baterías de ion litio.

Además Zhou y col. (2022), realizaron un análisis para determinar la seguridad del suministro de litio con el aumento en la demanda de vehículos eléctricos; Shao y Jin (2020), evaluaron la resiliencia de la cadena de suministro de litio en China, mientras que Sun y col. (2019), evaluaron los riesgos en el suministro de materiales para la producción de baterías de iones de litio.

1.5 Alcance

El enfoque de este proyecto de investigación se centra en analizar la viabilidad técnica y económica de la implementación de una cadena de suministro de compuestos de litio con alto valor agregado en México. Se pretende determinar la relación de los beneficios económicos y ambientales de este proyecto según los objetivos planteados. Además, aunque la metodología desarrollada se aplicara a casos de estudio en México, es general y transferible a otros sistemas siempre y cuando se disponga de los datos pertinentes. Los resultados obtenidos a través de estas metodologías servirán como punto de partida para futuros proyectos de investigación en este ámbito, brindando información valiosa para su desarrollo y aplicación.

1.6 Hipótesis

El desarrollo de modelos matemáticos de optimización para la planificación estratégica de la explotación del litio que incluya el procesamiento y obtención de derivados del litio permitirá evaluar la viabilidad de establecer un sistema de producción de litio en México, identificando la configuración que maximice las ganancias totales incluyendo la ubicación de plantas de procesamiento y los flujos que deberán enviarse en cada ruta. Se anticipa que esta metodología brindará soluciones atractivas económicamente y en términos ambientales, beneficiando la toma de decisiones para proyectos futuros similares.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Calentamiento Global

El cambio climático representa uno de los desafíos más importantes a los que se enfrenta el mundo en la actualidad y es de vital importancia el atenderlo ya que está asociado a diversos problemas como impactos a la salud humana, fenómenos naturales fuera de lo común, alteraciones en el ciclo del agua, entre otros. Abordar este desafío requiere una respuesta global coordinada que tenga como objetivo el limitar el calentamiento global y a su vez mitigar los efectos adversos asociados. Por lo tanto, es fundamental implementar medidas significativas para avanzar hacia un futuro sostenible y resiliente (Dubois & Seminario Hurtado, 2019).

En consecuencia, se han establecido convenios a nivel internacional para enfrentar el desafío del cambio climático, siendo el acuerdo de París un ejemplo representativo. Estos esfuerzos buscan disminuir las emisiones de GEI los cuales están directamente asociados con el cambio climático, particularmente el CO₂ (Castilla y col., 2019). Uno de los sectores que más influyen en las emisiones de CO₂ es el transporte. Durante el 2012, el sector del transporte en México generó el 39 % de las emisiones de CO₂ de las cuales el autotransporte contribuyó con un 92 % (Solis Avila y Sheinbaum Pardo, 2016). En 2019 el sector de transporte a nivel global requirió 2748 millones de toneladas de petróleo equivalente (MtPe) representando un 29% de la energía mundial (Dai y col., 2019). Por lo anterior es que el interés por los vehículos eléctricos ha aumentado de manera significativa debido a su contribución en la reducción de las emisiones de los GEI y a la disminución de la dependencia de combustibles fósiles.

2.2 Electromovilidad

Dado el creciente interés por los vehículos eléctricos, en México se ha desarrollado una fuerte capacidad y logística en la industria automotriz, con intención de establecer las bases y pautas para promover el uso de tecnologías y combustibles limpios con intención impulsar y posicionar a nivel nacional la movilidad eléctrica como una alternativa viable y sostenible. En la actualidad, existen diversos tipos de vehículos eléctricos como lo son los

HEV, PHEV y EV, los cuales se representan en la **Figura 2.1**. Una de las principales diferencias entre los HEV y los EV es que la batería de estos últimos es 30-50 veces más grande (Sakunaiy col., 2021).

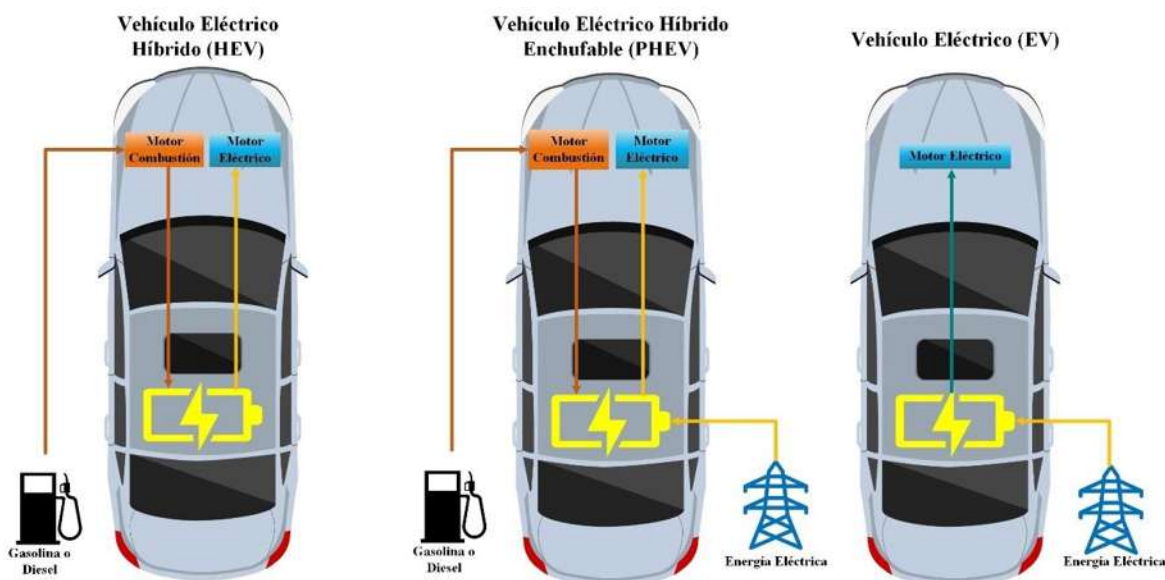


Figura 2.1 Representación general de tipo de vehículos eléctricos.

En la actualidad, es posible observar diversidad de modelos de automóviles eléctricos en el mercado, con diversas capacidades de autonomía y características que se adaptan a las necesidades de los consumidores. Además, el desarrollo de tecnologías en baterías ha permitido incrementar la autonomía de estos vehículos, disminuyendo las preocupaciones sobre la limitada distancia que estos podían recorrer en el pasado. En este contexto, las baterías de ion-litio son ampliamente preferidas para su uso en vehículos eléctricos, debido a las atractivas propiedades con las que cuenta como una larga vida útil, alta densidad energética y periodos de carga cortos. La venta de autos eléctricos incrementó de 118,000 unidades en 2012 a 1.15 millones en 2017 (Dai y col., 2019). Por su parte, se proyecta que la venta de automóviles eléctricos represente aproximadamente el 35% del total en 2030 y alcance el 50% en 2050, lo que subraya la importancia de asegurar un suministro adecuado de baterías para este periodo (IEA, 2021). En este sentido Dai y col. (2019) estiman que para el 2030 el 30% de las ventas de vehículos correspondan a vehículos eléctricos.

De acuerdo con Stamp y col. (2012), para que el impacto ambiental de la producción de Li_2CO_3 y su transporte es insignificante en contraste con los autos de combustión interna; en este sentido, la única forma que pondría en desventaja la utilización de autos eléctricos es si el Li_2CO_3 se obtiene a partir de agua de mar en condiciones desfavorables. Además, para que el impacto ambiental de conducir un auto eléctrico sea igual que el de uno de combustión es necesario que 1 litro de combustible tenga autonomía para conducir durante 100 km.

2.3 Principales reservas y países productores de litio

El llamado triángulo del litio constituido por Bolivia, Chile y Argentina cuenta con el 70% de los recursos probados de litio a nivel mundial (Bowell y col., 2020). La **Figura 2.2** muestra los principales países con reservas de litio a nivel mundial. Por otra parte, la **Figura 2.3** muestra los principales productores a nivel mundial (USGS, 2019). No obstante, las reservas de litio varían entre países, por ejemplo, para el caso de Chile y Argentina la mayoría de sus reservas son provenientes de salmueras, mientras que en Australia estas reservas consisten principalmente en depósitos de roca dura o arcilla. Por su parte durante 2019 Australia contribuyó el 86% de la producción a partir de yacimientos pegmatíticos (Comisión Chilena del Cobre, 2020).

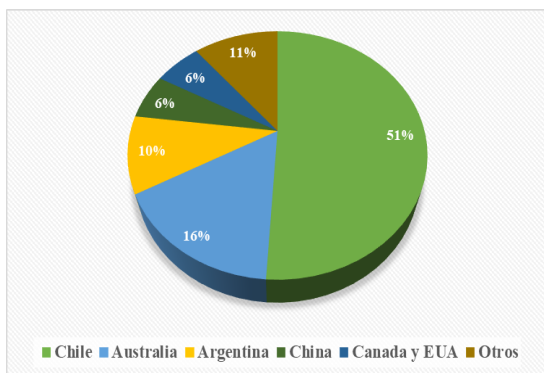


Figura 2.2 Reservas de litio por país.

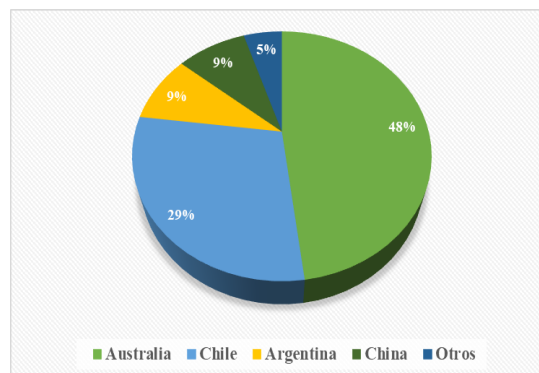


Figura 2.3 Principales países productores de litio

2.4 Litio en México

En el país, el Servicio Geológico Mexicano (SGM) ha realizado numerosos estudios exploratorios para localizar minerales litíferos en pegmatitas y salmueras encontrando ubicaciones potenciales para la extracción de este recurso (SGM, 2015). En conjunto con los Estados Unidos y Canadá, México puede producir grandes cantidades de litio para las industrias existentes en Norteamérica y el mundo (Marmolejo Cervantes y Garduño Rivera, 2022). En este sentido, la **Figura 2.4** muestra las ubicaciones de las reservas de litio en México.

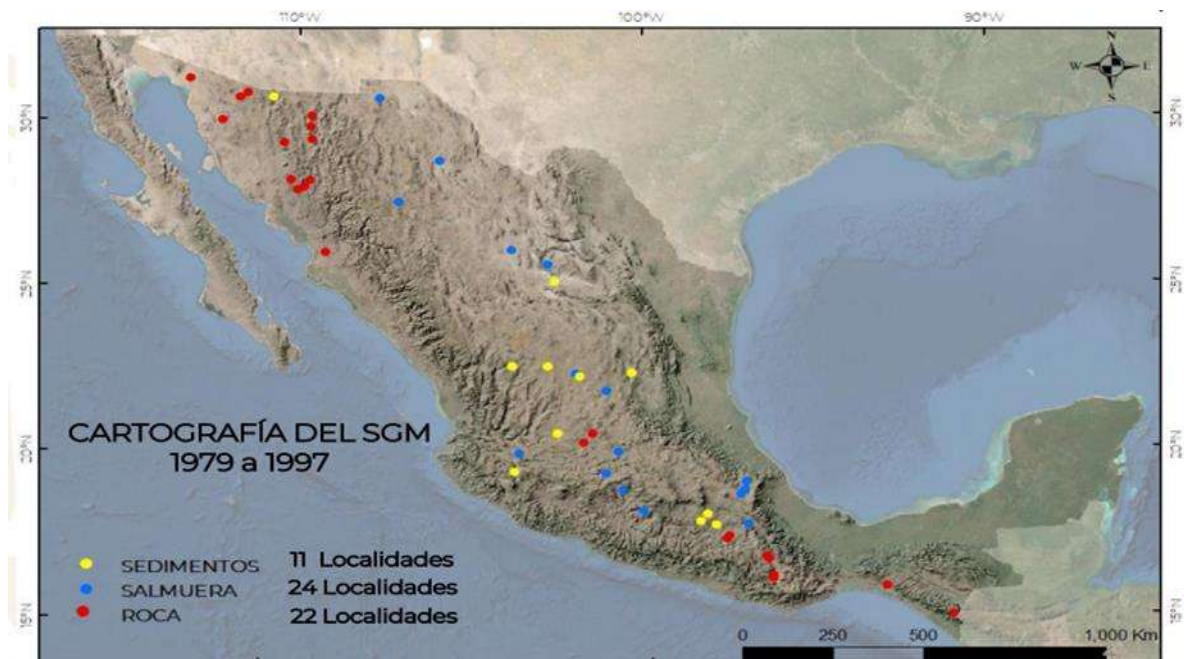


Figura 2.4 Ubicaciones con litio en México.

Por su parte, la **Tabla 2.1** muestra las asignaciones mineras actuales del SGM, en donde destaca la ubicación en el estado de Sonora, particularmente en el municipio de Bacadéhuachi.

Tabla 2.1 Asignaciones de litio del SGM.

Nombre	Ubicación	Tipo	Recursos		Reservas		Superficies (miles de hectáreas)
			Millones de Ton	Ppm de litio	Tonelaje	Ley litio (ppm)	
Alondra, SGM	Teocaltiche y Jalostitlán, Jalisco	Sedimentos	380	250-1,600	--	--	49
Los Aros, SGM	Agua Prieta, Sonora	Sedimentos	300	150-311	--	--	12.9
Los Picos, SGM	Nogales, Sonora	Sedimentos	300	199-1,400	--	--	1.9
Tlaxcoapan, SGM	Piactla, Puebla	Salmuera y roca	--	250-3,281	--	--	1.9
La Ventana	Bacadéhuachi, Sonora	Sedimentos	800	2,650	243 Mt	3,480	87.1

Nota: (--) Información aún no disponible por el SGM.

Bacanora Minerals es la empresa encargada del desarrollo del proyecto de litio en la zona, misma que se espera tenga una producción de 35,000 Ton/año. El proyecto se encuentra ubicado a 180 kilómetros al noreste de Hermosillo, Son., dentro del municipio de Bacadéhuachi, Son. Esta región cuenta con dos horizontes de arcilla constituidos básicamente por material volcánico, que desde el punto de vista económico resultan atractivos por sus contenidos en litio.

• **Unidad de arcilla inferior.**

Consta de varias subunidades de material tobáceo, intercaladas con capas de arcilla ricas en litio que presenta un espesor promedio de 27.0 metros.

• **Unidad de arcilla superior.** Está constituida por varias subunidades de arcilla rítmicamente laminadas y capas de sílice, que se consideran indicativos de un ambiente de aguas termales; arenisca color marrón de grano grueso mal clasificada, con una matriz arcillosa y calcárea; franjas de arcilla de color verde amarillento con nódulos de sílice; bandas de arcilla de color gris oscuro y masas de calcita; capas de

lutita gris claro intercaladas con capas de arena y de color rojizo; arenisca de color rojizo de grano grueso con vetillas de calcita, que tiene un espesor promedio de 28.0 metros.

La unidad de arcilla inferior alberga arcillas con valores de litio en un rango de 38 ppm a 10,000 ppm. Por otra parte, la unidad de arcilla superior cuenta con valores de litio en el rango de 41 ppm a 6,200 ppm. Es importante mencionar que el depósito se encuentra cerca de la superficie, donde puede ser extraído por métodos a cielo abierto (SE, 2021).

2.5 Tipos de depósitos de litio y su procesamiento

Existen tres fuentes potencialmente explotables de litio a nivel mundial: salmueras, mineral de roca o pegmatitas y rocas sedimentarias, las cuales se describen a continuación:

2.5.1 Salmueras

Este tipo de depósitos representan alrededor del 66% de los recursos de litio a nivel mundial (Comisión Chilena del Cobre, 2020). Existen tres categorías de depósitos de salmuera: los continentales, los geotérmicos y los asociados a campos petrolíferos. Entre ellos, el tipo más común se encuentra en cuencas continentales de desiertos salinos, denominados como lagos de sal, salinas o salares. Estos depósitos se localizan en proximidad a estructuras volcánicas y están compuestos por arena, minerales y agua con elevadas concentraciones de sales disueltas.

- **Salmueras continentales:** Es la salmuera más habitual que alberga litio. Un ejemplo destacado es el salar de Atacama en Chile, que abarca alrededor de 3,000 m².
- **Salmueras geotérmicas:** Este tipo de salmuera representa alrededor del 3% de los recursos de litio y se componen de una solución salina caliente, generalmente proveniente de un campo geotérmico como su nombre lo indica.
- **Salmuera de campos petrolíferos:** En algunos campos petrolíferos se pueden encontrar salmueras ricas en litio, por ejemplo, Arkansas y el este de

Texas en EUA son el hogar de salmueras con concentraciones de hasta 700 mg/l de litio (SE, 2021).

Como es posible apreciar, los depósitos de salmuera son los más abundantes a nivel global, no obstante, los yacimientos pegmatíticos, en particular aquellos que contienen espodumena, tienen la ventaja de estar ampliamente distribuidos a nivel mundial.

2.5.2 Depósitos de pegmatita o roca dura

Las pegmatitas son rocas caracterizadas principalmente por un tamaño de grano extremadamente grande y de textura variable. Los minerales de granito son los principales constituyentes de las pegmatitas, por ejemplo, el cuarzo, albita, feldespato potásico y mica blanca (Dwight y col., 2017). Este tipo de depósitos representan alrededor del 26% de recursos mundiales de litio a nivel mundial principalmente concentrados en Australia, EUA y Canadá (Comisión Chilena del Cobre, 2020).

2.5.3 Depósitos de rocas sedimentarias

En los depósitos de arcilla más importantes, el litio está integrado en la estructura cristalina, presente en el mineral conocido como esmectita. La variante más común de esmectita es la hectorita ($\text{NaO}_3(\text{Mg},\text{Li})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$), compuesta principalmente por magnesio y litio. Recibe su nombre de un depósito en Héctor, California, que contiene un 0.7 % de litio. Otra reserva de hectorita se encuentra en Kings Valley, Nevada, con aproximadamente 42.3 millones de toneladas de recursos inferidos, con una concentración estimada de litio del 0.27 % (SE, 2021).

2.6 Procesamiento de depósitos de litio

El procesamiento de los diferentes depósitos de litio cambia de acuerdo con la fuente de donde proviene; en este sentido, la **Figura 2.5** muestra una representación general de las etapas dentro del procesamiento.

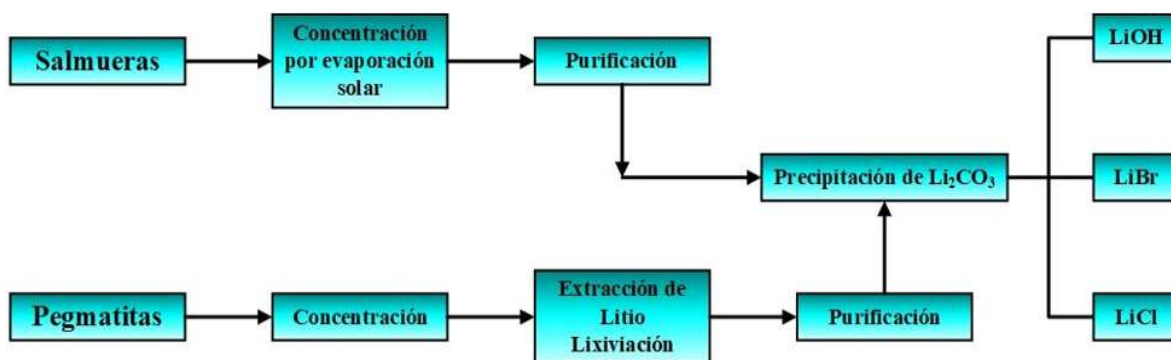


Figura 2.5 Procesamiento general a partir de fuentes de litio.

2.6.1 Procesamiento de salmueras

El proceso de recuperación de litio a partir de salmueras tuvo un fuerte impacto en la industria, al constituir este proceso una fuente de producción de litio con menores costos en comparación con otras fuentes de obtención. En este sentido, la salmuera virgen es primeramente bombeada desde las cuencas hacia los estanques de baja profundidad que regularmente van de 30 cm a 1 m de profundidad y de dimensiones considerables dependiendo de la zona de explotación. La concentración de la salmuera virgen va de 400-1500 ppm de litio. De este modo, comienza el proceso de evaporación solar, con el cual comienzan a precipitar secuencialmente un grupo de sales como cloruro de potasio, cloruro de sodio, sulfatos de potasio, etc. El tipo de sales que precipitan dependen específicamente de la zona de explotación y características de la salmuera. Por lo anterior, en este trabajo se considera como “potasa” a todo el conjunto de sales que precipitan durante el proceso de evaporación solar de la salmuera. Las salmueras ricas en litio tienen complejas soluciones electrolíticas con muchos iones presentes y una alta salinidad, generalmente va de 170-400 g/l de sólidos disueltos totales (TDS por sus siglas en inglés) (Baspineiroy col., 2020). La **Figura 2.6** representa de manera esquemática el proceso de concentración solar para la obtención de salmuera rica en litio. Una vez han precipitado las sales presentes en la salmuera, esta es bombeada a un segundo estanque con menor profundidad para continuar el proceso de evaporación hasta alcanzar una concentración mayor a las 6000 ppm de litio. Una

vez lograda esta concentración, la salmuera es enviada a la planta de procesamiento para la producción de compuestos de litio.

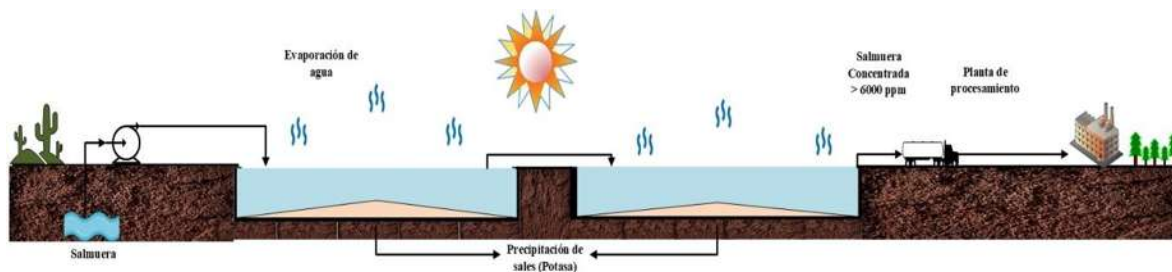


Figura 2.6 Representación del proceso de evaporación solar para la producción de litio a partir de salmuera.

Sin embargo, el proceso de concentración de salmuera a través de evaporación solar tiene ciertas desventajas. En este sentido, para que una zona de salmuera sea adecuada para la extracción de litio, debe tener una alta tasa de evaporación, y grandes áreas planas disponibles para llevar a cabo la evaporación solar. Además, la concentración se ve favorecida en alturas superiores a los 2000 msnm, en áreas desérticas y con bajas precipitaciones anuales además de baja humedad en el aire. Por otra parte, la tasa de evaporación disminuye conforme la salmuera se va concentrando, lo cual retarda considerablemente el proceso. Desde el punto de recuperación del litio, los lagos de salmuera se dividen en tres grupos: el tipo de alta relación Mg/Li, baja relación Mg/Li y sin Mg^{2+} (Zhang y col., 2012). Además, la concentración de magnesio en la salmuera puede influir en la tasa de evaporación (Stamp y col., 2012).

Generalmente, la duración de la evaporación solar tarda entre 10 y 24 meses para completarse y obtener una salmuera lista para procesarse. Sin embargo, el mayor impacto asociado a la producción de litio a partir de salmuera está relacionado con las grandes cantidades de agua que se evaporan, perdiendo más del 90% del volumen original (Baspineiro y col., 2020). No obstante, el continuo bombeo de salmuera puede conllevar un estrés hídrico en la zona de extracción (Flexer y col., 2018).

2.6.2 Procesamiento de roca dura

La espodumena fue la fuente principal de obtención de carbonato de litio hasta que se inició la explotación del litio contenido en salmueras naturales. El mineral espodumena se concentra por flotación diferencial para obtener un concentrado con un contenido de 2.5 a 3.2 % de litio. Para la producción de litio a partir de la espodumena, el concentrado de este debe calcinarse previamente con caliza, para posteriormente y mediante procesos de molienda, lixiviación, precipitaciones sucesivas, entre otros y dependiendo del agente tratante, se pueda extraer un alto porcentaje de litio, produciendo hidróxido de litio, carbonato de litio o cloruro de litio (SE, 2021).

Actualmente, existen dos rutas por medio de las cuales es posible producir Li_2CO_3 a partir de recursos minerales uno es mediante la utilización de H_2SO_4 (ver la **Figura 2.7**), mientras que el otro (véase la **Figura 2.8**) considera la utilización de NaOH (Gao, 2023).

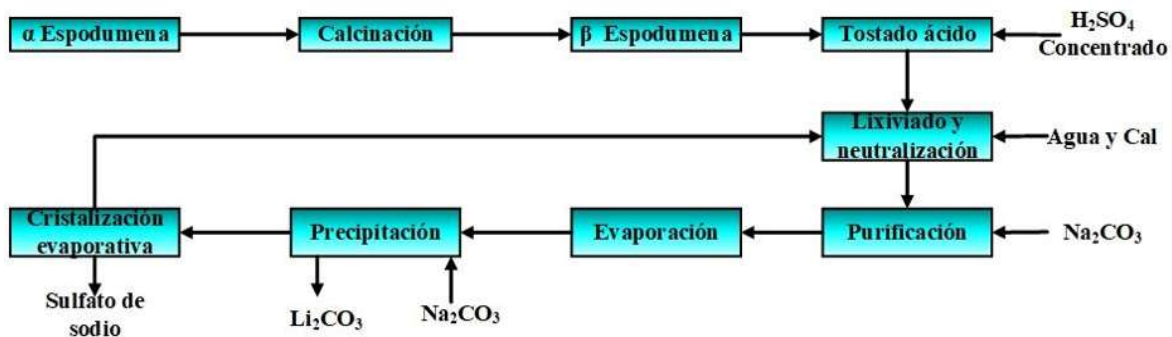


Figura 2.7 Proceso de producción de Li_2CO_3 mediante método de H_2SO_4 .

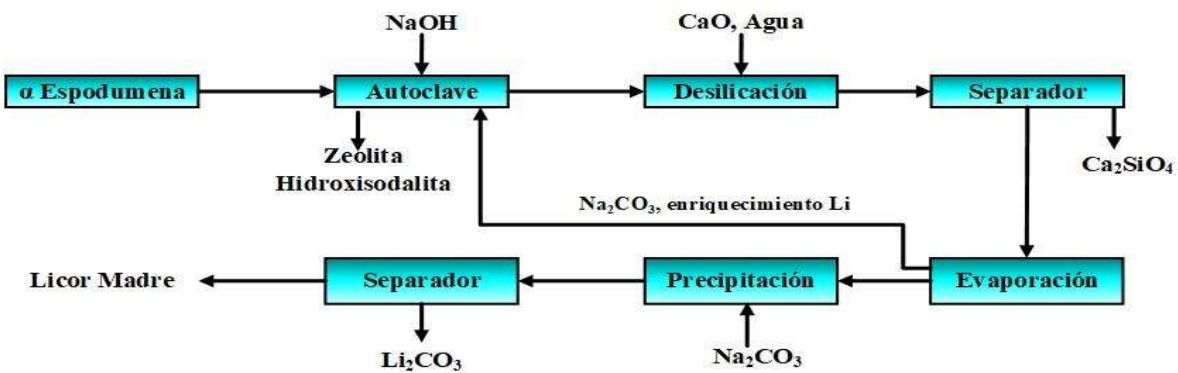


Figura 2.8 Proceso de producción de Li_2CO_3 mediante método de NaOH .

Las concentraciones de litio en el licor madre son de 1.4-2.0 g/l. En este sentido (Wang y col., 2019) estiman que un aproximado de 25 m³ de licor madre con alto contenido de litio son generados por tonelada de Li₂CO₃ producido, mismo que puede ser recuperado a través del proceso de cristalización. Además, la extracción de litio del licor madre se puede lograr en hasta un 96.57% (Wang y col., 2019).

2.7 Usos y aplicaciones de compuestos de litio

El carbonato de litio es actualmente el compuesto más significativo derivado del litio, representando el 71% del conjunto total de compuestos de litio. Le sigue en proporción el hidróxido con un 22%, mientras que los demás compuestos, tales como LiBr y LiCl, comprenden el porcentaje restante. Sin embargo, se prevé que la producción de hidróxido supere eventualmente la producción del carbonato debido a su creciente aplicación en el desarrollo de nuevas tecnologías de baterías (Comisión Chilena del Cobre, 2020).

2.7.1 Industria del aluminio

El aluminio (metal) se obtiene a partir de electrolisis de la alúmina fundida en un baño de composición variable de 2-8 % de alúmina, 5-7 % de fluoruro de aluminio, 5 a 7% de fluoruro de calcio y 80 a 85 % de criolita. Al baño se le adiciona alrededor de un 3.5 % en peso de Li₂CO₃ lo cual permite los siguientes beneficios:

- Disminuye el punto de fusión del baño, así como la viscosidad.
- Aumenta la conductividad eléctrica del electrolito.

Estos cambios permiten trabajar con una temperatura más baja, lo cual reduce el consumo de energía y por ende mejora la productividad (SE, 2021).

2.7.2 Industria del vidrio y la cerámica

El litio históricamente se ha utilizado para la fabricación de vidrio y cerámica, pero es importante destacar que el consumo para estas aplicaciones en la actualidad constituye alrededor del 23 %. La adición de litio en la fabricación de cerámicas y vidrios consigue disminuir la temperatura de fusión y la viscosidad de la masa fundida y a aumentar su

resistencia al choque térmico, dándole así las características necesarias para su uso y además disminuyendo los costos de producción (Bibienne y col., 2020).

2.7.3 Industria de grasas y lubricantes

El hidróxido de litio se emplea en la producción de grasas y lubricantes de alta calidad, principalmente para aplicaciones industriales y automotrices, debido a su resistencia a altas temperaturas y su capacidad para reducir la fricción.

2.7.4 Industria farmacéutica

El litio ha adquirido una enorme importancia en la medicina, hasta llegar al punto en el que la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha incluido al litio entre los denominados “medicamentos esenciales”. El área de aplicación médica más importante es el tratamiento del trastorno bipolar, utilizándose con éxito como estabilizador del estado de ánimo y tratamiento para el trastorno esquizoafectivo y los trastornos afectivos unipolares. Además, el litio es uno de los pocos fármacos con un efecto anti-suicida demostrado (Bibienne y col., 2020).

2.7.5 Industria de tratamiento de aire

El hidróxido de litio por su parte se usa tanto en naves espaciales como en submarinos, en ambos casos con el propósito esencial de depurar el aire y volverlo a hacer funcional extrayendo el CO₂ (Serrano Moreno, 2020).

2.8 Baterías de ion-litio

Como ya se mencionó, actualmente aproximadamente el 56 % del litio consumido en el mundo se destina a la fabricación de baterías recargables. El litio en estas baterías está presente en el cátodo, el cual está formado por un colector de corriente de aluminio sobre el que se deposita un fino polvo de material activo. Dependiendo de la estructura cristalina del litio se obtendrán distintas capacidades de retención de energía y estabilidad. Hoy en día se utiliza principalmente el óxido de Li-Ni-Mn-Co o el óxido de Li-Ni-Co-Al en el cátodo (Escudero Martínez y Álvarez, 2021). Las baterías de litio son utilizadas en todo tipo de dispositivos como celulares móviles, tabletas, laptops, cámaras portátiles, baterías portátiles,

e-bikes, vehículos eléctricos, etc. Además, se prevé que el precio de las baterías disminuya este año después del mínimo histórico presentado en 2023 debido a la utilización de cátodos fabricados con materias primas más económicas como el sodio en lugar del litio, sin embargo las baterías con iones de sodio almacenan una cantidad de energía menor por lo que su utilidad se encuentra limitada (C&EN, 2024).

2.9 Demanda de compuestos de litio

En términos generales, la demanda de litio ha incrementado directamente proporcional con el aumento de los requerimientos de baterías, en este sentido, las principales aplicaciones del litio en el 2011 se muestran en la **Figura 2.9** (Jandová y col., 2012) . Además, se espera que la demanda de litio se duplique en los próximos 10 años (Flexer y co., 2018).

El aumento en la demanda de litio en la última década se debe en gran medida a la producción de baterías, tecnologías de almacenamiento de energía y vehículos eléctricos. (Liu y B. Agusdinata, 2020). En este sentido, la demanda de compuestos de litio ha crecido en un ritmo promedio del 20% por año desde el 2000 (Gunther y col., 2017).

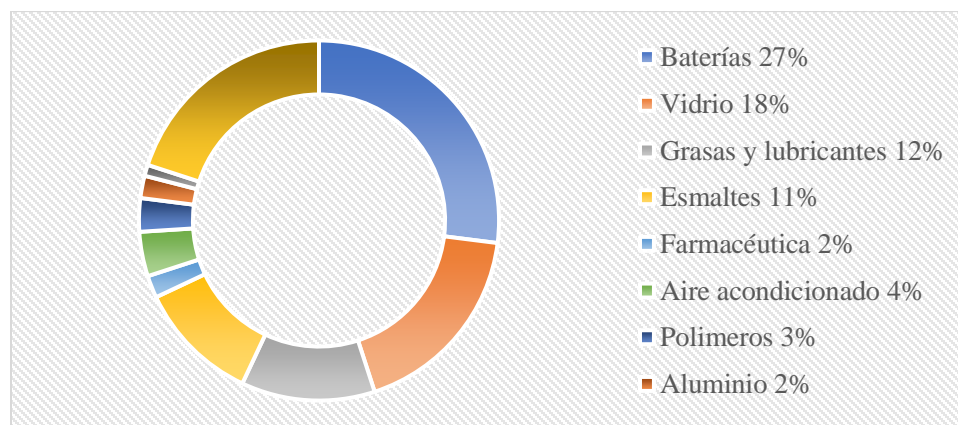


Figura 2.9. Usos del litio en el año 2011.

Por su parte en la **Figura 2.10** es posible visualizar las modificaciones que ha sufrido la demanda en cuanto a aplicaciones de litio se refiere (Basudev, 2017).

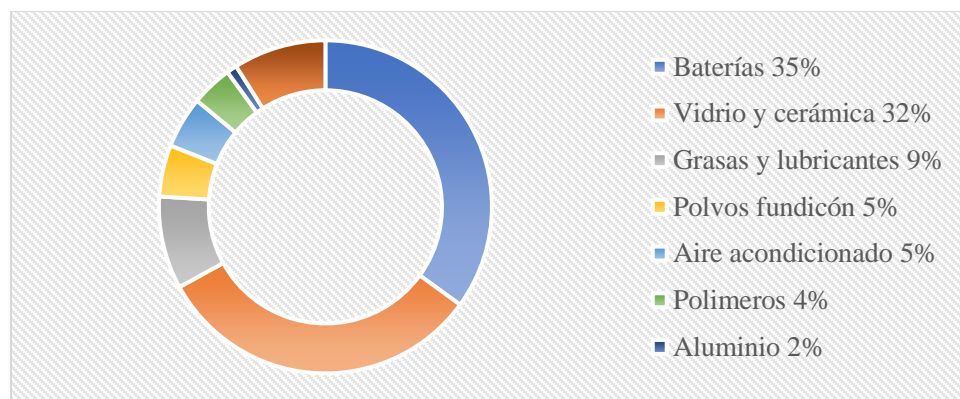


Figura 2.10 Usos del litio durante el año 2017.

En este sentido, se espera que la demanda de litio para la fabricación de baterías ascienda a \$ 221.0 Billones en 2024, además que para el 2025 el 66% de la demanda de litio sea para la fabricación de baterías (Basudev, 2017). Además, Obya y Céspedes (2021) estimaron que para el 2025 la demanda total de Li_2CO_3 será de 669 mil ton, de las cuales mas del 75 % será utilizado para la fabricación de baterías. Sakunai y col. (2021) proyectan una demanda de baterias para el 2030 5.5 veces mayor que la presentada en el 2018. Por lo tanto, es necesario también la implementación de nueva tecnología que permita la recuperación de litio a partir de baterías ya que en los próximos años el litio podría encontrarse en una potencial crisis (Meng y col., 2019). Además, las baterías de litio podrían causar problemáticas serias en el futuro si no se aborda de manera adecuada el desecho de estas (Jandová y col., 2012). De acuerdo con Jaskula (2023) la evolución en la demanda del litio se muestra en la **Figura 2.11**.

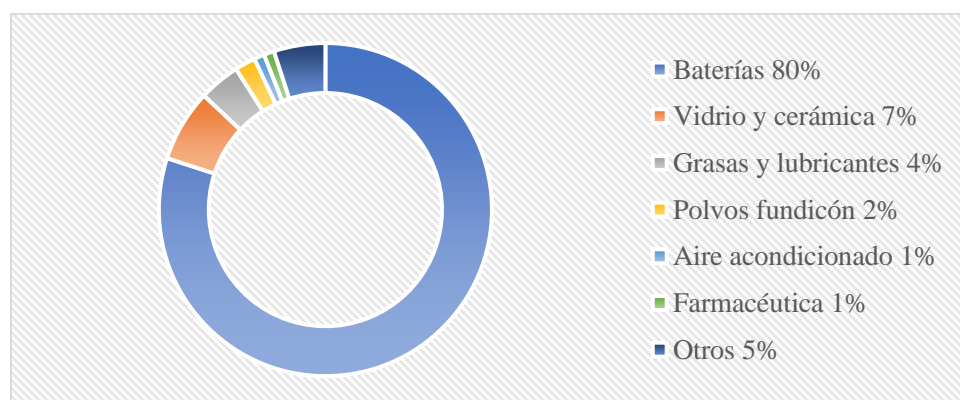


Figura 2.11 Usos del litio durante el año 2022.

2.10 Reciclo de baterías de litio

La recuperación de baterías de litio en 2016 fue menor al 1%, por lo cual es esencial la recuperación del litio de las baterías utilizadas; en este sentido, la futura crisis de litio puede ser evitada reciclando todas las baterías de litio con una tasa de recuperación del 90% (Basudev, 2017). En este contexto, Wang y col. (2019) proponen una metodología para la recuperación de Li_2CO_3 a partir del licor madre en el procesamiento. Jandová y col. (2012) presentan una metodología para la recuperación de litio a partir de materiales de desecho. Sakunai y col. (2021) demuestran que el reciclaje de las baterías de litio aumenta un 2-3% las emisiones de GEI en su ciclo de vida. Por su parte, Meng y col. (2019) también mencionan diversas metodologías para el reciclaje de las baterías de litio. Hasta Noviembre del 2022 alrededor de 44 compañías en Canadá y EUA y 47 compañías en Europa, reciclan baterías de litio (Jaskula, 2023).

2.11 Requerimiento y pérdida de agua durante producción de compuestos de litio

La mayoría de los estudios vinculados con la producción de compuestos de litio rara vez hacen referencia a las preocupaciones acerca del agua que se utiliza en esta industria. En este sentido, los altos volúmenes de agua fresca requeridos conllevan al descenso en los niveles de agua superficial como ríos y lagos. Además, como se ha mencionado con anterioridad, se espera que la demanda de compuestos de litio continúe incrementando considerablemente con el paso de los años, es por esto por lo que es de vital importancia el tomar acción inmediata en este problema para evitar problemas a futuro como la escasez de recursos hídricos en las zonas donde se producen compuestos de litio. De acuerdo con Diaz Paz y col. (2023), solo alrededor del 10.6% de los artículos recientemente publicados en cuanto a la producción de litio tratan de las preocupaciones entorno al uso del agua.

Por su parte, la producción de Li_2CO_3 a partir de salmuera presenta menores emisiones de gases de efecto invernadero y menor consumo de agua fresca por tonelada que la producción a partir de recursos minerales. En este sentido, el salar de Atacama en Chile, presenta una concentración de litio del 0.17%, 70% de agua y el resto de otros minerales

presentes. Al momento de concentrar esta salmuera se obtiene una concentración de litio alrededor del 6% y potasa como subproducto. Además, se ha reportado que se consumen entre 15.5 – 32.8 m³ de agua fresca para producir una tonelada de Li₂CO₃, y entre 31 – 50 m³ de agua por tonelada de LiOH a partir de litio concentrado (Kelly y col., 2021).

Ahora bien, para la concentración de los recursos a partir de arcilla se consumen 3.4 m³ de agua fresca por tonelada de mineral concentrado obtenido. Por su parte, la producción de Li₂CO₃ a partir de recursos minerales, se ha reportado que se consumen 77 m³ de agua fresca por tonelada, mientras que para la producción de LiOH se consumen 69 m³ de agua fresca por tonelada producida (véase Kelly y Col., 2021).

Se evaporan en promedio 130 kg de agua por kg de Li₂CO₃ producido en el salar de Atacama, teniendo una tasa de evaporación de 3200 mm por año. En el salar de Uyuni en Bolivia, es necesario evaporar 620 kg de agua kg. Ahora bien, en el caso del procesamiento de agua de mar, la cual tiene una concentración promedio de 0.173 mg/l de litio, es necesario procesar 5430 m³ de agua para obtener 1 ton de Li₂CO₃, considerando una eficiencia del 20% (Stamp y col., 2012). De acuerdo con Vera y col. (2023), se evaporan entre 100-800 m³ de agua para producir 1 ton de Li₂CO₃, dependiendo del depósito.

En este contexto, es posible visualizar que las pérdidas de agua durante la concentración de salmuera son considerables, por lo cual es de particular importancia la evaluación de nuevas estrategias que permitan un mejor aprovechamiento del agua en las áreas donde se extrae la salmuera. En este sentido a continuación, se aborda la implementación de unidades de desalinización para el tratamiento de la salmuera virgen.

2.12 Unidades de desalinización o desaladoras para el procesamiento de salmuera virgen

La implementación de unidades de desalinización para el procesamiento de salmuera virgen en lugar del proceso de evaporación solar presenta varias ventajas. Por ejemplo, reduce considerablemente el tiempo de procesamiento, además de que hace el proceso más estable e independiente de las condiciones meteorológicas del área. Además, dependiendo de las técnicas de separación empleadas, se puede obtener agua para usos comunes en lugar de

simplemente perderla por evaporación. En contraparte, el consumo energético es mayor. La **Figura 2.12** muestra una representación esquemática de la implementación de las unidades de desalinización.



Figura 2.12 Representación de implementación de unidades de desalinización para procesamiento de salmuera de litio.

En este sentido, el uso de sistemas integrados de desalinización con la producción de agua fresca y la recuperación de sales de litio es posible (Macedonio y Drioli, 2017; Ling, y col., 2020). El volumen potencial de agua que se puede recuperar de la extracción de litio de salmueras asciende los 500 m^3 por ton de Li_2CO_3 producida (Flexer y col., 2018). De acuerdo con la producción del 2019, era posible la recuperación de 77 millones de m^3 de agua fresca (Jaskula, Statistics and information on the worldwide supply of, demand for, and flow of the mineral commodity lithium, 2019). En este sentido, Baspineiro y col. (2020) proponen un modelo para la trata de salmueras continentales mediante el modelo de Pitzer, trabajando con 8 salmueras representativas.

La entalpia de vaporización promedio de las salmuera es de 2200 kJ/kg . Además, la tasa de recuperación de agua depende directamente de la zona de exploración, por ejemplo, en Atacama, se pueden recuperar 0.102 kg de agua por kg de salmuera virgen alimentada, en el salar de Hombre muerto 0.122 kg , Coipasa 0.254 kg , Uyuni $0.21\text{-}0.26 \text{ kg}$, Clayton Valley, $0.373\text{-}0.397 \text{ kg}$. Es importante destacar que este valor es directamente proporcional con el TDS; a mayor TDS, menor recuperación de agua y a su vez mayor gasto energético (Baspineiro y col., 2020).

Por otra parte, las tecnologías utilizadas para la desalinización del agua ya han sido probadas, incluso países como Arabia Saudita y Estados Unidos confían que el consumo de agua industrial y doméstico puede satisfacerse mediante agua desalinizada. En este aspecto, plantas de desalinización existentes en Argelia tienen capacidad para procesar 2 millones de m³/día y en 2015 la capacidad global ascendía los 100 millones de m³/día (Macedonio y Drioli, 2017).

En la actualidad, la mayoría de los procesos de desalinización prefieren el uso de tecnologías de osmosis inversa (RO por sus siglas en inglés) o SWRO (Sea Water Reverse Osmosis), sin embargo, otras tecnologías como destilación flash multietapa son analizadas por Macedonio y Drioli (2017). En este sentido, las plantas existentes de SWRO consumen 3-4 kWh/m³ de agua fresca producida con emisiones de CO₂ asociadas de 1.4-1.8 kgCO₂/m³. Sin embargo, antes de realizar la desalinización, es necesario la implementación de pretratamientos como la cristalización por membrana (MCR por sus siglas en inglés). En este sentido, la integración entre MCR y RO puede incrementar la cantidad de agua recuperada y producir productos cristalinos valiosos como los analizados por Baspineiro y col. (2020).

Por otra parte, los costos asociados a las tecnologías antes mencionadas dependen de diversos factores como la ubicación de la planta, la capacidad, la salmuera tratada y los costos de energía de la región. En este sentido, Macedonio y Drioli (2017) reportan un costo de 0.31-0.95 USD/m³ producido.

2.13 Planteamiento del problema

El creciente interés global por los compuestos de litio, especialmente para la creación de diversas baterías, junto con el impulso del gobierno mexicano para explotar el litio en el país, crea una ventana de oportunidad relevante en términos de su explotación y distribución. Por lo tanto, en este proyecto se busca establecer una cadena de suministro que pueda satisfacer la demanda nacional de compuestos de litio de alto valor, considerando la posibilidad de exportación de estos, encontrándose siempre sujeta a la disponibilidad del recurso. Esto implica la selección estratégica de ubicaciones para plantas de procesamiento

en donde se producirán estos compuestos, además de evaluar su viabilidad técnica, económica y ambiental para la exportación. En este proyecto, se propone la utilización de herramientas de programación matemática que permitan obtener resultados que optimicen la distribución de compuestos de litio de manera sostenible.

Capítulo 3. Modelo sin unidades de desalinización

3.1 Desarrollo de superestructura escenario I

De acuerdo con los objetivos planteados para la realización del presente proyecto, se contempla la generación y modelamiento de una superestructura general representada en la **Figura 3.1** en la que se incluyen todas las soluciones posibles al problema de interés. Esto contempla la extracción de litio proveniente de depósitos de arcilla y salmuera, la exportación como materia prima para su procesamiento en el exterior y el procesamiento dentro del territorio nacional. El enfoque principal se centra en la obtención de Li_2CO_3 el cual se puede producir a partir de ambas vías, además, se toma en cuenta la producción de LiOH a partir de arcilla concentrada o a partir del Li_2CO_3 . La planta de procesamiento también tiene la capacidad de producir LiBr y LiCl a partir del Li_2CO_3 . Por su parte, los productos obtenidos son distribuidos para satisfacer la demanda nacional en varios mercados, incluyendo la exportación de Li_2CO_3 a nivel internacional. Además, en el caso en el que la producción sea insuficiente, se contempla la importación de Li_2CO_3 , ya sea para su aplicación directa o para la producción de derivados según sea necesario. Finalmente, la cantidad de agua utilizada para la producción de los compuestos en cuestión es contabilizada por el modelo.

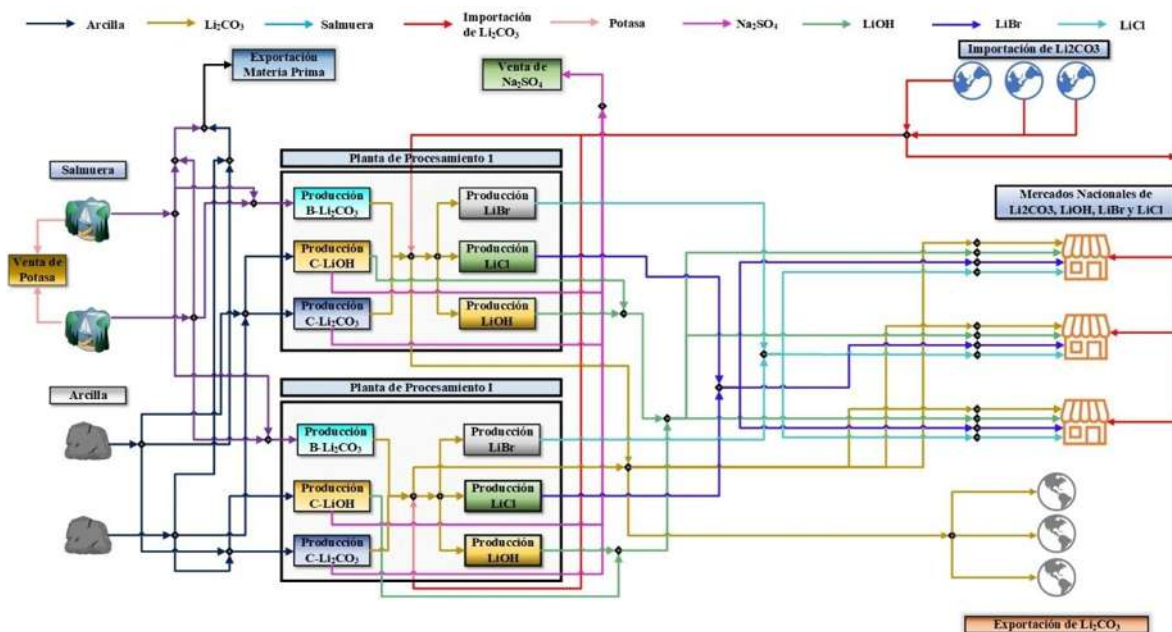


Figura 3.1 Superestructura propuesta para Escenario I.

3.2 Formulación y desarrollo del modelo matemático

Con el propósito de desarrollar correctamente la descripción de la superestructura mostrada en la **Figura 3.1** se considera la existencia de los siguientes conjuntos y su connotación para mejorar la comprensión de la metodología.

s = Zona de producción de salmuera rica en litio.

r = Zona de producción de arcilla rica en litio.

i = Planta de procesamiento de materia prima para producción de compuestos de litio.

j = Mercado disponible para exportación de Li_2CO_3 .

k = Fuente disponible para la importación de Li_2CO_3 .

q = Mercado nacional existente que demanda compuestos de litio.

t = Tiempo.

Ns = Total de zonas de producción de salmuera rica en litio.

Nr = Total de zonas de producción de arcilla rica en litio.

Ni = Total de plantas de producción de compuestos de litio.

Nj = Total de mercados disponibles para exportación de Li_2CO_3 .

Nk = Total de fuentes desde la que es posible importar Li_2CO_3 .

Nq = Total de mercados nacionales para compuestos de litio.

Balance en zonas de producción de salmuera concentrada

El flujo de salmuera concentrada producido por cada zona ($F_{s,t}^{b-prod}$) será igual a los flujos segregados hacia cada planta de procesamiento ($f_{s,i,t}^{b-process}$) más el flujo destinado para exportación como materia prima ($f_{s,t}^{b-export}$):

$$F_{s,t}^{b-prod} = \sum_i f_{s,i,t}^{b-process} + f_{s,t}^{b-export}, \quad \forall s, \forall t \quad (1.1)$$

El flujo máximo de salmuera concentrada que se puede extraer de cada zona ($F_{s,t}^{b-max-prod}$) es un dato conocido y la producción real debe ser menor que esta:

$$F_{s,t}^{b-prod} \leq F_{s,t}^{b-max-prod}, \quad \forall s, \forall t \quad (1.2)$$

Producción de potasa como subproducto en las zonas de producción de salmuera

Durante la concentración de la salmuera virgen, se produce potasa como subproducto ($F_{s,t}^{Potash-produced}$) misma que es directamente proporcional a la producción de salmuera concentrada mediante un factor de rendimiento (μ_s^{potash}):

$$F_{s,t}^{Potash-produced} = F_{s,t}^{b-prod} \mu_s^{potash}, \quad \forall s, \forall t \quad (1.3)$$

Balance en zonas de producción de arcilla concentrada

El flujo de arcilla concentrada producido por cada zona ($F_{r,t}^{c-prod}$) será igual a los flujos segregados hacia cada planta de procesamiento ($f_{r,i,t}^{c-process}$) más el flujo destinado para su exportación como materia prima ($f_{r,t}^{c-export}$):

$$F_{r,t}^{c-prod} = \sum_i f_{r,i,t}^{c-process} + f_{r,t}^{c-export}, \quad \forall r, \forall t \quad (1.4)$$

El flujo máximo de arcilla concentrada que se puede extraer de cada zona ($F_{r,t}^{c-max-prod}$) es un dato conocido y la producción real debe ser menor que esta:

$$F_{r,t}^{c-prod} \leq F_{r,t}^{c-max-prod}, \quad \forall r, \forall t \quad (1.5)$$

Exportaciones de materia prima

La suma de los flujos segregados por cada zona de producción de salmuera para su exportación será el total de salmuera exportada ($F_t^{tot-b-export}$):

$$F_t^{tot-b-export} = \sum_s f_{s,t}^{b-export}, \quad \forall t \quad (1.6)$$

La suma de los flujos segregados por cada zona de producción de arcilla para su exportación será el total de arcilla exportada ($F_t^{tot-c-export}$):

$$F_t^{tot-c-export} = \sum_r f_{r,t}^{c-export}, \quad \forall t \quad (1.7)$$

Balance en plantas de procesamiento

Procesamiento de salmuera

El flujo que entra a cada unidad de procesamiento de salmuera concentrada ($F_{i,t}^{b-process-in}$) será igual a la suma de los flujos segregados hacia esta desde las distintas zonas de producción:

$$F_{i,t}^{b-process-in} = \sum_s f_{s,i,t}^{b-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.8)$$

La producción de Li_2CO_3 a partir de salmuera concentrada ($f_{i,t}^{b-process-out}$) será igual al flujo total de salmuera que entra al procesamiento, multiplicado por un factor que relaciona la eficiencia de producción ($\alpha_i^{b-process}$):

$$f_{i,t}^{b-process-out} = F_{i,t}^{b-process-in} \alpha_i^{b-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.9)$$

Procesamiento de arcilla

El flujo de arcilla enviado hacia cada planta de procesamiento se segregará en dos flujos, el primero para la producción de Li_2CO_3 ($f_{r,i,t}^{c-Li_2CO_3-process}$) y el segundo para la producción de LiOH ($f_{r,i,t}^{c-OH-process}$):

$$f_{r,i,t}^{c-process} = f_{r,i,t}^{c-Li_2CO_3-process} + f_{r,i,t}^{c-OH-process}, \quad \forall r, \forall i, \forall t \quad (1.10)$$

El flujo que entra a cada unidad de procesamiento de arcilla concentrada para la producción de Li_2CO_3 ($F_{i,t}^{b-process-in}$) será igual a la suma de los flujos segregados hacia ésta, desde las distintas zonas de producción:

$$F_{i,t}^{c-process-in} = \sum_r f_{r,i,t}^{c-Li_2CO_3-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.11)$$

El flujo que entra a cada unidad de procesamiento de arcilla concentrada para la producción de LiOH ($F_{i,t}^{c-OH-in}$) será igual a la suma de los flujos segregados hacia esta desde las distintas zonas de producción:

$$F_{i,t}^{c-OH-in} = \sum_r f_{r,i,t}^{c-OH-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.12)$$

La producción de Li_2CO_3 a partir de arcilla concentrada ($f_{i,t}^{c-process-out}$) será igual al flujo total de arcilla que entra al procesamiento, multiplicado por un factor que relaciona la eficiencia de producción ($\alpha_i^{c-Li_2CO_3-process}$):

$$f_{i,t}^{c-process-out} = F_{i,t}^{c-process-in} \alpha_i^{c-Li_2CO_3-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.13)$$

La producción de LiOH a partir de arcilla concentrada ($F_{i,t}^{LiOH-clay-produced}$) será igual al flujo total de arcilla que entra al procesamiento, multiplicado por un factor que relaciona la eficiencia de producción ($\alpha_i^{c-Li_2CO_3-process}$):

$$F_{i,t}^{LiOH-clay-produced} = F_{i,t}^{c-OH-in} \alpha_i^{c-OH-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.14)$$

Producción de Na_2SO_4

La producción de Li_2CO_3 a partir de arcilla genera como subproducto Na_2SO_4 ($F_{i,t}^{Na_2SO_4-Li_2CO_3-produced}$) de acuerdo con un factor que relaciona la eficiencia de producción ($\mu_i^{Na_2SO_4-Li_2CO_3}$):

$$F_{i,t}^{Na_2SO_4-Li_2CO_3-produced} = f_{i,t}^{c-process-out} \mu_i^{Na_2SO_4-Li_2CO_3}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.15)$$

La producción de LiOH a partir de arcilla genera como subproducto Na_2SO_4 ($F_{i,t}^{Na_2SO_4-LiOH-produced}$) de acuerdo con un factor que relaciona la eficiencia de producción ($\mu_i^{Na_2SO_4-LiOH}$):

$$F_{i,t}^{Na_2SO_4-LiOH-produced} = F_{i,t}^{LiOH-clay-produced} \mu_i^{Na_2SO_4-LiOH}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.16)$$

Producción de Li_2CO_3 por planta de procesamiento

El flujo de Li_2CO_3 producido por cada planta de procesamiento ($F_{i,t}^{tot-Li_2CO_3-produced}$) será la suma de la producción a partir de arcilla más la producción a partir de salmuera:

$$F_{i,t}^{tot-Li_2CO_3-produced} = f_{i,t}^{b-process-out} + f_{i,t}^{c-process-out}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.17)$$

Balance de Li_2CO_3 dentro de la planta de procesamiento

La suma del flujo de Li_2CO_3 producido por cada planta de procesamiento más las importaciones de este ($f_{k,i,t}^{import-deriv-uses}$) serán igual a la suma del flujo segregado para la

producción de derivados de Li_2CO_3 ($f_{i,t}^{\text{deriv-uses}}$) más el flujo disponible para satisfacer la demanda de los mercados de Li_2CO_3 ($f_{i,t}^{\text{available-LiCO}_3}$):

$$F_{i,t}^{\text{tot-Li}_2\text{CO}_3\text{produced}} + \sum_k f_{k,i,t}^{\text{import-deriv-uses}} = f_{i,t}^{\text{deriv-uses}} + f_{i,t}^{\text{available-LiCO}_3}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.18)$$

Producción de derivados de Li_2CO_3 en planta de procesamiento

El flujo destinado para la producción de derivados de Li_2CO_3 se segregará para la producción de LiBr ($f_{i,t}^{\text{Br-proc-in}}$), LiCl ($f_{i,t}^{\text{Cl-proc-in}}$) y LiOH ($f_{i,t}^{\text{OH-proc-in}}$):

$$f_{i,t}^{\text{deriv-uses}} = f_{i,t}^{\text{Br-proc-in}} + f_{i,t}^{\text{Cl-proc-in}} + f_{i,t}^{\text{OH-proc-in}}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.19)$$

Producción y distribución de LiBr

La producción de LiBr por unidad de producción ($f_{i,t}^{\text{Br-proc-out}}$) será igual al flujo que entra a la misma, multiplicado por un factor que relaciona la eficiencia de la producción ($\delta^{\text{Br-process}}$):

$$f_{i,t}^{\text{Br-proc-out}} = f_{i,t}^{\text{Br-proc-in}} \delta^{\text{Br-process}}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.20)$$

La producción total de LiBr ($F_t^{\text{tot-Br-produced}}$) será igual a la suma de la producción de cada planta de procesamiento:

$$F_t^{\text{tot-Br-produced}} = \sum_i f_{i,t}^{\text{Br-proc-out}}, \quad \forall t \quad (1.21)$$

La producción total de LiBr está sujeta a la demanda existente, por lo tanto, deberá ser menor o igual que la demanda máxima establecida por cada mercado ($f_{q,t}^{\text{Br-max-demand}}$):

$$F_t^{\text{tot-Br-produced}} \leq \sum_q f_{q,t}^{\text{Br-max-demand}}, \quad \forall t \quad (1.22)$$

La producción de LiBr de cada planta de procesamiento se segregará para satisfacer la demanda de los mercados existentes ($f_{i,q,t}^{\text{Br-sent-market}}$):

$$f_{i,t}^{\text{Br-proc-out}} = \sum_q f_{i,q,t}^{\text{Br-sent-market}}, \quad \forall i, t \quad (1.23)$$

La demanda máxima de LiBr de cada mercado se satisfará mediante la suma de los flujos enviados desde cada planta de procesamiento:

$$f_{q,t}^{Br-max-demand} = \sum_i f_{i,q,t}^{Br-sent-market}, \quad \forall q,t \quad (1.24)$$

Producción y distribución de LiCl

La producción de LiCl por unidad de producción ($f_{i,t}^{Cl-proc-out}$) será igual al flujo que entra a la misma, multiplicado por un factor que relaciona la eficiencia de la producción ($\delta^{Cl-process}$):

$$f_{i,t}^{Cl-proc-out} = f_{i,t}^{Cl-proc-in} \delta^{Cl-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.25)$$

La producción total de LiCl ($F_t^{tot-Cl-produced}$) será igual a la suma de la producción de cada planta de procesamiento:

$$F_t^{tot-Cl-produced} = \sum_i f_{i,t}^{Cl-proc-out}, \quad \forall t \quad (1.26)$$

La producción total de LiCl está sujeta a la demanda existente, por lo tanto, deberá ser menor o igual que la demanda máxima establecida por cada mercado ($f_{q,t}^{Cl-max-demand}$):

$$F_t^{tot-Cl-produced} \leq \sum_q f_{q,t}^{Cl-max-demand}, \quad \forall t \quad (1.27)$$

La producción de LiCl de cada planta de procesamiento se segregará para satisfacer la demanda de los mercados existentes ($f_{i,q,t}^{Cl-sent-market}$):

$$f_{i,t}^{Cl-proc-out} = \sum_q f_{i,q,t}^{Cl-sent-market}, \quad \forall i, t \quad (1.28)$$

La demanda máxima de LiCl de cada mercado se satisfará mediante la suma de los flujos enviados desde cada planta de procesamiento :

$$f_{q,t}^{Cl-max-demand} = \sum_i f_{i,q,t}^{Cl-sent-market}, \quad \forall q,t \quad (1.29)$$

Producción y distribución de LiOH

La producción de LiOH por unidad de producción ($f_{i,t}^{OH-proc-out}$) será igual al flujo que entra a la misma, multiplicado por un factor que relaciona la eficiencia de la producción ($\delta^{OH-process}$):

$$f_{i,t}^{OH-proc-out} = f_{i,t}^{OH-proc-in} \delta^{OH-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.30)$$

La producción total de LiOH ($F_t^{tot-OH-produced}$) será igual a la suma de la producción a partir de arcilla ($F_{i,t}^{LiOH-clay-produced}$) más la producción a partir de Li_2CO_3 ($f_{i,t}^{OH-proc-out}$):

$$F_t^{tot-OH-produced} = \sum_i (f_{i,t}^{OH-proc-out} + F_{i,t}^{LiOH-clay-produced}), \quad \forall t \quad (1.31)$$

La producción total de LiOH está sujeta a la demanda existente, por tanto, deberá ser menor o igual que la demanda máxima establecida por cada mercado ($f_{q,t}^{OH-max-demand}$):

$$F_t^{tot-OH-produced} \leq \sum_q f_{q,t}^{OH-max-demand}, \quad \forall t \quad (1.32)$$

La producción de LiOH de cada planta de procesamiento se segregará para satisfacer la demanda de los mercados existentes ($f_{i,q,t}^{OH-sent-market}$):

$$f_{i,t}^{OH-proc-out} + F_{i,t}^{LiOH-clay-produced} = \sum_q f_{i,q,t}^{OH-sent-market}, \quad \forall i,t \quad (1.33)$$

La demanda máxima de LiOH de cada mercado se satisfará mediante la suma de los flujos enviados desde cada planta de procesamiento:

$$f_{q,t}^{OH-max-demand} = \sum_i f_{i,q,t}^{OH-sent-market}, \quad \forall q,t \quad (1.34)$$

Disponibilidad de Li_2CO_3 por planta de procesamiento

El total de Li_2CO_3 disponible proveniente de cada planta de procesamiento se segregará en un flujo destinado para su exportación ($f_{i,t}^{Li_2CO_3-export}$) más el flujo para satisfacer la demanda de los mercados existentes ($f_{i,t}^{direct-uses}$):

$$f_{i,t}^{available-LiCO_3} = f_{i,t}^{Li_2CO_3-export} + f_{i,t}^{direct-uses}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.35)$$

Segregación de Li_2CO_3

El flujo de Li_2CO_3 destinado por cada planta de procesamiento para satisfacer la demanda de los mercados existentes será la suma de los flujos enviados a cada mercado ($f_{i,q,t}^{sent-market}$):

$$f_{i,t}^{direct-uses} = \sum_q f_{i,q,t}^{sent-market}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.36)$$

El flujo de Li_2CO_3 que ingresa a cada mercado será igual a la suma de los flujos provenientes de cada planta de procesamiento, más el flujo proveniente directamente de importación ($f_{k,q,t}^{\text{import-market}}$):

$$f_{q,t}^{\text{tot-market}} = \sum_i f_{i,q,t}^{\text{sent-market}} + \sum_k f_{k,q,t}^{\text{import-market}}, \quad \forall q, \forall t \quad (1.37)$$

El flujo de Li_2CO_3 que ingresa a cada mercado será igual o menor que la demanda máxima de este ($f_{q,t}^{\text{tot-market-demand}}$):

$$f_{q,t}^{\text{tot-market}} \leq f_{q,t}^{\text{tot-market-demand}}, \quad \forall q, \forall t \quad (1.38)$$

Exportaciones de Li_2CO_3

Las exportaciones de Li_2CO_3 ($F_t^{\text{tot-export}}$) serán igual a la suma de los flujos segregados para este fin desde cada planta de procesamiento:

$$F_t^{\text{tot-export}} = \sum_i f_{i,t}^{\text{Li}_2\text{CO}_3\text{-export}}, \quad \forall t \quad (1.39)$$

Las exportaciones de Li_2CO_3 se segregarán a los distintos mercados disponibles ($f_{j,t}^{\text{export}}$):

$$F_t^{\text{tot-export}} = \sum_j f_{j,t}^{\text{export}}, \quad \forall t \quad (1.40)$$

La exportación de Li_2CO_3 destinada para cada mercado será menor o igual que la demanda máxima de este ($f_{j,t}^{\text{max-demand}}$):

$$f_{j,t}^{\text{export}} \leq f_{j,t}^{\text{max-demand}}, \quad \forall j, \forall t \quad (1.41)$$

Importaciones de Li_2CO_3

El total de Li_2CO_3 importado de cada fuente disponible ($f_{k,t}^{\text{import}}$) será la suma de los flujos segregados hacia las plantas de procesamiento ($f_{k,i,t}^{\text{import-deriv-uses}}$) más el flujo enviado directamente para satisfacer la demanda de los mercados ($f_{k,q,t}^{\text{import-market}}$):

$$f_{k,t}^{\text{import}} = \sum_i f_{k,i,t}^{\text{import-deriv-uses}} + \sum_q f_{k,q,t}^{\text{import-market}}, \quad \forall k, \forall t \quad (1.42)$$

Capacidad y existencia de plantas de procesamiento

Procesamiento de Salmuera

La capacidad óptima de las unidades de procesamiento de salmuera ($F_i^{b-process-cap}$) deberá ser mayor o igual que el flujo de entrada a cada unidad ($F_{i,t}^{b-process-in}$). Además, la capacidad óptima deberá ser mayor o igual que un flujo mínimo mismo que hace viable la instalación de la planta ($F_i^{b-min-process}$) y menor o igual que la capacidad máxima de cada unidad ($F_i^{b-max-process-cap}$). Se introduce la variable binaria (y_i^b) para determinar la existencia de dichas unidades de procesamiento:

$$F_i^{b-process-cap} \geq F_{i,t}^{b-process-in}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.43)$$

$$F_i^{b-min-process} y_i^b \leq F_i^{b-process-cap} \leq F_i^{b-max-process-cap} y_i^b, \quad \forall i \quad (1.44)$$

Procesamiento de arcilla para producir Li_2CO_3

La capacidad óptima de las unidades de procesamiento de arcilla para la producción de Li_2CO_3 ($F_i^{c-process-cap}$) deberá ser mayor o igual que el flujo de entrada a cada unidad ($F_{i,t}^{c-process-in}$). Además, la capacidad óptima deberá ser mayor o igual que un flujo mínimo mismo que hace viable la instalación de la planta ($F_i^{c-min-process}$) y menor o igual que la capacidad máxima de cada unidad ($F_i^{c-max-process-cap}$). Se introduce la variable binaria (y_i^c) para determinar la existencia de dichas unidades de procesamiento:

$$F_i^{c-process-cap} \geq F_{i,t}^{c-process-in}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.45)$$

$$F_i^{c-min-process} y_i^c \leq F_i^{c-process-cap} \leq F_i^{c-max-process-cap} y_i^c, \quad \forall i \quad (1.46)$$

Procesamiento de arcilla para producir LiOH

La capacidad óptima de las unidades de procesamiento de arcilla para la producción de LiOH ($F_i^{c-OH-process-cap}$) deberá ser mayor o igual que el flujo de entrada a cada unidad ($F_{i,t}^{c-OH-in}$). Además, la capacidad óptima deberá ser mayor o igual que un flujo mínimo mismo que hace viable la instalación de la planta ($F_i^{c-OH-min-process}$) y menor o igual que la

capacidad máxima de cada unidad ($F_i^{c-OH-max-process-cap}$). Se introduce la variable binaria (y_i^{c-OH}) para determinar la existencia de dichas unidades de procesamiento:

$$F_i^{c-OH-process-cap} \geq F_{i,t}^{c-OH-in}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.47)$$

$$F_i^{c-OH-min-process} y_i^{c-OH} \leq F_i^{c-OH-process-cap} \leq F_i^{c-OH-max-process-cap} y_i^{c-OH}, \quad \forall i \quad (1.48)$$

Procesamiento de derivados de Li_2CO_3

Producción de LiBr

La capacidad óptima de las unidades de producción de LiBr ($F_i^{Br-process-cap}$) deberá ser mayor o igual que el flujo de entrada a cada unidad ($f_{i,t}^{Br-proc-in}$). Además, la capacidad óptima deberá ser mayor o igual que un flujo mínimo mismo que hace viable la instalación de la planta ($F_i^{Br-min-process}$) y menor o igual que la capacidad máxima de cada unidad ($F_i^{Br-max-process}$). Se introduce la variable binaria (y_i^{Br}) para determinar la existencia de dichas unidades de producción:

$$F_i^{Br-process-cap} \geq f_{i,t}^{Br-proc-in}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.49)$$

$$F_i^{Br-min-process} y_i^{Br} \leq F_i^{Br-process-cap} \leq F_i^{Br-max-process} y_i^{Br}, \quad \forall i \quad (1.50)$$

Producción de LiCl

La capacidad óptima de las unidades de producción de LiCl ($F_i^{Cl-process-cap}$) deberá ser mayor o igual que el flujo de entrada a cada unidad ($f_{i,t}^{Cl-proc-in}$). Además, la capacidad óptima deberá ser mayor o igual que un flujo mínimo mismo que hace viable la instalación de la planta ($F_i^{Cl-min-process}$) y menor o igual que la capacidad máxima de cada unidad ($F_i^{Cl-max-process}$). Se introduce la variable binaria (y_i^{Cl}) para determinar la existencia de dichas unidades de producción:

$$F_i^{Cl-process-cap} \geq f_{i,t}^{Cl-proc-in}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.51)$$

$$F_i^{Cl-min-process} y_i^{Cl} \leq F_i^{Cl-process-cap} \leq F_i^{Cl-max-process} y_i^{Cl}, \quad \forall i \quad (1.52)$$

Producción de LiOH

La capacidad óptima de las unidades de producción de LiOH ($F_i^{OH-process-cap}$) deberá ser mayor o igual que el flujo de entrada a cada unidad ($f_{i,t}^{OH-proc-in}$). Además, la capacidad óptima deberá ser mayor o igual que un flujo mínimo mismo que hace viable la instalación de la planta ($F_i^{OH-min-process}$) y menor o igual que la capacidad máxima de cada unidad ($F_i^{OH-max-process}$). Se introduce la variable binaria (y_i^{OH}) para determinar la existencia de dichas unidades de producción:

$$F_i^{OH-process-cap} \geq f_{i,t}^{OH-proc-in}, \quad \forall i, \forall t \quad (1.53)$$

$$F_i^{OH-min-process} y_i^{OH} \leq F_i^{OH-process-cap} \leq F_i^{OH-max-process} y_i^{OH}, \quad \forall i \quad (1.54)$$

Costos de capital

Unidades de procesamiento de salmuera concentrada

El costo de capital asociado a cada unidad de procesamiento de salmuera concentrada ($CapCost_i^{b-process}$) está dado por un factor de anualidad (k_F), costo unitario fijo ($FC_i^{b-process}$) y variable ($VC_i^{b-process}$), la capacidad óptima ($F_i^{b-process-cap}$) y un exponente con el que se consideran las economías de escala ($\beta^{b-process}$):

$$CapCost_i^{b-process} = k_F \left[FC_i^{b-process} y_i^b + VC_i^{b-process} \left(F_i^{b-process-cap} \right)^{\beta^{b-process}} \right], \quad \forall i \quad (1.55)$$

Unidades de procesamiento de arcilla para la producción de Li_2CO_3

El costo de capital asociado a cada unidad de procesamiento de arcilla para la producción de Li_2CO_3 ($CapCost_i^{c-process}$) está dado por un factor de anualidad (k_F), costo unitario fijo ($FC_i^{c-process}$) y variable ($VC_i^{c-process}$), la capacidad óptima ($F_i^{c-process-cap}$) y un exponente con el que se consideran las economías de escala ($\beta^{c-process}$):

$$CapCost_i^{c-process} = k_F \left[FC_i^{c-process} y_i^c + VC_i^{c-process} \left(F_i^{c-process-cap} \right)^{\beta^{c-process}} \right], \quad \forall i \quad (1.56)$$

Unidades de procesamiento de arcilla para la producción de LiOH

El costo de capital asociado a cada unidad de procesamiento de arcilla para la producción de LiOH ($CapCost_i^{c-OH-process}$) está dado por un factor de anualidad (k_F), costo unitario fijo ($FC_i^{c-OH-process}$) y variable ($VC_i^{c-OH-process}$), la capacidad óptima ($F_i^{c-OH-process-cap}$) y un exponente con el que se consideran las economías de escala ($\beta^{c-OH-process}$):

$$CapCost_i^{c-OH-process} = k_F \left[FC_i^{c-OH-process} y_i^{c-OH} + VC_i^{c-OH-process} \left(F_i^{c-OH-process-cap} \right)^{\beta^{c-OH-process}} \right], \quad \forall i \quad (1.57)$$

Unidades de producción de LiBr

El costo de capital asociado a cada unidad de producción de LiBr ($CapCost_i^{Br-process}$) está dado por un factor de anualización (k_F), costo unitario fijo ($FC_i^{Br-process}$) y variable ($VC_i^{Br-process}$), la capacidad óptima ($F_i^{Br-process-cap}$) y un exponente con el que se consideran las economías de escala ($\beta^{Br-process}$):

$$CapCost_i^{Br-process} = k_F \left[FC_i^{Br-process} y_i^{Br} + VC_i^{Br-process} \left(F_i^{Br-process-cap} \right)^{\beta^{Br-process}} \right], \quad \forall i \quad (1.58)$$

Unidades de producción de LiCl

El costo de capital asociado a cada unidad de producción de LiCl ($CapCost_i^{Cl-process}$) está dado por un factor de anualización (k_F), costo unitario fijo ($FC_i^{Cl-process}$) y variable ($VC_i^{Cl-process}$), la capacidad óptima ($F_i^{Cl-process-cap}$) y un exponente con el que se consideran las economías de escala ($\beta^{Cl-process}$):

$$CapCost_i^{Cl-process} = k_F \left[FC_i^{Cl-process} y_i^{Cl} + VC_i^{Cl-process} \left(F_i^{Cl-process-cap} \right)^{\beta^{Cl-process}} \right], \quad \forall i \quad (1.59)$$

Unidades de producción de LiOH

El costo de capital asociado a cada unidad de producción de LiOH a partir de Li_2CO_3 ($\text{CapCost}_i^{\text{OH-process}}$) está dado por un factor de anualización (k_F), costo unitario fijo ($\text{FC}_i^{\text{OH-process}}$) y variable ($\text{VC}_i^{\text{OH-process}}$), la capacidad óptima ($F_i^{\text{OH-process-cap}}$) y un exponente con el que se consideran las economías de escala ($\beta^{\text{OH-process}}$):

$$\text{CapCost}_i^{\text{OH-process}} = k_F \left[\text{FC}_i^{\text{OH-process}} y_i^{\text{OH}} + \text{VC}_i^{\text{OH-process}} \left(F_i^{\text{OH-process-cap}} \right)^{\beta^{\text{OH-process}}} \right], \quad \forall i \quad (1.60)$$

Costo total de planta de procesamiento

El costo total de cada planta de procesamiento ($\text{CapCost}_i^{\text{process-plant}}$) está dado por la suma de los costos de las unidades que se encuentran asociadas a la misma:

$$\text{CapCost}_i^{\text{process-plant}} = \left[\begin{array}{l} \text{CapCost}_i^{b\text{-process}} + \text{CapCost}_i^{c\text{-process}} \\ + \text{CapCost}_i^{c\text{-OH-process}} + \text{CapCost}_i^{\text{Br-process}} \\ + \text{CapCost}_i^{\text{Cl-process}} + \text{CapCost}_i^{\text{OH-process}} \end{array} \right], \quad \forall i \quad (1.61)$$

Costo total de capital

El costo total de capital (TCC) será la suma de los costos de capital de cada planta de procesamiento:

$$TCC = \sum_i \text{CapCost}_i^{\text{process-plant}} \quad (1.62)$$

Costos de operación

Costos de Transporte

Transporte zonas de producción de salmuera-plantas de procesamiento

El costo de transporte del material producido en las zonas de extracción de salmuera hacia las plantas de procesamiento ($\text{Cost}^{\text{trans-brine-pp}}$) será la suma del flujo producido ($f_{s,i,t}^{b\text{-process}}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($\text{UTC}_{s,i}^{\text{trans-brine}}$):

$$\text{Cost}^{\text{trans-brine-pp}} = \sum_s \sum_i \sum_t \text{UTC}_{s,i}^{\text{trans-brine}} f_{s,i,t}^{b\text{-process}} \quad (1.63)$$

Transporte zonas de producción de arcilla-plantas de procesamiento

El costo de transporte del material producido en las zonas de extracción de arcilla hacia las plantas de procesamiento ($Cost^{trans-clay-pp}$) será la suma del flujo producido ($f_{r,i,t}^{c-process}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($UTC_{r,i}^{trans-clay}$):

$$Cost^{trans-clay-pp} = \sum_r \sum_i \sum_t UTC_{r,i}^{trans-clay} f_{r,i,t}^{c-process} \quad (1.64)$$

Transporte LiBr plantas de procesamiento-mercados

El costo de transporte del LiBr producido en las plantas de procesamiento hacia los mercados ($Cost^{trans-Br-pp-market}$) será la suma del flujo producido ($f_{i,t}^{Br-proc-out}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($UTC_{i,q}^{trans-Br}$):

$$Cost^{trans-Br-pp-market} = \sum_i \sum_q \sum_t UTC_{i,q}^{trans-Br} f_{i,t}^{Br-proc-out} \quad (1.65)$$

Transporte LiCl plantas de procesamiento-mercados

El costo de transporte del LiCl producido en las plantas de procesamiento hacia los mercados ($Cost^{trans-Cl-pp-market}$) será la suma del flujo producido ($f_{i,t}^{Cl-proc-out}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($UTC_{i,q}^{trans-Cl}$):

$$Cost^{trans-Cl-pp-market} = \sum_i \sum_q \sum_t UTC_{i,q}^{trans-Cl} f_{i,t}^{Cl-proc-out} \quad (1.66)$$

Transporte LiOH plantas de procesamiento-mercados

El costo de transporte del LiOH producido en las plantas de procesamiento hacia los mercados ($Cost^{trans-OH-pp-market}$) será la suma del flujo producido ($f_{i,t}^{OH-proc-out} + F_{i,t}^{LiOH-clay-produced}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($UTC_{i,q}^{trans-OH}$):

$$Cost^{trans-OH-pp-market} = \sum_i \sum_q \sum_t UTC_{i,q}^{trans-OH} \left(f_{i,t}^{OH-proc-out} + F_{i,t}^{LiOH-clay-produced} \right) \quad (1.67)$$

Transporte Li_2CO_3 plantas de procesamiento-mercados

El costo de transporte del Li_2CO_3 producido en las plantas de procesamiento hacia los mercados ($Cost^{trans-\text{Li}_2\text{CO}_3-pp-market}$) será la suma del flujo enviado para cada mercado ($f_{i,q,t}^{sent-market}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($UTC_{i,q}^{trans-\text{Li}_2\text{CO}_3}$):

$$Cost^{trans-\text{Li}_2\text{CO}_3-pp-market} = \sum_i \sum_q \sum_t UTC_{i,q}^{trans-\text{Li}_2\text{CO}_3} f_{i,q,t}^{sent-market} \quad (1.68)$$

Transporte Li_2CO_3 plantas de procesamiento-exportación

El costo de transporte del Li_2CO_3 producido en las plantas de procesamiento hacia los mercados ($Cost^{trans-\text{Li}_2\text{CO}_3-export}$) será la suma del flujo enviado para cada mercado de exportación ($f_{j,t}^{export}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($UTC_{i,j}^{trans-\text{Li}_2\text{CO}_3-export}$):

$$Cost^{trans-\text{Li}_2\text{CO}_3-export} = \sum_i \sum_j \sum_t UTC_{i,j}^{trans-\text{Li}_2\text{CO}_3-export} f_{j,t}^{export} \quad (1.69)$$

Costos totales de transporte

El costo total de transporte (TTC) será la suma de las expresiones anteriores (1.63-1.69):

$$TTC = \left[\begin{array}{l} Cost^{trans-brine-pp} + Cost^{trans-clay-pp} + Cost^{trans-Br-pp-market} \\ + Cost^{trans-Cl-pp-market} + Cost^{trans-OH-pp-market} \\ + Cost^{trans-\text{Li}_2\text{CO}_3-pp-market} + Cost^{trans-\text{Li}_2\text{CO}_3-export} \end{array} \right] \quad (1.70)$$

Costos de extracción

Extracción de salmuera

Los costos asociados a la extracción de la salmuera virgen ($Cost^{b-ext}$) son correspondientes al precio unitario de extracción de esta que usualmente es pagado al gobierno (UP^{b-ext}) multiplicado por el flujo extraído ($F_{s,t}^{b-prod}$):

$$Cost^{b-ext} = UP^{b-ext} F_{s,t}^{b-prod} \quad (1.71)$$

Extracción de arcilla

Los costos asociados a la extracción de la arcilla ($Cost^{c-ext}$) son correspondientes al precio unitario de extracción de esta que usualmente es pagado al gobierno (UP^{c-ext}) multiplicado por el flujo extraído ($F_{r,t}^{c-prod}$):

$$Cost^{c-ext} = UP^{c-ext} F_{r,t}^{c-prod} \quad (1.72)$$

Costos operativos

Costo de operación de unidades de procesamiento de salmuera concentrada

El costo de operación de las unidades de procesamiento de salmuera concentrada ($Cost^{op-b-process}$) será la suma del flujo que entra multiplicado por su costo unitario de operación ($UOC_i^{b-process}$) más el flujo de agua requerido para la producción ($F_{i,t}^{b-water-req}$) multiplicado por el costo de esta ($UP^{water-pp}$):

$$Cost^{op-b-process} = \sum_i \sum_t (UOC_i^{b-process} F_{i,t}^{b-process-in} + UP^{water-pp} F_{i,t}^{b-water-req}) \quad (1.73)$$

Costo de operación de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producción de Li_2CO_3

El costo de operación de las unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producir Li_2CO_3 ($Cost^{op-c-process}$) será la suma del flujo que entra multiplicado por su costo unitario de operación ($UOC_i^{c-process}$) más el flujo de agua requerido para la producción ($F_{i,t}^{c-water-req}$) multiplicado por el costo de esta ($UP^{water-pp}$):

$$Cost^{op-c-process} = \sum_i \sum_t (UOC_i^{c-process} F_{i,t}^{c-process-in} + UP^{water-pp} F_{i,t}^{c-water-req}) \quad (1.74)$$

Costo de operación de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producción de $LiOH$

El costo de operación de las unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producir $LiOH$ ($Cost^{op-c-OH-process}$) será la suma del flujo que entra multiplicado por su costo

unitario de operación ($UOC_i^{c-OH-process}$) más el flujo de agua requerido para la producción ($F^{c-OH-water-req}$) multiplicado por el costo de esta ($UP^{water-pp}$):

$$Cost^{op-c-OH-process} = \sum_i \sum_t (UOC_i^{c-OH-process} F_{i,t}^{c-OH-in} + UP^{water-pp} F^{c-OH-water-req}) \quad (1.75)$$

Costo de operación de unidades de producción de LiBr

El costo de operación de las unidades de producción de LiBr ($Cost^{op-Br-process}$) será la suma del flujo que entra a las mismas por su costo unitario de operación ($UOC_i^{Br-process}$):

$$Cost^{op-Br-process} = \sum_i \sum_t UOC_i^{Br-process} f_{i,t}^{Br-proc-in} \quad (1.76)$$

Costo de operación de unidades de producción de LiCl

El costo de operación de las unidades de producción de LiCl ($Cost^{op-Cl-process}$) será la suma del flujo que entra a las mismas por su costo unitario de operación ($UOC_i^{Cl-process}$):

$$Cost^{op-Cl-process} = \sum_i \sum_t UOC_i^{Cl-process} f_{i,t}^{Cl-proc-in} \quad (1.77)$$

Costo de operación de unidades de producción de LiOH a partir de Li₂CO₃

El costo de operación de las unidades de producción de LiOH a partir de Li₂CO₃ ($Cost^{op-OH-process}$) será la suma del flujo que entra a las mismas por su costo unitario de operación ($UOC_i^{OH-process}$):

$$Cost^{op-OH-process} = \sum_i \sum_t UOC_i^{OH-process} f_{i,t}^{OH-proc-in} \quad (1.78)$$

Costo total de operación de plantas de procesamiento

El costo total correspondiente a la operación de las plantas de procesamiento ($TOPC$) será la suma de las expresiones anteriores (1.71-1.78):

$$TOPC = \left[\begin{array}{l} Cost^{b-ext} + Cost^{c-ext} + Cost^{op-b-process} \\ + Cost^{op-c-process} + Cost^{op-c-OH-process} + Cost^{op-Br-process} \\ + Cost^{op-Cl-process} + Cost^{op-OH-process} \end{array} \right] \quad (1.79)$$

Costos de importación

El costo de importación (TIC) será igual a la sumatoria del total importado, multiplicado por el costo unitario, asociado a la fuente y a la estacionalidad ($UC_{k,t}$):

$$TIC = \sum_k \sum_t UC_{k,t} f_{k,t}^{import} \quad (1.80)$$

Costo total de operación

El costo total (TOC) de operación será la suma de los costos de transporte, operación de plantas de procesamiento e importación:

$$TOC = TTC + TOPC + TIC \quad (1.81)$$

Ingresos

Venta de derivados de Li_2CO_3

Venta de $LiBr$

Los ingresos generados con la venta de $LiBr$ ($Sales^{Br}$) serán el total producido ($F_t^{tot-Br-produced}$) multiplicado por el precio unitario de venta, mismo que está asociado a la estacionalidad (UP_t^{Br}):

$$Sales^{Br} = \sum_t UP_t^{Br} F_t^{tot-Br-produced} \quad (1.82)$$

Venta de $LiCl$

Los ingresos generados con la venta de $LiCl$ ($Sales^{Cl}$) serán el total producido ($F_t^{tot-Cl-produced}$) multiplicado por el precio unitario de venta, mismo que está asociado a la estacionalidad (UP_t^{Cl}):

$$Sales^{Cl} = \sum_t UP_t^{Cl} F_t^{tot-Cl-produced} \quad (1.83)$$

Venta de $LiOH$

Los ingresos generados con la venta de $LiCl$ ($Sales^{OH}$) serán el total producido ($F_t^{tot-OH-produced}$) multiplicado por el precio unitario de venta, mismo que está asociado a la estacionalidad (UP_t^{OH}):

$$Sales^{OH} = \sum_t UP_t^{OH} F_t^{tot-OH-produced} \quad (1.84)$$

Venta de Li₂CO₃ a mercados nacionales

Los ingresos generados por la venta de Li₂CO₃ a los mercados nacionales ($Sales^{direct-uses}$) serán la suma de los flujos segregados para cada uno de los mercados ($f_{i,t}^{direct-uses}$) multiplicado por su costo unitario en el que considera la estacionalidad ($UP_{q,t}^{Li_2CO_3}$):

$$Sales^{direct-uses} = \sum_i \sum_q \sum_t UP_{q,t}^{Li_2CO_3} f_{i,q,t}^{sent-market} \quad (1.85)$$

Venta de Li₂CO₃ para exportación

Los ingresos generados por la venta de Li₂CO₃ para su exportación ($Sales^{Li_2CO_3-export}$) serán la suma de los flujos segregados para cada uno de los mercados ($f_{j,t}^{export}$) multiplicado por su costo unitario en el que considera la estacionalidad ($UP_{j,t}^{Li_2CO_3}$):

$$Sales^{Li_2CO_3-export} = \sum_j \sum_t UP_{j,t}^{Li_2CO_3} f_{j,t}^{export} \quad (1.86)$$

Venta de materia prima a exportación

Los ingresos generados por la venta de materia prima (salmuera y arcilla) para su procesamiento externo ($Sales^{m-export}$) serán igual al flujo destinado a exportar, multiplicado por la diferencia entre el precio unitario de venta y el costo unitario de transporte, mismos que se encuentran en función de la estacionalidad.

$$Sales^{m-export} = \sum_t \left[\sum_s F_{s,t}^{b-export} (UP_{s,t}^b - UTC_{s,t}^b) + \sum_r F_{r,t}^{c-export} (UP_{r,t}^c - UTC_{r,t}^c) \right] \quad (1.87)$$

Venta de subproductos obtenidos

Venta de potasa

Los ingresos generados por las ventas de potasa ($Sales^{potash}$) será la suma del flujo producido ($F^{Potash-produced}$) multiplicado por el precio unitario de la misma (UP_t^{potash}):

$$Sales^{potash} = \sum_s \sum_t UP_t^{potash} F_{s,t}^{Potash-produced} \quad (1.88)$$

Venta de Na_2SO_4

Los ingresos generados por las ventas de Na_2SO_4 ($Sales^{Na_2SO_4}$) será la suma del flujo producido ($F_{i,t}^{Na_2SO_4-Li_2CO_3-produced} + F_{i,t}^{Na_2SO_4-LiOH-produced}$) multiplicado por el precio unitario del mismo ($UP_t^{Na_2SO_4}$):

$$Sales^{Na_2SO_4} = \sum_i \sum_t UP_t^{Na_2SO_4} (F_{i,t}^{Na_2SO_4-Li_2CO_3-produced} + F_{i,t}^{Na_2SO_4-LiOH-produced}) \quad (1.89)$$

Ingresos totales

Los ingresos generados por el total de ventas (TS) serán la suma de las expresiones anteriores (1.82-1.89):

$$TS = \left[\begin{array}{l} Sales^{Br} + Sales^{Cl} + Sales^{OH} + Sales^{direct-uses} \\ + Sales^{export} + Sales^{rm-export} + Sales^{potash} + Sales^{Na_2SO_4} \end{array} \right] \quad (1.90)$$

Requerimientos de agua

El flujo total de agua requerido para cada planta de procesamiento ($F^{water-in-pp}$) será igual a la suma del flujo requerido por la producción de Li_2CO_3 a partir de arcilla ($F_{i,t}^{c-water-req}$) y de salmuera ($F_{i,t}^{b-water-req}$) más el requerido por la producción de $LiOH$ a partir de arcilla ($F^{c-OH-water-req}$):

$$F^{water-in-pp} = F_{i,t}^{c-water-req} + F_{i,t}^{b-water-req} + F^{c-OH-water-req} \quad (1.91)$$

Requerimientos de agua para producción de Li_2CO_3 a partir de arcilla

El agua requerida para la producción de Li_2CO_3 a partir de arcilla ($F_{i,t}^{c-water-req}$) está en función de la producción de este ($f_{i,t}^{c-process-out}$) multiplicado por un factor que relaciona la cantidad de agua necesaria ($\phi^{c-water}$):

$$F_{i,t}^{c-water-req} = f_{i,t}^{c-process-out} \varphi^{c-water} \quad (1.92)$$

Requerimientos de agua para producción de Li_2CO_3 a partir de salmuera

El agua requerida para la producción de Li_2CO_3 a partir de salmuera ($F_{i,t}^{b-water-req}$) está en función de la producción de este ($f_{i,t}^{b-process-out}$) multiplicado por un factor que relaciona la cantidad de agua necesaria ($\varphi^{b-water}$):

$$F_{i,t}^{b-water-req} = f_{i,t}^{b-process-out} \varphi^{b-water} \quad (1.93)$$

Requerimientos de agua para producción de LiOH a partir de arcilla

El agua requerida para la producción de Li_2CO_3 a partir de arcilla ($F^{c-OH-water-req}$) está en función de la producción de este ($F_{i,t}^{LiOH-clay-produced}$) multiplicado por un factor que relaciona la cantidad de agua necesaria ($\varphi^{c-OH-water}$):

$$F^{c-OH-water-req} = F_{i,t}^{LiOH-clay-produced} \varphi^{c-OH-water} \quad (1.94)$$

Función objetivo

Ganancias totales

Las ganancias totales del proyecto (TP) serán el total generado por las ventas (TS) menos los costos totales de operación (TOC) y costos de capital (TCC):

$$TP = TS - TOC - TCC \quad (1.95)$$

3.3 Escenario I

El caso de estudio examinado en este proyecto se fundamenta en la información proporcionada por el SGM acerca de posibles sitios para la extracción de litio, tanto a través de arcilla como de salmuera. En este contexto, se identificarán cinco áreas para la extracción de cada una de estas fuentes. En este escenario se contempla que la concentración de la salmuera virgen sea mediante el proceso tradicional, es decir mediante evaporación solar. Las ubicaciones específicas seleccionadas se muestran a detalle en la **Figura 3.2**.

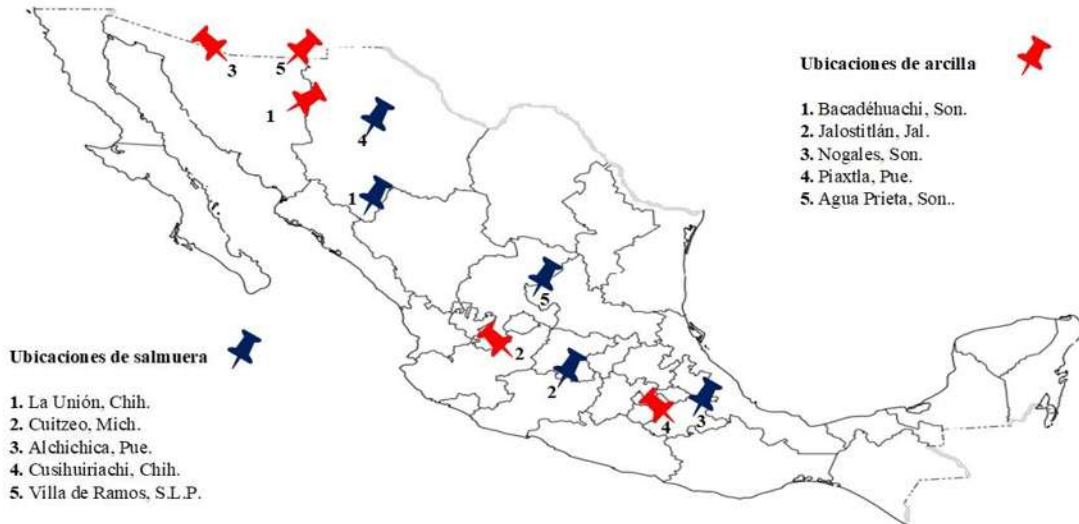


Figura 3.2 Caso de estudio analizado.

Por su parte, también se selecciona la ubicación de cuatro mercados que demandan Li_2CO_3 , LiOH , LiBr y LiCl , además de 10 posibles localizaciones de plantas de procesamiento donde se producirán estos compuestos. Es importante mencionar que cada una de las plantas de procesamiento tienen la capacidad de instalar las siguientes tecnologías: procesamiento de salmuera concentrada, procesamiento de arcilla concentrada para la producción de Li_2CO_3 y LiOH , y la producción de LiBr , LiCl y LiOH a partir de Li_2CO_3 . La **Figura 3.3** representa de manera esquemática el escenario analizado.



Figura 3.3 Representación de caso de estudio.

3.4 Resultados y discusión de escenario I

Para dar solución al escenario I se utilizaron los datos presentados en el apéndice I. Una vez que se aplica la metodología propuesta en este capítulo con los datos necesarios, se analizan diferentes casos (A1-D1) que muestran diferentes niveles de demanda en los mercados nacionales, con el objetivo de ampliar el análisis de los resultados. En el escenario A1, se contempla la demanda actual de compuestos de litio en México; el escenario B1 contempla un aumento mínimo en la demanda, llegando a 100,000 ton de compuestos de litio al año debido a la instalación de nuevas industrias que requieran este tipo de compuestos. En los escenarios C1 y D1 se proyecta una demanda de 150,000 ton al año. La diferencia entre estos últimos radica en que en el escenario D1 se realiza un ajuste de precios de venta de Li_2CO_3 con el fin de cubrir el 100% de los requisitos de demanda. Además, se considera el porcentaje de cada componente con respecto a la demanda total de 71, 24, 2.5 y 2.5% para el Li_2CO_3 , LiOH , LiBr y LiCl , respectivamente de acuerdo con lo reportado por la Comisión Chilena del Cobre (2020) previamente.

Caso A1

El caso A1 muestra una demanda interna de 600 toneladas al año, cifra que corresponde a una estimación precisa. Los resultados de este escenario se muestran en la **Figura 3.4:**

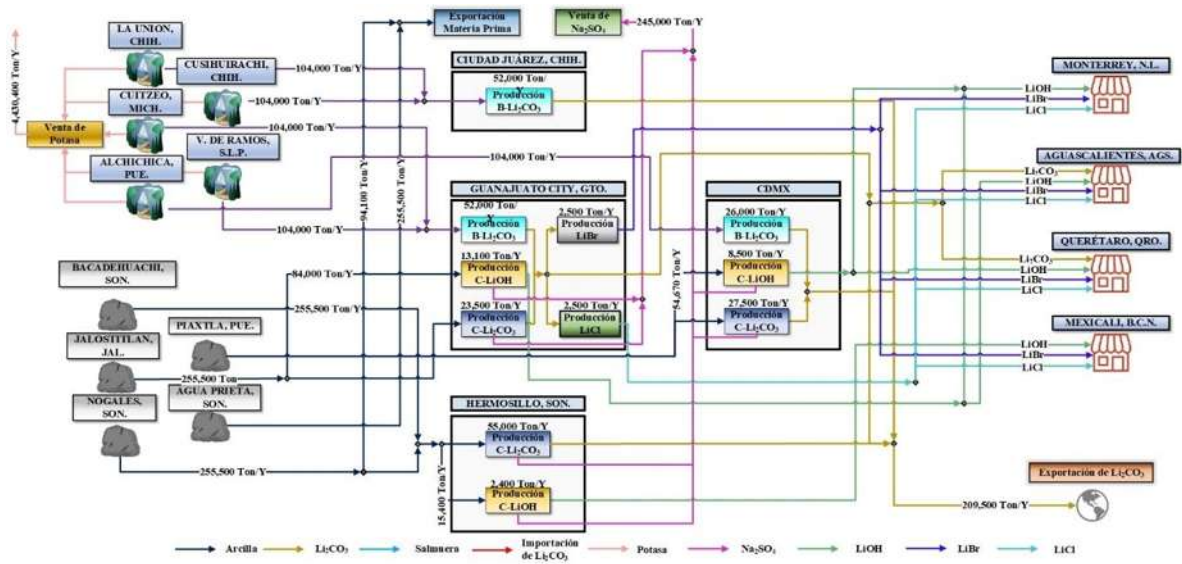


Figura 3.5 Solución al caso B1 del Escenario I.

Además, en la **Figura 3.5** se puede observar cómo en contraste con la solución al caso A1, ahora si se producen los derivados LiBr y LiCl. Además, la demanda de LiOH se satisface únicamente de la producción a partir de arcilla. En este sentido, se satisface completamente la demanda de LiBr, LiCl y LiOH para todos los mercados, sin embargo, la demanda de Li₂CO₃, no se satisface ni Monterrey ni en Mexicali. Es importante destacar la disminución en la exportación de Li₂CO₃, debido al aumento de la demanda nacional.

Caso C1

El caso C1 muestra un incremento en la demanda interna a 150,000 toneladas al año, cifra que corresponde a una estimación esperada. Los resultados de este escenario se muestran en la **Figura 3.6** mostrada a continuación:

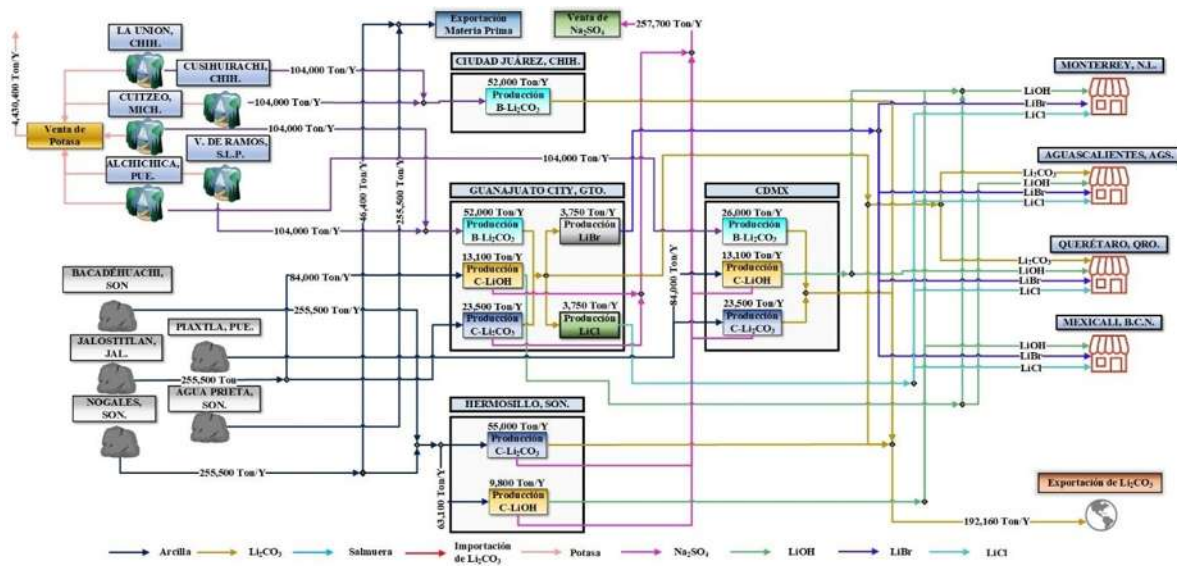


Figura 3.6 Solución al caso C1 del Escenario I.

La resolución para el caso C1 guarda mucha similitud con la del caso B1, siendo las únicas diferencias las capacidades de producción de las plantas de procesamiento. No obstante, persiste la falta de suministro de Li₂CO₃ para Monterrey y Mexicali. Al analizar detenidamente la solución, se observa que la demanda de estos mercados no se satisface debido a los costos de transporte asociados con la distancia. Por consiguiente, se plantea el caso D1 como propuesta para solucionar esta problemática.

Caso D1

El caso D1 mantiene la misma demanda que el caso C1, es decir, 150,000 toneladas al año. Sin embargo, para asegurar la completa satisfacción de las necesidades de Li₂CO₃ en Monterrey y Mexicali, se efectúa una modificación en el precio de venta de Li₂CO₃ correspondiente a 2.61 y 2.06 % respectivamente. Este ajuste en el costo de venta permitirá cubrir los gastos relacionados con el transporte hacia su destino final. La **Figura 3.7** muestra las interacciones requeridas para alcanzar el suministro total de compuestos de litio.

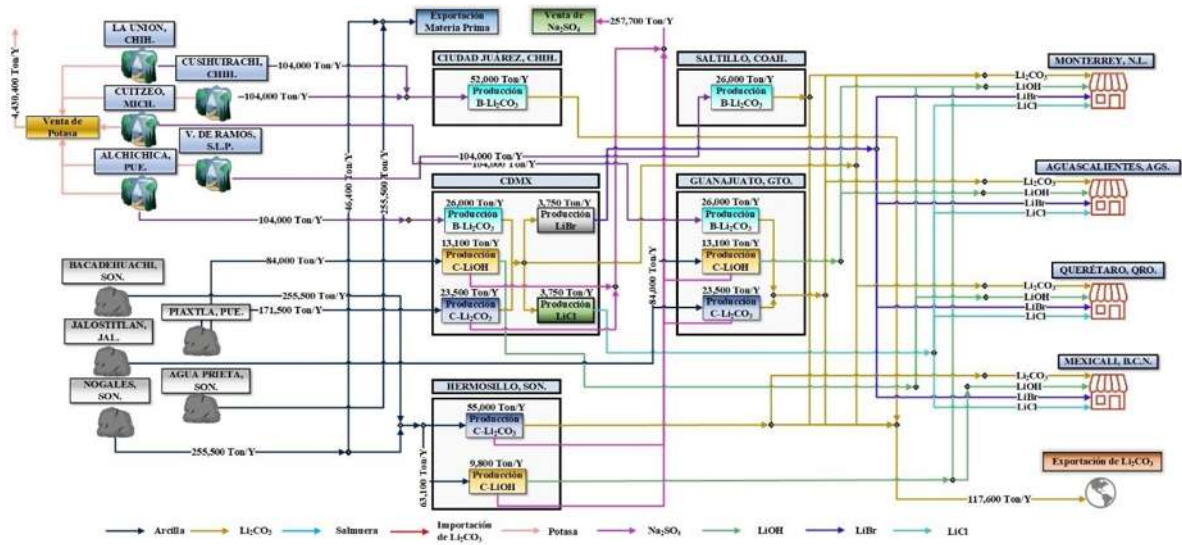


Figura 3.7 Solución al caso D1 del Escenario I.

Además, es importante mencionar que a diferencia de los casos anteriores donde la producción de LiBr y LiCl se efectúa en la planta de procesamiento de Guanajuato, en este caso, la producción de estos compuestos se traslada a la planta de la CDMX. Además, las capacidades de producción se mantienen similares al escenario C1.

Análisis global de Escenario I

Con el propósito de efectuar una comparación directa entre los casos A1-D1, se lleva a cabo el siguiente análisis global. La elección de las instalaciones de procesamiento designadas por el modelo y las tecnologías incorporadas, se presenta la **Tabla 3.1**.

En la **Tabla 3.2** se detallan las capacidades óptimas de cada tecnología identificadas por el modelo, además de las cantidades de materia prima y Li₂CO₃ exportadas para cada caso. Es importante destacar que la exportación de disminuye un 38% en el caso D1 con respecto al caso C1. Esta disminución se debe al hecho de que en el escenario D1 se satisface por completo la demanda de Li₂CO₃.

Tabla 3.1 Plantas de procesamiento y tecnologías seleccionadas en Escenario I.

Unidades de Procesamiento	Casos Escenario I			
	A	B	C	D
Salmuera Concentrada	<ul style="list-style-type: none"> • CDMX • Guanajuato • C. Juárez 	<ul style="list-style-type: none"> • CDMX • Guanajuato • C. Juárez 	<ul style="list-style-type: none"> • CDMX • Guanajuato • C. Juárez 	<ul style="list-style-type: none"> • CDMX • Guanajuato • C. Juárez • Saltillo
Arcilla-Li ₂ CO ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato
Arcilla-LiOH	<ul style="list-style-type: none"> • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato
Li ₂ CO ₃ -LiBr	--	<ul style="list-style-type: none"> • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • CDMX
Li ₂ CO ₃ -LiCl	--	<ul style="list-style-type: none"> • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • CDMX
Li ₂ CO ₃ -LiOH	--	--	--	--

Tabla 2.2 Capacidades óptimas de Escenario I.

Concepto	Caso A1	Caso B1	Caso C1	Caso D1
Demanda Nacional (ton/ Año)	600	100,000	150,000	150,000
Capacidades Óptimas				
Plantas de Procesamiento de Salmuera (ton/año)				
CDMX	26,000	26,000	26,000	26,000
Guanajuato	52,000	52,000	52,000	26,000
Ciudad Juárez	52,000	52,000	52,000	52,000
Saltillo	--	--	--	26,000
Producción total	130,000	130,000	130,000	130,000
Plantas de Procesamiento de Arcilla-Li₂CO₃ (ton/año)				
Hermosillo	55,000	55,000	55,000	55,000
CDMX	35,000	27,500	23,500	23,500
Guanajuato	34,900	23,500	23,500	23,500
Producción total	124,900	106,000	102,000	102,000
Plantas de Procesamiento de Arcilla-LiOH (ton/año)				
Hermosillo	--	2,400	9,800	9,800
CDMX	--	8,500	13,100	13,100
Guanajuato	144	13,100	13,100	13,100
Producción total	144	24,000	36,000	36,000
Plantas de Producción de LiBr y LiCl (ton/año)				
Guanajuato				
Producción de LiBr	--	2,500	3,750	--
Producción de LiCl	--	2,500	3,750	--
CDMX				
Producción de LiBr	--	--	--	3,750
Producción de LiCl	--	--	--	3,750
Producción total	--	5,000	7,500	7,500
Exportación de Arcilla (ton/año)	365,000	349,500	301,900	301,900
Exportación de Li ₂ CO ₃ (ton/año)	254,750	209,500	192,160	117,600

En este sentido, en la **Tabla 3.3** se encuentran desglosados los costos de transporte de cada ruta, junto con los costos operativos y de capital, además de los ingresos generados por las ventas. La función objetivo, que representa las ganancias aumenta un 6.24 % del caso B1 al A1, y un incremento del 2.84 % del caso C1 con respecto al B1. Por otro lado, el caso D1 muestra un aumento del 0.36 % con respecto al C1. Sin embargo, es relevante resaltar que en el escenario D1 se logra satisfacer la demanda de todos los compuestos de litio al 100%.

Por su parte, la cantidad de recursos hídricos necesarios para la producción es consistente en todos los casos asciende a las 260,000 ton de agua/año debido a que la producción es uniforme en cada caso, lo que varía es la exportación de Li_2CO_3 .

Tabla 3.3 Desglose de costos e ingresos en Escenario I.

Concepto	Caso A1	Caso B1	Caso C1	Caso D1
Costos de Transporte (Millones USD/año)				
Zona de Extracción Salmuera – Planta de Procesamiento	347.183	347.183	347.183	372.081
Zona de Extracción Arcilla – Planta de Procesamiento	548.601	559.309	592.469	592.469
Li ₂ CO ₃ Plantas de Procesamiento - Mercados	0.053	8.760	13.139	107.384
Li ₂ CO ₃ Plantas de Procesamiento - Exportación	191.060	157.091	144.122	88.209
LiBr Plantas de Procesamiento - Mercados	0	4.325	6.487	8.614
LiCl Plantas de Procesamiento - Mercados	0	4.325	6.487	8.614
LiOH Plantas de Procesamiento – Mercados	0.249	35.242	69.042	69.042
Costos totales de transporte (TTC)	1,087.146	1,116.235	1,178.929	1,246.413
Costos de Operación (Millones USD/año)				
Extracción de Salmuera	12.480	12.480	12.480	12.480
Extracción de Arcilla	511	511	511	511
Unidades de Procesamiento de Salmuera Concentrada	2,561.520	2,561.520	2,561.520	2,561.520
Unidades de Procesamiento de Arcilla-Li ₂ CO ₃	5,469.501	4,643.016	4,467.048	4,467.048
Unidades de Procesamiento de Arcilla-LiOH	5.824	970.704	1,456.056	1,456.056
Unidades de Producción de LiBr	0	9.188	13.781	13.781
Unidades de Producción de LiCl	0	9.188	13.781	13.781
Costos totales de operación de plantas de procesamiento (TOPC)	8,560.325	8,717.096	9,035.666	9,035.666
Costos operativos totales (TOC)	9,647.471	9,833.331	10,214.595	10,282.079
Costos de Capital (Millones USD)				
Unidades de Procesamiento de Salmuera	15.931	15.931	15.931	20.973
Unidades de Procesamiento de Arcilla-Li ₂ CO ₃	17.484	17.137	17.062	17.062
Unidades de Procesamiento de Arcilla-LiOH	0.512	1.592	1.627	1.627
Unidades de Producción de LiBr	0	2.515	2.515	2.515
Unidades de Producción de LiCl	0	2.520	2.520	2.520
Costos de capital totales (TCC)	33.927	39.695	39.655	44.697
Ingresos Generados por Ventas (Millones USD/año)				
Venta de Li ₂ CO ₃ a Mercados	6.007	1,001.100	1,501.650	5,096.557
Venta de Li ₂ CO ₃ para Exportación	11,973.093	9,844.383	9,031.382	5,527.783
Venta de LiBr	0	147.500	221.250	221.250
Venta de LiCl	0	147.500	221.250	221.250
Venta de LiOH	8.006	1,334.400	2,001.600	2,001.600
Venta de Potasa	1,107.600	1,107.600	1,107.600	1,107.600
Venta de Na ₂ SO ₄	955.226	974.342	1,025.788	1,025.788
Exportación de Arcilla	225.383	215.868	186.406	186.406
Total de ventas (TS)	14,275.315	14,772.692	15,297.177	15,388.234
Ganancias Totales (Millones USD/año)				
Función Objetivo	4,593.918	4,899.667	5,042.926	5,061.458

Capítulo 4. Modelo con unidades de desalinización de salmuera

4.1 Desarrollo superestructura escenario II

Ahora bien, se contempla la generación y modelamiento de una nueva superestructura general, representada en la **Figura 4.1** que abarca todas las posibles soluciones al problema de interés. En contraste con la superestructura mostrada en la **Figura 3.1**, esta nueva superestructura además de considerar las interacciones másicas entre compuestos de litio mostradas en la metodología anterior incluye la implementación de un conjunto de unidades de desalinización de salmuera virgen, destinadas a concentrar la salmuera en un menor tiempo y recuperar agua de calidad para usos como el riego u otras aplicaciones cotidianas. Finalmente, se hace un balance global del agua requerida y producida en todo el proceso de obtención de compuestos de litio desde la etapa de explotación hasta su disposición final en los mercados existentes.

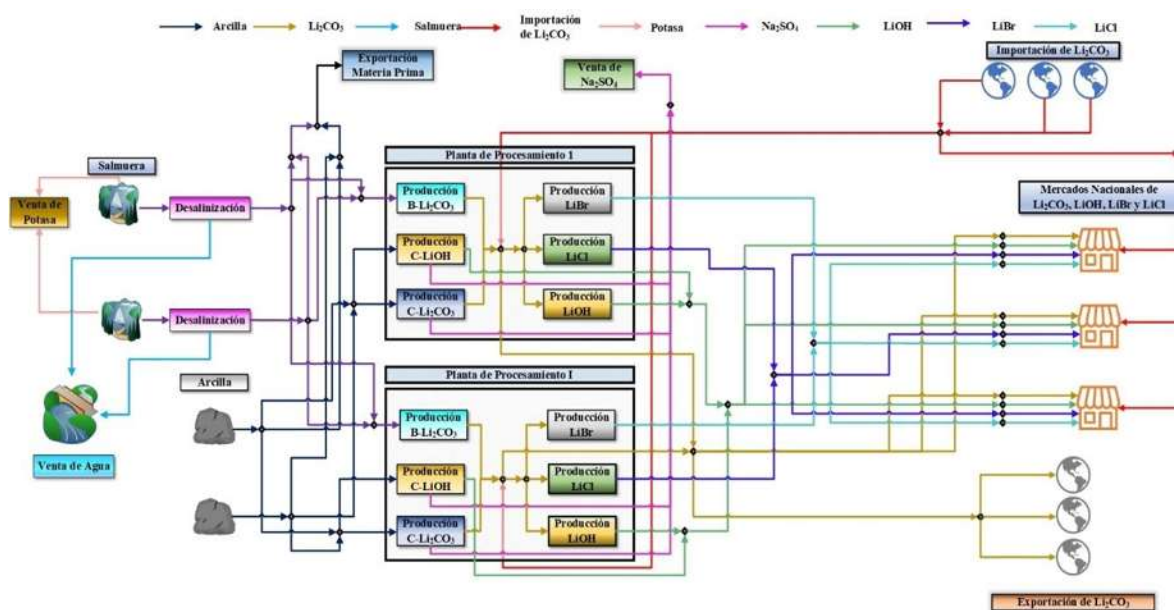


Figura 4.1 Superestructura propuesta para el Escenario II.

4.2 Formulación del modelo matemático

Con el propósito de desarrollar correctamente la descripción de la superestructura mostrada en la **Figura 4.1** se considera la existencia de los siguientes conjuntos y su connotación para mejorar la comprensión de la metodología.

s = Zona de producción de salmuera rica en litio.

w = Unidad de desalinización de salmuera virgen.

r = Zona de producción de arcilla rica en litio.

i = Planta de procesamiento de materia prima para producción de compuestos de litio.

j = Mercado disponible para exportación de Li_2CO_3 .

k = Fuente disponible para la importación de Li_2CO_3 .

n = Ciudad receptora de agua producida.

q = Mercado nacional existente que demanda compuestos de litio.

t = Tiempo.

Ns = Total de zonas de producción de salmuera rica en litio.

Nw = Total de unidades de desalinización de salmuera virgen.

Nr = Total de zonas de producción de arcilla rica en litio.

Ni = Total de plantas de producción de compuestos de litio.

Nj = Total de mercados disponibles para exportación de Li_2CO_3 .

Nk = Total de fuentes desde la que es posible importar Li_2CO_3 .

Nn = Total de posibles ciudades receptoras de agua producida.

Nq = Total de mercados nacionales para compuestos de litio.

Balance en zonas de producción de salmuera virgen

El flujo de entrada a la planta de desalinización w ($F_{w,t}^{in_desal}$), será igual al flujo de salmuera producida por cada zona de producción de salmuera virgen ($F_{s,t}^{bvirg_prod}$):

$$F_{w,t}^{in_desal} = F_{s,t}^{bvirg_prod} \quad (2.1)$$

El flujo de salmuera concentrada que sale de cada planta de desalinización ($F_{w,t}^{b-prod}$) será igual al flujo de entrada multiplicado por un factor de eficiencia de concentración (δ_w^{b-prod}):

$$F_{w,t}^{b-prod} = F_{w,t}^{in-desal} \delta_w^{b-prod}, \quad \forall w, \forall t \quad (2.2)$$

El flujo de salmuera concentrada producido por cada zona ($F_{s,t}^{b-prod}$) será igual a los flujos segregados hacia cada planta de procesamiento ($f_{s,i,t}^{b-process}$) más el flujo destinado para exportación como materia prima ($f_{s,t}^{b-export}$):

$$F_{s,t}^{b-prod} = \sum_i f_{s,i,t}^{b-process} + f_{s,t}^{b-export}, \quad \forall s, \forall t \quad (2.3)$$

El flujo máximo de salmuera concentrada que se puede extraer de cada zona ($F_{s,t}^{b-max-prod}$) es un dato conocido y la producción real debe ser menor que esta:

$$F_{s,t}^{b-prod} \leq F_{s,t}^{b-max-prod}, \quad \forall s, \forall t \quad (2.4)$$

Producción de potasa como subproducto en las zonas de producción de salmuera

Durante la concentración de la salmuera virgen, se produce potasa como subproducto ($F_{s,t}^{Potash-produced}$) misma que es directamente proporcional mediante un factor a la producción de salmuera concentrada (μ_s^{potash}):

$$F_{s,t}^{Potash-produced} = F_{s,t}^{b-prod} \mu_s^{potash}, \quad \forall s, \forall t \quad (2.5)$$

Balance en zonas de producción de arcilla concentrada

El flujo de arcilla concentrada producido por cada zona ($F_{r,t}^{c-prod}$) será igual a los flujos segregados hacia cada planta de procesamiento ($f_{r,i,t}^{c-process}$) más el flujo destinado para su exportación como materia prima ($f_{r,t}^{c-export}$):

$$F_{r,t}^{c-prod} = \sum_i f_{r,i,t}^{c-process} + f_{r,t}^{c-export}, \quad \forall r, \forall t \quad (2.6)$$

El flujo máximo de arcilla concentrada que se puede extraer de cada zona ($F_{r,t}^{c-max-prod}$) es un dato conocido y la producción real debe ser menor que esta:

$$F_{r,t}^{c-prod} \leq F_{r,t}^{c-max-prod}, \quad \forall r, \forall t \quad (2.7)$$

Exportaciones de materia prima

La suma de los flujos segregados por cada zona de producción de salmuera para su exportación será el total de salmuera exportada ($F_t^{tot-b-export}$):

$$F_t^{tot-b-export} = \sum_s f_{s,t}^{b-export}, \quad \forall t \quad (2.8)$$

La suma de los flujos segregados por cada zona de producción de arcilla para su exportación será el total de arcilla exportada ($F_t^{tot-c-export}$):

$$F_t^{tot-c-export} = \sum_r f_{r,t}^{c-export}, \quad \forall t \quad (2.9)$$

Balance en plantas de procesamiento

Procesamiento de salmuera

El flujo que entra a cada unidad de procesamiento de salmuera concentrada ($F_{i,t}^{b-process-in}$) será igual a la suma de los flujos segregados hacia esta desde las distintas zonas de producción:

$$F_{i,t}^{b-process-in} = \sum_s f_{s,i,t}^{b-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.10)$$

La producción de Li_2CO_3 a partir de salmuera concentrada ($f_{i,t}^{b-process-out}$) será igual al flujo total de salmuera que entra al procesamiento, multiplicado por un factor que relaciona la eficiencia de producción ($\alpha_i^{b-process}$):

$$f_{i,t}^{b-process-out} = F_{i,t}^{b-process-in} \alpha_i^{b-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.11)$$

Procesamiento de arcilla

El flujo de arcilla enviado hacia cada planta de procesamiento se segregará en dos flujos, el primero para la producción de Li_2CO_3 ($f_{r,i,t}^{c-Li_2CO_3-process}$) y el segundo para la producción de LiOH ($f_{r,i,t}^{c-OH-process}$):

$$f_{r,i,t}^{c-process} = f_{r,i,t}^{c-Li_2CO_3-process} + f_{r,i,t}^{c-OH-process}, \quad \forall r, \forall i, \forall t \quad (2.12)$$

El flujo que entra a cada unidad de procesamiento de arcilla concentrada para la producción de Li_2CO_3 ($F_{i,t}^{b-process-in}$) será igual a la suma de los flujos segregados hacia esta desde las distintas zonas de producción:

$$F_{i,t}^{c-process-in} = \sum_r f_{r,i,t}^{c-Li_2CO_3-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.13)$$

El flujo que entra a cada unidad de procesamiento de arcilla concentrada para la producción de LiOH ($F_{i,t}^{c-OH-in}$) será igual a la suma de los flujos segregados hacia esta desde las distintas zonas de producción:

$$F_{i,t}^{c-OH-in} = \sum_r f_{r,i,t}^{c-OH-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.14)$$

La producción de Li_2CO_3 a partir de arcilla concentrada ($f_{i,t}^{c-process-out}$) será igual al flujo total de arcilla que entra al procesamiento, multiplicado por un factor que relaciona la eficiencia de producción ($\alpha_i^{c-Li_2CO_3-process}$):

$$f_{i,t}^{c-process-out} = F_{i,t}^{c-process-in} \alpha_i^{c-Li_2CO_3-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.15)$$

La producción de LiOH a partir de arcilla concentrada ($F_{i,t}^{LiOH-clay-produced}$) será igual al flujo total de arcilla que entra al procesamiento, multiplicado por un factor que relaciona la eficiencia de producción ($\alpha_i^{c-Li_2CO_3-process}$):

$$F_{i,t}^{LiOH-clay-produced} = F_{i,t}^{c-OH-in} \alpha_i^{c-OH-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.16)$$

Producción de Na_2SO_4

La producción de Li_2CO_3 a partir de arcilla genera como subproducto Na_2SO_4 ($F_{i,t}^{Na_2SO_4-Li_2CO_3-produced}$) de acuerdo con un factor que relaciona la eficiencia de producción ($\mu_i^{Na_2SO_4-Li_2CO_3}$):

$$F_{i,t}^{Na_2SO_4-Li_2CO_3-produced} = f_{i,t}^{c-process-out} \mu_i^{Na_2SO_4-Li_2CO_3}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.17)$$

La producción de LiOH a partir de arcilla genera como subproducto Na_2SO_4 ($F_{i,t}^{\text{Na}_2\text{SO}_4-\text{LiOH}-\text{produced}}$) de acuerdo con un factor que relaciona la eficiencia de producción ($\mu_i^{\text{Na}_2\text{SO}_4-\text{LiOH}}$):

$$F_{i,t}^{\text{Na}_2\text{SO}_4-\text{LiOH}-\text{produced}} = F_{i,t}^{\text{LiOH}-\text{clay}-\text{produced}} \mu_i^{\text{Na}_2\text{SO}_4-\text{LiOH}}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.18)$$

Producción de Li_2CO_3 por planta de procesamiento

El flujo de Li_2CO_3 producido por cada planta de procesamiento ($F_{i,t}^{\text{tot}-\text{Li}_2\text{CO}_3\text{produced}}$) será la suma de la producción a partir de arcilla más la producción a partir de salmuera:

$$F_{i,t}^{\text{tot}-\text{Li}_2\text{CO}_3\text{produced}} = f_{i,t}^{b-\text{process}-\text{out}} + f_{i,t}^{c-\text{process}-\text{out}}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.19)$$

Balance de Li_2CO_3 dentro de la planta de procesamiento

La suma del flujo de Li_2CO_3 producido por cada planta de procesamiento más las importaciones de este ($f_{k,i,t}^{\text{import}-\text{deriv}-\text{uses}}$) serán igual a la suma del flujo segregado para la producción de derivados de Li_2CO_3 ($f_{i,t}^{\text{deriv}-\text{uses}}$) más el flujo disponible para satisfacer la demanda de los mercados de Li_2CO_3 ($f_{i,t}^{\text{available}-\text{LiCO}_3}$):

$$F_{i,t}^{\text{tot}-\text{Li}_2\text{CO}_3\text{produced}} + \sum_k f_{k,i,t}^{\text{import}-\text{deriv}-\text{uses}} = f_{i,t}^{\text{deriv}-\text{uses}} + f_{i,t}^{\text{available}-\text{LiCO}_3}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.20)$$

Producción de derivados de Li_2CO_3 en planta de procesamiento

El flujo destinado para la producción de derivados de Li_2CO_3 se segregará para la producción de LiBr ($f_{i,t}^{\text{Br}-\text{proc}-\text{in}}$), LiCl ($f_{i,t}^{\text{Cl}-\text{proc}-\text{in}}$) y LiOH ($f_{i,t}^{\text{OH}-\text{proc}-\text{in}}$):

$$f_{i,t}^{\text{deriv}-\text{uses}} = f_{i,t}^{\text{Br}-\text{proc}-\text{in}} + f_{i,t}^{\text{Cl}-\text{proc}-\text{in}} + f_{i,t}^{\text{OH}-\text{proc}-\text{in}}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.21)$$

Producción y distribución de LiBr

La producción de LiBr por unidad de producción ($f_{i,t}^{\text{Br}-\text{proc}-\text{out}}$) será igual al flujo que entra a la misma, multiplicado por un factor que relaciona la eficiencia de la producción ($\delta^{\text{Br}-\text{process}}$):

$$f_{i,t}^{\text{Br}-\text{proc}-\text{out}} = f_{i,t}^{\text{Br}-\text{proc}-\text{in}} \delta^{\text{Br}-\text{process}}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.22)$$

La producción total de LiBr ($F_t^{tot-Br-produced}$) será igual a la suma de la producción de cada planta de procesamiento:

$$F_t^{tot-Br-produced} = \sum_i f_{i,t}^{Br-proc-out}, \quad \forall t \quad (2.23)$$

La producción total de LiBr está sujeta a la demanda existente, por lo tanto deberá ser menor o igual que la demanda máxima establecida por cada mercado ($f_{q,t}^{Br-max-demand}$):

$$F_t^{tot-Br-produced} \leq \sum_q f_{q,t}^{Br-max-demand}, \quad \forall t \quad (2.24)$$

La producción de LiBr de cada planta de procesamiento se segregará para satisfacer la demanda de los mercados existentes ($f_{i,q,t}^{Br-sent-market}$):

$$f_{i,t}^{Br-proc-out} = \sum_q f_{i,q,t}^{Br-sent-market}, \quad \forall i, t \quad (2.25)$$

La demanda máxima de LiBr de cada mercado se satisfará mediante la suma de los flujos enviados desde cada planta de procesamiento:

$$f_{q,t}^{Br-max-demand} = \sum_i f_{i,q,t}^{Br-sent-market}, \quad \forall q, t \quad (2.26)$$

Producción y distribución de LiCl

La producción de LiCl por unidad de producción ($f_{i,t}^{Cl-proc-out}$) será igual al flujo que entra a la misma, multiplicado por un factor que relaciona la eficiencia de la producción ($\delta^{Cl-process}$):

$$f_{i,t}^{Cl-proc-out} = f_{i,t}^{Cl-proc-in} \delta^{Cl-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.27)$$

La producción total de LiCl ($F_t^{tot-Cl-produced}$) será igual a la suma de la producción de cada planta de procesamiento:

$$F_t^{tot-Cl-produced} = \sum_i f_{i,t}^{Cl-proc-out}, \quad \forall t \quad (2.28)$$

La producción total de LiCl está sujeta a la demanda existente, por lo tanto deberá ser menor o igual que la demanda máxima establecida por cada mercado ($f_{q,t}^{Cl-max-demand}$):

$$F_t^{tot-Cl-produced} \leq \sum_q f_{q,t}^{Cl-max-demand}, \quad \forall t \quad (2.29)$$

La producción de LiCl de cada planta de procesamiento se segregará para satisfacer la demanda de los mercados existentes ($f_{i,q,t}^{Cl-sent-market}$):

$$f_{i,t}^{Cl-proc-out} = \sum_q f_{i,q,t}^{Cl-sent-market}, \quad \forall i, t \quad (2.30)$$

La demanda máxima de LiCl de cada mercado se satisfará mediante la suma de los flujos enviados desde cada planta de procesamiento:

$$f_{q,t}^{Cl-max-demand} = \sum_i f_{i,q,t}^{Cl-sent-market}, \quad \forall q, t \quad (2.31)$$

Producción y distribución de LiOH

La producción de LiOH por unidad de producción ($f_{i,t}^{OH-proc-out}$) será igual al flujo que entra a la misma, multiplicado por un factor que relaciona la eficiencia de la producción ($\delta^{OH-process}$):

$$f_{i,t}^{OH-proc-out} = f_{i,t}^{OH-proc-in} \delta^{OH-process}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.32)$$

La producción total de LiOH ($F_t^{tot-OH-produced}$) será igual a la suma de la producción a partir de arcilla ($F_{i,t}^{LiOH-clay-produced}$) más la producción a partir de Li_2CO_3 ($f_{i,t}^{OH-proc-out}$):

$$Cost^{trans-Li_2CO_3-pp-market} = \sum_i \sum_q \sum_t UTC_{i,q}^{trans-Li_2CO_3} f_{i,q,t}^{sent-market} \quad (2.33)$$

La producción total de LiOH está sujeta a la demanda existente, por tanto, deberá ser menor o igual que la demanda máxima establecida por cada mercado ($f_{q,t}^{OH-max-demand}$):

$$F_t^{tot-OH-produced} \leq \sum_q f_{q,t}^{OH-max-demand}, \quad \forall t \quad (2.34)$$

La producción de LiOH de cada planta de procesamiento se segregará para satisfacer la demanda de los mercados existentes ($f_{i,q,t}^{OH_sent-market}$):

$$f_{i,t}^{OH-proc-out} + F_{i,t}^{LiOH-clay-produced} = \sum_q f_{i,q,t}^{OH_sent-market}, \quad \forall i, t \quad (2.35)$$

La demanda máxima de LiOH de cada mercado se satisfará mediante la suma de los flujos enviados desde cada planta de procesamiento :

$$f_{q,t}^{OH-max-demand} = \sum_i f_{i,q,t}^{OH_sent-market}, \quad \forall q, t \quad (2.36)$$

Disponibilidad de Li₂CO₃ por planta de procesamiento

El total de Li₂CO₃ disponible proveniente de cada planta de procesamiento se segregará en un flujo destinado para su exportación ($f_{i,t}^{Li_2CO_3-export}$) más el flujo para satisfacer la demanda de los mercados existentes ($f_{i,t}^{direct-uses}$):

$$f_{i,t}^{available-LiCO_3} = f_{i,t}^{Li_2CO_3-export} + f_{i,t}^{direct-uses}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.37)$$

Segregación de Li₂CO₃

El flujo de Li₂CO₃ destinado por cada planta de procesamiento para satisfacer la demanda de los mercados existentes será la suma de los flujos enviados a cada mercado ($f_{i,q,t}^{sent-market}$):

$$f_{i,t}^{direct-uses} = \sum_q f_{i,q,t}^{sent-market}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.38)$$

El flujo de Li₂CO₃ que ingresa a cada mercado será igual a la suma de los flujos provenientes de cada planta de procesamiento, más el flujo proveniente directamente de importación ($f_{k,q,t}^{import-market}$):

$$f_{q,t}^{tot-market} = \sum_i f_{i,q,t}^{sent-market} + \sum_k f_{k,q,t}^{import-market}, \quad \forall q, \forall t \quad (2.39)$$

El flujo de Li_2CO_3 que ingresa a cada mercado será igual o menor que la demanda máxima de este ($f_{q,t}^{\text{tot-market-demand}}$):

$$f_{q,t}^{\text{tot-market}} \leq f_{q,t}^{\text{tot-market-demand}}, \quad \forall q, \forall t \quad (2.40)$$

Exportaciones de Li_2CO_3

Las exportaciones de Li_2CO_3 ($F_t^{\text{tot-export}}$) serán igual a la suma de los flujos segregados para este fin desde cada planta de procesamiento:

$$F_t^{\text{tot-export}} = \sum_i f_{i,t}^{\text{Li}_2\text{CO}_3\text{-export}}, \quad \forall t \quad (2.41)$$

Las exportaciones de Li_2CO_3 se segregarán a los distintos mercados disponibles ($f_{j,t}^{\text{export}}$):

$$F_t^{\text{tot-export}} = \sum_j f_{j,t}^{\text{export}}, \quad \forall t \quad (2.42)$$

La exportación de Li_2CO_3 destinada para cada mercado será menor o igual que la demanda máxima de este ($f_{j,t}^{\text{max-demand}}$):

$$f_{j,t}^{\text{export}} \leq f_{j,t}^{\text{max-demand}}, \quad \forall j, \forall t \quad (2.43)$$

Importaciones de Li_2CO_3

El total de Li_2CO_3 importado de cada fuente disponible ($f_{k,t}^{\text{import}}$) será la suma de los flujos segregados hacia las plantas de procesamiento ($f_{k,i,t}^{\text{import-deriv-uses}}$) más el flujo enviado directamente para satisfacer la demanda de los mercados ($f_{k,q,t}^{\text{import-market}}$):

$$f_{k,t}^{\text{import}} = \sum_i f_{k,i,t}^{\text{import-deriv-uses}} + \sum_q f_{k,q,t}^{\text{import-market}}, \quad \forall k, \forall t \quad (2.44)$$

Capacidad y existencia de plantas de procesamiento

Procesamiento de salmuera virgen

La capacidad óptima de las unidades de procesamiento de salmuera virgen ($F_w^{bvirg-process-cap}$) deberá ser mayor o igual que el flujo de entrada a cada unidad ($F_{w,t}^{in_desal}$). Además, la capacidad óptima deberá ser mayor o igual que un flujo mínimo mismo que hace viable la instalación de la planta ($F_w^{bvirg-min-process-cap}$) y menor o igual que la capacidad máxima de cada unidad ($F_w^{bvirg-max-process-cap}$). Se introduce la variable binaria (y_w^b) para determinar la existencia de dichas unidades de procesamiento:

$$F_w^{bvirg-process-cap} \geq F_{w,t}^{in_desal}, \quad \forall w, \forall t \quad (2.45)$$

$$F_w^{bvirg-min-process-cap} y_w^b \leq F_w^{bvirg-process-cap} \leq F_w^{bvirg-max-process-cap} y_w^b, \quad \forall w \quad (2.46)$$

Procesamiento de salmuera concentrada

La capacidad óptima de las unidades de procesamiento de salmuera ($F_i^{b-process-cap}$) deberá ser mayor o igual que el flujo de entrada a cada unidad ($F_{i,t}^{b-process-in}$). Además, la capacidad óptima deberá ser mayor o igual que un flujo mínimo mismo que hace viable la instalación de la planta ($F_i^{b-min-process}$) y menor o igual que la capacidad máxima de cada unidad ($F_i^{b-max-process-cap}$). Se introduce la variable binaria (y_i^b) para determinar la existencia de dichas unidades de procesamiento:

$$F_i^{b-process-cap} \geq F_{i,t}^{b-process-in}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.47)$$

$$F_i^{b-min-process} y_i^b \leq F_i^{b-process-cap} \leq F_i^{b-max-process-cap} y_i^b, \quad \forall i \quad (2.48)$$

Procesamiento de arcilla para producir Li_2CO_3

La capacidad óptima de las unidades de procesamiento de arcilla para la producción de Li_2CO_3 ($F_i^{c-process-cap}$) deberá ser mayor o igual que el flujo de entrada a cada unidad ($F_{i,t}^{c-process-in}$). Además, la capacidad óptima deberá ser mayor o igual que un flujo mínimo mismo que hace viable la instalación de la planta ($F_i^{c-min-process}$) y menor o igual que la

capacidad máxima de cada unidad ($F_i^{c-max-process-cap}$). Se introduce la variable binaria (y_i^c) para determinar la existencia de dichas unidades de procesamiento:

$$F_i^{c-process-cap} \geq F_{i,t}^{c-process-in}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.49)$$

$$F_i^{c-min-process} y_i^c \leq F_i^{c-process-cap} \leq F_i^{c-max-process-cap} y_i^c, \quad \forall i \quad (2.50)$$

Procesamiento de arcilla para producir LiOH

La capacidad óptima de las unidades de procesamiento de arcilla para la producción de LiOH ($F_i^{c-OH-process-cap}$) deberá ser mayor o igual que el flujo de entrada a cada unidad ($F_{i,t}^{c-OH-in}$). Además, la capacidad óptima deberá ser mayor o igual que un flujo mínimo mismo que hace viable la instalación de la planta ($F_i^{c-OH-min-process}$) y menor o igual que la capacidad máxima de cada unidad ($F_i^{c-OH-max-process-cap}$). Se introduce la variable binaria (y_i^{c-OH}) para determinar la existencia de dichas unidades de procesamiento:

$$F_i^{c-OH-process-cap} \geq F_{i,t}^{c-OH-in}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.51)$$

$$F_i^{c-OH-min-process} y_i^{c-OH} \leq F_i^{c-OH-process-cap} \leq F_i^{c-OH-max-process-cap} y_i^{c-OH}, \quad \forall i \quad (2.52)$$

Procesamiento de derivados de Li_2CO_3

Producción de LiBr

La capacidad óptima de las unidades de producción de LiBr ($F_i^{Br-process-cap}$) deberá ser mayor o igual que el flujo de entrada a cada unidad ($f_{i,t}^{Br-proc-in}$). Además, la capacidad óptima deberá ser mayor o igual que un flujo mínimo mismo que hace viable la instalación de la planta ($F_i^{Br-min-process}$) y menor o igual que la capacidad máxima de cada unidad ($F_i^{Br-max-process}$). Se introduce la variable binaria (y_i^{Br}) para determinar la existencia de dichas unidades de producción:

$$F_i^{Br-process-cap} \geq f_{i,t}^{Br-proc-in}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.53)$$

$$F_i^{Br-min-process} y_i^{Br} \leq F_i^{Br-process-cap} \leq F_i^{Br-max-process} y_i^{Br}, \quad \forall i \quad (2.54)$$

Producción de LiCl

La capacidad óptima de las unidades de producción de LiCl ($F_i^{Cl-process-cap}$) deberá ser mayor o igual que el flujo de entrada a cada unidad ($f_{i,t}^{Cl-proc-in}$). Además, la capacidad óptima deberá ser mayor o igual que un flujo mínimo mismo que hace viable la instalación de la planta ($F_i^{Cl-min-process}$) y menor o igual que la capacidad máxima de cada unidad ($F_i^{Cl-max-process}$). Se introduce la variable binaria (y_i^{Cl}) para determinar la existencia de dichas unidades de producción:

$$F_i^{Cl-process-cap} \geq f_{i,t}^{Cl-proc-in}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.55)$$

$$F_i^{Cl-min-process} y_i^{Cl} \leq F_i^{Cl-process-cap} \leq F_i^{Cl-max-process} y_i^{Cl}, \quad \forall i \quad (2.56)$$

Producción de LiOH

La capacidad óptima de las unidades de producción de LiOH ($F_i^{OH-process-cap}$) deberá ser mayor o igual que el flujo de entrada a cada unidad ($f_{i,t}^{OH-proc-in}$). Además, la capacidad óptima deberá ser mayor o igual que un flujo mínimo mismo que hace viable la instalación de la planta ($F_i^{OH-min-process}$) y menor o igual que la capacidad máxima de cada unidad ($F_i^{OH-max-process}$). Se introduce la variable binaria (y_i^{OH}) para determinar la existencia de dichas unidades de producción:

$$F_i^{OH-process-cap} \geq f_{i,t}^{OH-proc-in}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.57)$$

$$F_i^{OH-min-process} y_i^{OH} \leq F_i^{OH-process-cap} \leq F_i^{OH-max-process} y_i^{OH}, \quad \forall i \quad (2.58)$$

Costos de capital

Unidades de procesamiento de salmuera virgen

El costo de capital asociado a cada unidad de procesamiento de salmuera virgen ($CapCost_w^{bvirg-process}$) está dado por un factor de anualidad (k_F), costo unitario fijo

($FC_w^{bvirg-process}$) y variable ($VC_w^{bvirg-process}$), la capacidad óptima ($F_w^{bvirg-process-cap}$) y un exponente con el que se consideran las economías de escala ($\beta^{bvirg-process}$):

$$CapCost_w^{bvirg-process} = k_F \left[FC_w^{bvirg-process} y_w^b + VC_w^{bvirg-process} \left(F_w^{bvirg-process-cap} \right)^{\beta^{bvirg-process}} \right], \quad \forall w \quad (2.59)$$

Unidades de procesamiento de salmuera concentrada

El costo de capital asociado a cada unidad de procesamiento de salmuera concentrada ($CapCost_i^{b-process}$) está dado por un factor de anualidad (k_F), costo unitario fijo ($FC_i^{b-process}$) y variable ($VC_i^{b-process}$), la capacidad óptima ($F_i^{b-process-cap}$) y un exponente con el que se consideran las economías de escala ($\beta^{b-process}$):

$$CapCost_i^{b-process} = k_F \left[FC_i^{b-process} y_i^b + VC_i^{b-process} \left(F_i^{b-process-cap} \right)^{\beta^{b-process}} \right], \quad \forall i \quad (2.60)$$

Unidades de procesamiento de arcilla para la producción de Li_2CO_3

El costo de capital asociado a cada unidad de procesamiento de arcilla para la producción de Li_2CO_3 ($CapCost_i^{c-process}$) está dado por un factor de anualidad (k_F), costo unitario fijo ($FC_i^{c-process}$) y variable ($VC_i^{c-process}$), la capacidad óptima ($F_i^{c-process-cap}$) y un exponente con el que se consideran las economías de escala ($\beta^{c-process}$):

$$CapCost_i^{c-process} = k_F \left[FC_i^{c-process} y_i^c + VC_i^{c-process} \left(F_i^{c-process-cap} \right)^{\beta^{c-process}} \right], \quad \forall i \quad (2.61)$$

Unidades de procesamiento de arcilla para la producción de LiOH

El costo de capital asociado a cada unidad de procesamiento de arcilla para la producción de LiOH ($CapCost_i^{c-OH-process}$) está dado por un factor de anualidad (k_F), costo unitario fijo ($FC_i^{c-OH-process}$) y variable ($VC_i^{c-OH-process}$), la capacidad óptima

($F_i^{c-OH-process-cap}$) y un exponente con el que se consideran las economías de escala ($\beta^{c-OH-process}$):

$$CapCost_i^{c-OH-process} = k_F \left[FC_i^{c-OH-process} y_i^{c-OH} + VC_i^{c-OH-process} \left(F_i^{c-OH-process-cap} \right)^{\beta^{c-OH-process}} \right], \quad \forall i \quad (2.62)$$

Unidades de producción de LiBr

El costo de capital asociado a cada unidad de producción de LiBr ($CapCost_i^{Br-process}$) está dado por un factor de anualidad (k_F), costo unitario fijo ($FC_i^{Br-process}$) y variable ($VC_i^{Br-process}$), la capacidad óptima ($F_i^{Br-process-cap}$) y un exponente con el que se consideran las economías de escala ($\beta^{Br-process}$):

$$CapCost_i^{Br-process} = k_F \left[FC_i^{Br-process} y_i^{Br} + VC_i^{Br-process} \left(F_i^{Br-process-cap} \right)^{\beta^{Br-process}} \right], \quad \forall i \quad (2.63)$$

Unidades de producción de LiCl

El costo de capital asociado a cada unidad de producción de LiCl ($CapCost_i^{Cl-process}$) está dado por un factor de anualidad (k_F), costo unitario fijo ($FC_i^{Cl-process}$) y variable ($VC_i^{Cl-process}$), la capacidad óptima ($F_i^{Cl-process-cap}$) y un exponente con el que se consideran las economías de escala ($\beta^{Cl-process}$):

$$CapCost_i^{Cl-process} = k_F \left[FC_i^{Cl-process} y_i^{Cl} + VC_i^{Cl-process} \left(F_i^{Cl-process-cap} \right)^{\beta^{Cl-process}} \right], \quad \forall i \quad (2.64)$$

Unidades de producción de LiOH

El costo de capital asociado a cada unidad de producción de LiOH a partir de Li_2CO_3 ($CapCost_i^{OH-process}$) está dado por un factor de anualidad (k_F), costo unitario fijo

($FC_i^{OH-process}$) y variable ($VC_i^{OH-process}$), la capacidad óptima ($F_i^{OH-process-cap}$) y un exponente con el que se consideran las economías de escala ($\beta^{OH-process}$):

$$CapCost_i^{OH-process} = k_F \left[FC_i^{OH-process} y_i^{OH} + VC_i^{OH-process} \left(F_i^{OH-process-cap} \right)^{\beta^{OH-process}} \right], \quad \forall i \quad (2.65)$$

Costo total de planta de procesamiento

El costo total de cada planta de procesamiento ($CapCost_i^{process-plant}$) está dado por la suma de los costos de las unidades que se encuentran asociadas a la misma:

$$CapCost_i^{process-plant} = \left[\begin{array}{l} CapCost_i^{b-process} + CapCost_i^{c-process} \\ + CapCost_i^{c-OH-process} + CapCost_i^{Br-process} \\ + CapCost_i^{Cl-process} + CapCost_i^{OH-process} \\ + CapCost_w^{bvirg-process} \end{array} \right], \quad \forall i \quad (2.66)$$

Costo total de capital

El costo total de capital (TCC) será la suma de los costos de capital de cada planta de procesamiento:

$$TCC = \sum_i CapCost_i^{process-plant} \quad (2.67)$$

Costos de operación

Costos de Transporte

Transporte zonas de producción de salmuera-plantas de procesamiento

El costo de transporte del material producido en las zonas de extracción de salmuera hacia las plantas de procesamiento ($Cost^{trans-brine-pp}$) será la suma del flujo producido ($f_{s,i,t}^{b-process}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($UTC_{s,i}^{trans-brine}$):

$$Cost^{trans-brine-pp} = \sum_s \sum_i \sum_t UTC_{s,i}^{trans-brine} f_{s,i,t}^{b-process} \quad (2.68)$$

Transporte zonas de producción de arcilla-plantas de procesamiento

El costo de transporte del material producido en las zonas de extracción de arcilla hacia las plantas de procesamiento ($Cost^{trans-clay-pp}$) será la suma del flujo producido ($f_{r,i,t}^{c-process}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($UTC_{r,i}^{trans-clay}$):

$$Cost^{trans-clay-pp} = \sum_r \sum_i \sum_t UTC_{r,i}^{trans-clay} f_{r,i,t}^{c-process} \quad (2.69)$$

Transporte LiBr plantas de procesamiento-mercados

El costo de transporte del LiBr producido en las plantas de procesamiento hacia los mercados ($Cost^{trans-Br-pp-market}$) será la suma del flujo producido ($f_{i,t}^{Br-proc-out}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($UTC_{i,q}^{trans-Br}$):

$$Cost^{trans-Br-pp-market} = \sum_i \sum_q \sum_t UTC_{i,q}^{trans-Br} f_{i,t}^{Br-proc-out} \quad (2.70)$$

Transporte LiCl plantas de procesamiento-mercados

El costo de transporte del LiCl producido en las plantas de procesamiento hacia los mercados ($Cost^{trans-Cl-pp-market}$) será la suma del flujo producido ($f_{i,t}^{Cl-proc-out}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($UTC_{i,q}^{trans-Cl}$):

$$Cost^{trans-Cl-pp-market} = \sum_i \sum_q \sum_t UTC_{i,q}^{trans-Cl} f_{i,t}^{Cl-proc-out} \quad (2.71)$$

Transporte LiOH plantas de procesamiento-mercados

El costo de transporte del LiOH producido en las plantas de procesamiento hacia los mercados ($Cost^{trans-OH-pp-market}$) será la suma del flujo producido ($f_{i,t}^{OH-proc-out} + F_{i,t}^{LiOH-clay-produced}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($UTC_{i,q}^{trans-OH}$):

$$Cost^{trans-OH-pp-market} = \sum_i \sum_q \sum_t UTC_{i,q}^{trans-OH} \left(f_{i,t}^{OH-proc-out} + F_{i,t}^{LiOH-clay-produced} \right) \quad (2.72)$$

Transporte Li₂CO₃ plantas de procesamiento-mercados

El costo de transporte del Li₂CO₃ producido en las plantas de procesamiento hacia los mercados ($Cost^{trans-Li_2CO_3-pp-market}$) será la suma del flujo enviado para cada mercado ($f_{i,q,t}^{sent-market}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($UTC_{i,q}^{trans-Li_2CO_3}$):

$$Cost^{trans-Li_2CO_3-pp-market} = \sum_i \sum_q \sum_t UTC_{i,q}^{trans-Li_2CO_3} f_{i,q,t}^{sent-market} \quad (2.73)$$

Transporte Li₂CO₃ plantas de procesamiento-exportación

El costo de transporte del Li₂CO₃ producido en las plantas de procesamiento hacia los mercados ($Cost^{trans-Li_2CO_3-export}$) será la suma del flujo enviado para cada mercado de exportación ($f_{j,t}^{export}$) multiplicado por su costo unitario de transporte ($UTC_{i,j}^{trans-Li_2CO_3-export}$):

$$Cost^{trans-Li_2CO_3-export} = \sum_i \sum_j \sum_t UTC_{i,j}^{trans-Li_2CO_3-export} f_{j,t}^{export} \quad (2.74)$$

Costos totales de transporte

El costo total de transporte (TTC) será la suma de las expresiones anteriores (2.68-2.74):

$$TTC = \left[\begin{array}{l} Cost^{trans-brine-pp} + Cost^{trans-clay-pp} + Cost^{trans-Br-pp-market} \\ + Cost^{trans-Cl-pp-market} + Cost^{trans-OH-pp-market} \\ + Cost^{trans-Li_2CO_3-pp-market} + Cost^{trans-Li_2CO_3-export} \\ + Cost^{trans_water_city} \end{array} \right] \quad (2.75)$$

Costos de extracción

Extracción de salmuera virgen

Los costos asociados a la extracción de la salmuera virgen ($Cost^{b-ext}$) son correspondientes al precio unitario de extracción de esta que usualmente es pagado al gobierno (UP^{b-ext}) multiplicado por el flujo extraído ($F_{s,t}^{b-prod}$):

$$Cost^{b-ext} = UP^{b-ext} F_{s,t}^{b-prod} \quad (2.76)$$

Extracción de arcilla

Los costos asociados a la extracción de la arcilla ($Cost^{c-ext}$) son correspondientes al precio unitario de extracción de esta que usualmente es pagado al gobierno (UP^{c-ext}) multiplicado por el flujo extraído ($F_{r,t}^{c-prod}$):

$$Cost^{c-ext} = UP^{c-ext} F_{r,t}^{c-prod} \quad (2.77)$$

Costos operativos

Costo de operación de unidades de procesamiento de salmuera virgen

El costo de operación de las unidades de procesamiento de salmuera virgen ($Cost^{op-bvirg-process}$) será la suma del flujo que entra a las mismas por su costo unitario de operación ($UOC_w^{bvirg-process}$):

$$Cost^{op-bvirg-process} = \sum_w \sum_t UOC_w^{bvirg-process} F_{w,t}^{in-desal} \quad (2.78)$$

Costo de operación de unidades de procesamiento de salmuera concentrada

El costo de operación de las unidades de procesamiento de salmuera concentrada ($Cost^{op-b-process}$) será la suma del flujo que entra multiplicado por su costo unitario de operación ($UOC_i^{b-process}$) más el flujo de agua requerido para la producción ($F_{i,t}^{b-water-req}$) multiplicado por el costo de esta ($UP^{water-pp}$):

$$Cost^{op-b-process} = \sum_i \sum_t (UOC_i^{b-process} F_{i,t}^{b-process-in} + UP^{water-pp} F_{i,t}^{b-water-req}) \quad (2.79)$$

Costo de operación de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producción de Li_2CO_3

El costo de operación de las unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producir Li_2CO_3 ($Cost^{op-c-process}$) será la suma del flujo que entra multiplicado por su costo

unitario de operación ($UOC_i^{c-process}$) más el flujo de agua requerido para la producción ($F_{i,t}^{c-water-req}$) multiplicado por el costo de esta ($UP^{water-pp}$):

$$Cost^{op-c-process} = \sum_i \sum_t (UOC_i^{c-process} F_{i,t}^{c-process-in} + UP^{water-pp} F_{i,t}^{c-water-req}) \quad (2.80)$$

Costo de operación de unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producción de LiOH

El costo de operación de las unidades de procesamiento de arcilla concentrada para producir LiOH ($Cost^{op-c-OH-process}$) será la suma del flujo que entra multiplicado por su costo unitario de operación ($UOC_i^{c-OH-process}$) más el flujo de agua requerido para la producción ($F_{i,t}^{c-OH-water-req}$) multiplicado por el costo de esta ($UP^{water-pp}$):

$$Cost^{op-c-OH-process} = \sum_i \sum_t (UOC_i^{c-OH-process} F_{i,t}^{c-OH-in} + UP^{water-pp} F_{i,t}^{c-OH-water-req}) \quad (2.81)$$

Costo de operación de unidades de producción de LiBr

El costo de operación de las unidades de producción de LiBr ($Cost^{op-Br-process}$) será la suma del flujo que entra a las mismas por su costo unitario de operación ($UOC_i^{Br-process}$):

$$Cost^{op-Br-process} = \sum_i \sum_t UOC_i^{Br-process} f_{i,t}^{Br-proc-in} \quad (2.82)$$

Costo de operación de unidades de producción de LiCl

El costo de operación de las unidades de producción de LiCl ($Cost^{op-Cl-process}$) será la suma del flujo que entra a las mismas por su costo unitario de operación ($UOC_i^{Cl-process}$):

$$Cost^{op-Cl-process} = \sum_i \sum_t UOC_i^{Cl-process} f_{i,t}^{Cl-proc-in} \quad (2.83)$$

Costo de operación de unidades de producción de LiOH a partir de Li₂CO₃

El costo de operación de las unidades de producción de LiOH a partir de Li₂CO₃ ($Cost^{op-OH-process}$) será la suma del flujo que entra a las mismas por su costo unitario de operación ($UOC_i^{OH-process}$):

$$Cost^{op-OH-process} = \sum_i \sum_t UOC_i^{OH-process} f_{i,t}^{OH-proc-in} \quad (2.84)$$

Costo total de operación de plantas de procesamiento

El costo total correspondiente a la operación de las plantas de procesamiento (*TOPC*) será la suma de las expresiones anteriores (2.76.-2.84):

$$TOPC = \left[\begin{array}{l} Cost^{b-ext} + Cost^{c-ext} + Cost^{op-bvirg-process} + Cost^{op-b-process} \\ + Cost^{op-c-process} + Cost^{op-c-OH-process} + Cost^{op-Br-process} \\ + Cost^{op-Cl-process} + Cost^{op-OH-process} \end{array} \right] \quad (2.85)$$

Costos de importación

El costo de importación (*TIC*) será igual a la sumatoria del total importado, multiplicado por el costo unitario, asociado a la fuente y a la estacionalidad ($UC_{k,t}$):

$$TIC = \sum_k \sum_t UC_{k,t} f_{k,t}^{import} \quad (2.86)$$

Costo total de operación

El costo total (*TOC*) de operación será la suma de los costos de transporte, operación de plantas de procesamiento e importación:

$$TOC = TTC + TOPC + TIC \quad (2.87)$$

Ingresos

Venta de derivados de Li_2CO_3

Venta de LiBr

Los ingresos generados con la venta de LiBr ($Sales^{Br}$) serán el total producido ($F_t^{tot-Br-produced}$) multiplicado por el precio unitario de venta, mismo que está asociado a la estacionalidad (UP_t^{Br}):

$$Sales^{Br} = \sum_t UP_t^{Br} F_t^{tot-Br-produced} \quad (2.88)$$

Venta de LiCl

Los ingresos generados con la venta de LiCl ($Sales^{Cl}$) serán el total producido ($F_t^{tot-Cl-produced}$) multiplicado por el precio unitario de venta, mismo que está asociado a la estacionalidad (UP_t^{Cl}):

$$Sales^{Cl} = \sum_t UP_t^{Cl} F_t^{tot-Cl-produced} \quad (2.89)$$

Venta de LiOH

Los ingresos generados con la venta de LiCl ($Sales^{OH}$) serán el total producido ($F_t^{tot-OH-produced}$) multiplicado por el precio unitario de venta, mismo que está asociado a la estacionalidad (UP_t^{OH}):

$$Sales^{OH} = \sum_t UP_t^{OH} F_t^{tot-OH-produced} \quad (2.90)$$

Venta de Li_2CO_3 a mercados nacionales

Los ingresos generados por la venta de Li_2CO_3 a los mercados nacionales ($Sales^{direct-uses}$) serán la suma de los flujos segregados para cada uno de los mercados ($f_{i,t}^{direct-uses}$) multiplicado su costo unitario en el que considera la estacionalidad ($UP_{q,t}^{Li_2CO_3}$):

$$Sales^{direct-uses} = \sum_i \sum_q \sum_t UP_{q,t}^{Li_2CO_3} f_{i,q,t}^{sent-market} \quad (2.91)$$

Venta de Li_2CO_3 para exportación

Los ingresos generados por la venta de Li_2CO_3 para su exportación ($Sales^{Li_2CO_3-export}$) serán la suma de los flujos segregados para cada uno de los mercados ($f_{j,t}^{export}$) multiplicado su costo unitario en el que considera la estacionalidad ($UP_{j,t}^{Li_2CO_3}$):

$$Sales^{Li_2CO_3-export} = \sum_j \sum_t UP_{j,t}^{Li_2CO_3} f_{j,t}^{export} \quad (2.92)$$

Venta de materia prima a exportación

Los ingresos generados por la venta de materia prima (salmuera y arcilla) para su procesamiento externo ($Sales^{m-export}$) serán igual al flujo destinado a exportar, multiplicado por la diferencia entre el precio unitario de venta y el costo unitario de transporte, mismos que se encuentran en función de la estacionalidad.

$$Sales^{m-export} = \sum_t \left[\sum_s F_{s,t}^{b-export} (UP_{s,t}^b - UTC_{s,t}^b) + \sum_r F_{r,t}^{c-export} (UP_{r,t}^c - UTC_{r,t}^c) \right] \quad (2.93)$$

Venta de subproductos obtenidos

Venta de potasa

Los ingresos generados por las ventas de potasa ($Sales^{potash}$) será la suma del flujo producido ($F^{Potash-produced}$) multiplicado por el precio unitario de la misma (UP_t^{potash}):

$$Sales^{potash} = \sum_s \sum_t UP_t^{potash} F_{s,t}^{Potash-produced} \quad (2.94)$$

Venta de Na_2SO_4

Los ingresos generados por las ventas de Na_2SO_4 ($Sales^{Na_2SO_4}$) será la suma del flujo producido ($F_{i,t}^{Na_2SO_4-Li_2CO_3-produced} + F_{i,t}^{Na_2SO_4-LiOH-produced}$) multiplicado por el precio unitario del mismo ($UP_t^{Na_2SO_4}$):

$$Sales^{Na_2SO_4} = \sum_i \sum_t UP_t^{Na_2SO_4} (F_{i,t}^{Na_2SO_4-Li_2CO_3-produced} + F_{i,t}^{Na_2SO_4-LiOH-produced}) \quad (2.95)$$

Venta de agua

Los ingresos generados por las ventas de agua obtenida de las unidades de desalinización ($Sales^{Water}$) será la suma del flujo producido ($F_{w,t}^{water-avai}$) multiplicado por el precio unitario del mismo (UP_t^{water}):

$$Sales^{Water} = \sum_w \sum_t UP_t^{water} F_{w,t}^{water-avai} \quad (2.96)$$

Ingresos totales

Los ingresos generados por el total de ventas (TS) serán la suma de las expresiones anteriores (2.88-2.95):

$$TS = \left[\begin{array}{l} Sales^{Br} + Sales^{Cl} + Sales^{OH} + Sales^{direct-uses} \\ + Sales^{export} + Sales^{rm-export} + Sales^{potash} \\ + Sales^{Na_2SO_4} + Sales^{Water} \end{array} \right] \quad (2.97)$$

Generación de agua

La generación de agua de cada unidad de desalinización ($F_{w,t}^{water-prod}$) está en función de la cantidad de salmuera que entra a la misma ($F_{w,t}^{in-desal}$) multiplicado por el factor que relaciona las toneladas de salmuera por tonelada de agua producida ($\phi_w^{water-prod}$):

$$F_{w,t}^{water-prod} = F_{w,t}^{in-desal} \phi_w^{water-prod}, \quad \forall w, \forall t \quad (2.98)$$

El agua producida a su vez podrá segregarse hacia cada una de las ciudades aledañas que lo requieran ($F_{w,i,t}^{water-req-sent}$) y el agua disponible para otros usos como la agricultura ($F_{w,t}^{water-avai}$):

$$F_{w,t}^{water-prod} = \sum_n F_{w,n,t}^{water-sent-city}, \quad \forall w, \forall t \quad (2.99)$$

Requerimientos de agua por planta de procesamiento

El flujo total de agua requerido para cada planta de procesamiento ($F^{water-in-pp}$) será igual a la suma del flujo requerido por la producción de Li_2CO_3 a partir de arcilla ($F_{i,t}^{c-water-req}$) y de salmuera ($F_{i,t}^{b-water-req}$) más el requerido por la producción de $LiOH$ a partir de arcilla ($F^{c-OH-water-req}$):

$$F^{water-in-pp} = F_{i,t}^{c-water-req} + F_{i,t}^{b-water-req} + F^{c-OH-water-req} \quad (2.100)$$

Requerimientos de agua para producción de Li_2CO_3 a partir de arcilla

El agua requerida para la producción de Li_2CO_3 a partir de arcilla ($F_{i,t}^{c\text{-water-req}}$) está en función de la producción de este ($f_{i,t}^{c\text{-process-out}}$) multiplicado por un factor que relaciona la cantidad de agua necesaria ($\varphi^{c\text{-water}}$):

$$F_{i,t}^{C\text{-water-req}} = f_{i,t}^{c\text{-process-out}} \varphi_i^{c\text{-water}}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.101)$$

Requerimientos de agua para producción de Li_2CO_3 a partir de salmuera

El agua requerida para la producción de Li_2CO_3 a partir de salmuera ($F_{i,t}^{b\text{-water-req}}$) está en función de la producción de este ($f_{i,t}^{b\text{-process-out}}$) multiplicado por un factor que relaciona la cantidad de agua necesaria ($\varphi^{b\text{-water}}$):

$$F_{i,t}^{Brine\text{-water-req}} = f_{i,t}^{b\text{-process-out}} \varphi_i^{B\text{-water}}, \quad \forall i, \forall t \quad (2.102)$$

Requerimientos de agua para producción de LiOH a partir de arcilla

El agua requerida para la producción de Li_2CO_3 a partir de arcilla ($F^{c\text{-OH-water-req}}$) está en función de la producción de este ($F_{i,t}^{LiOH\text{-clay-produced}}$) multiplicado por un factor que relaciona la cantidad de agua necesaria ($\varphi^{c\text{-OH-water}}$):

$$F^{c\text{-OH-water-req}} = F_{i,t}^{LiOH\text{-clay-produced}} \varphi^{c\text{-OH-water}} \quad (2.103)$$

Costo de transporte de agua vendida

El agua producida por las unidades de purificación de salmuera será en enviada y vendida a las ciudades aledañas, por lo tanto el costo de transporte de agua hacia las ciudades ($Cost^{trans_water_city}$) será igual a la sumatoria del flujo enviado por su costo unitario de transporte ($UTC_{w,i}^{water-city}$):

$$Cost^{trans_water_city} = \sum_w \sum_n \sum_t F_{w,n,t}^{water-sent-city} UTC_{w,n}^{water-city} \quad (2.104)$$

Agua total disponible

El total de agua fresca disponible a partir de la desalinización de las salmueras ($TotWater^{Available}$) es la suma del flujo disponible de cada unidad.

$$TotWater^{Available} = \sum_w \sum_t F_{w,t}^{water-prod} \quad (2.105)$$

Función objetivo

Ganancias totales

Las ganancias totales del proyecto (TP) serán el total generado por las ventas (TS) menos los costos totales de operación (TOC) y costos de capital (TCC):

$$TP = TS - TOC - TCC \quad (2.106)$$

4.3 Escenario II

El escenario II se asemeja notablemente al descrito en el capítulo 3, con la excepción descrita en la sección 4.1, es decir, la implementación de unidades de desalinización para concentrar la salmuera virgen como se puede observar en la **Figura 4.1** al inicio de este capítulo.

4.3 Resultados y discusión

Para dar solución al escenario II se utilizaron los datos presentados en el Apéndice I. Una vez que se aplica la metodología propuesta en este capítulo con los datos necesarios, se analizan diferentes casos (A2-D2) que muestran diferentes niveles de demanda en los mercados nacionales, con el objetivo de ampliar el análisis de los resultados. En el escenario A2, se contempla la demanda actual de compuestos de litio en México; el escenario B2 contempla un aumento mínimo en la demanda, llegando a 100,000 ton al año debido a la instalación de nuevas industrias que requieran este tipo de compuestos. En los escenarios C2 y D2 se proyecta una demanda de 150,000 ton al año. La diferencia entre estos últimos radica en que en el escenario D2 se realiza un ajuste de precios de venta de Li_2CO_3 con el finde cubrir el 100% de los requisitos de demanda. Además, se considera el porcentaje de cada

componente con respecto a la demanda total de 71, 24, 2.5 y 2.5% para el Li_2CO_3 , LiOH , LiBr y LiCl respectivamente.

Caso A2

El caso A1 muestra una demanda interna de 600 toneladas al año, cifra que corresponde a una estimación precisa. Los resultados de este escenario se muestran en la **Figura 4.2**. Además, es posible visualizar que todas las zonas de producción producen a su máxima capacidad, sin embargo, únicamente se exporta arcilla. Además, se muestran las plantas de procesamiento seleccionadas, cada una con tecnologías y capacidades de producción diferentes. Por otra parte, a pesar de existir exportación de Li_2CO_3 , no se cubre la demanda interna en todos los mercados. Además, no existe producción de LiBr , LiCl ni LiOH debido a que la baja demanda no justifica la implementación de estas tecnologías.

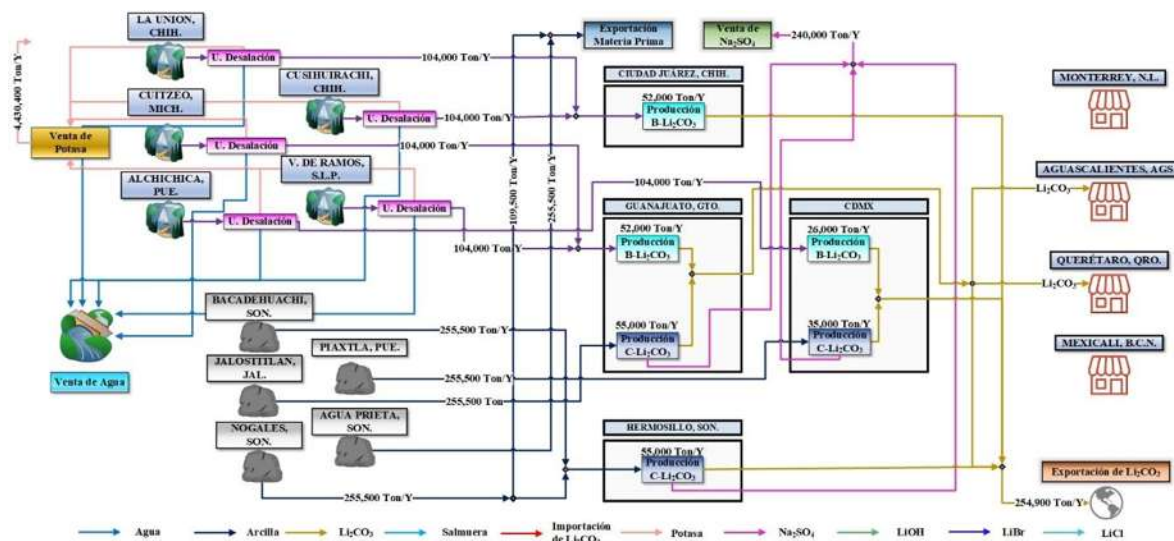


Figura 4.2 Solución al caso A2 del Escenario II.

Caso B2

El caso B2 muestra un incremento en la demanda interna a 100,000 toneladas al año, cifra que corresponde a una estimación mínima esperada. Los resultados de este escenario se muestran en la **Figura 4.3** mostrada a continuación:

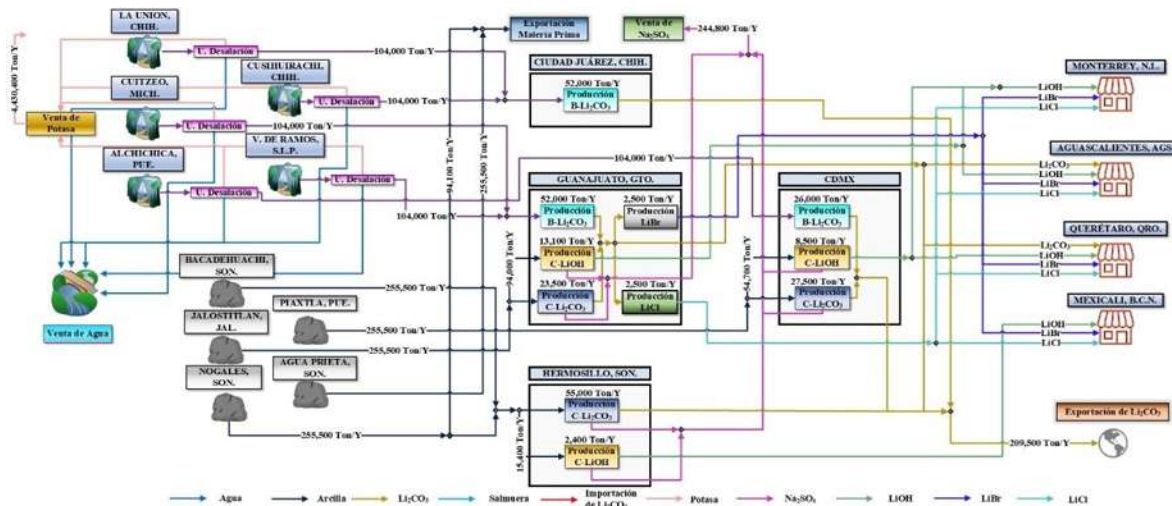


Figura 4.3 Solución al caso B2 del Escenario II.

Adicionalmente, en la **Figura 4.3** se evidencia cómo, en comparación con la resolución del caso A2, ahora se generan los compuestos LiBr , LiCl y LiOH . Asimismo, la necesidad de LiOH se cubre exclusivamente mediante la producción derivada de arcilla. En este contexto, la demanda de LiBr , LiCl y LiOH se satisface plenamente en todos los mercados; sin embargo, la de Li_2CO_3 no se cumple ni en Monterrey ni en Mexicali, al igual que en el Escenario I. Es relevante señalar la reducción en las exportaciones de Li_2CO_3 , debido al incremento en la demanda a nivel nacional.

Caso C2

El caso C2 muestra un incremento en la demanda interna a 150,000 toneladas al año, cifra que corresponde a una estimación probable. Los resultados de este escenario se representan en la **Figura 4.4** mostrada a continuación:

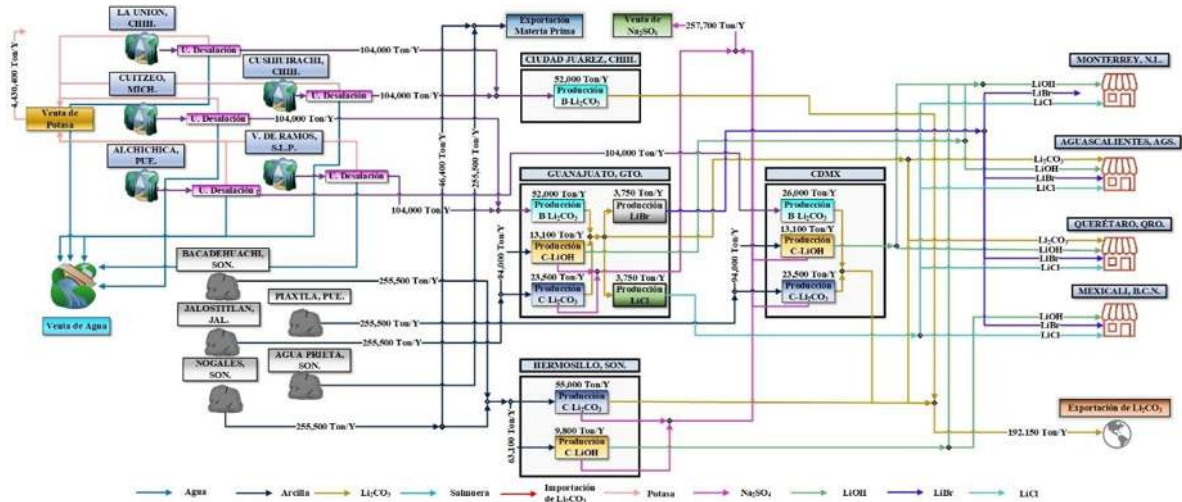


Figura 4.4 Solución al caso C2 del Escenario II.

La solución al caso C2 comparte muchas similitudes con la del caso B2, siendo las únicas diferencias las capacidades de producción de las instalaciones de procesamiento. Sin embargo, aún persiste la carencia de suministro de Li_2CO_3 para Monterrey y Mexicali. Al analizar detenidamente la solución, se observa que la demanda de estos mercados no se satisface debido a los costos de transporte asociados con la distancia. Por consiguiente, se plantea el caso D2 como propuesta para solucionar esta problemática.

Caso D2

El caso D2 mantiene la misma demanda que el caso C2, es decir, 150,000 toneladas al año. Sin embargo, para asegurar la completa satisfacción de las necesidades de Li_2CO_3 en Monterrey y Mexicali, se efectúa una modificación en el precio de venta de Li_2CO_3 correspondiente a 2.52 y 2.55 % respectivamente. Este ajuste en el costo de venta permitirá cubrir los gastos relacionados con el transporte hacia su destino final. La **Figura 4.5** muestra las interacciones requeridas para alcanzar el suministro total de compuestos de litio.

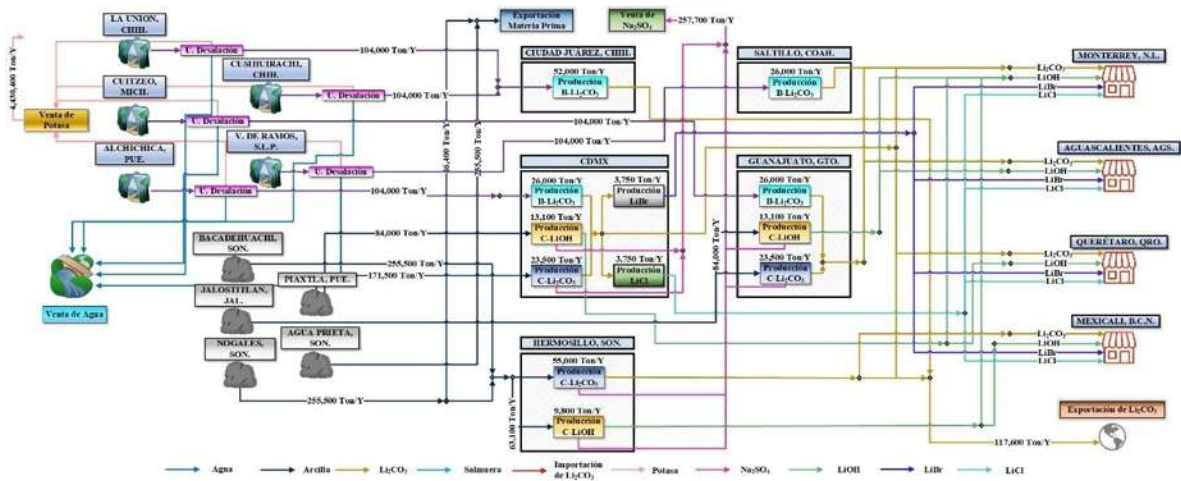


Figura 4.5 Solución al caso D2 del Escenario II.

Además, es importante mencionar que a diferencia de los casos anteriores donde la producción de LiBr y LiCl se efectúa en la planta de procesamiento de Guanajuato, en este caso, la producción de estos compuestos se traslada a la planta de la CDMX. Además, las capacidades de producción se mantienen similares al escenario C2.

Análisis global de escenario II

Con el propósito de efectuar una comparación directa entre los casos A2-D2, se lleva a cabo el siguiente análisis global. La elección de las instalaciones de procesamiento designadas por el modelo y las tecnologías incorporadas, se presenta la **Tabla 4.1**.

Tabla 4.1 Tecnologías seleccionadas en Escenario II.

Unidades de Procesamiento	Casos Escenario I			
	A	B	C	D
Salmuera	<ul style="list-style-type: none"> • CDMX • Guanajuato • C. Juárez 	<ul style="list-style-type: none"> • CDMX • Guanajuato • C. Juárez 	<ul style="list-style-type: none"> • CDMX • Guanajuato • C. Juárez 	<ul style="list-style-type: none"> • CDMX • Guanajuato • C. Juárez • Saltillo
Arcilla-Li ₂ CO ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato
Arcilla-LiOH	--	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Hermosillo • CDMX • Guanajuato
Li ₂ CO ₃ -LiBr	--	<ul style="list-style-type: none"> • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • CDMX
Li ₂ CO ₃ -LiCl	--	<ul style="list-style-type: none"> • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • Guanajuato 	<ul style="list-style-type: none"> • CDMX
Li ₂ CO ₃ -LiOH	--	--	--	--

Por su parte, en la **Tabla 4.2**, se detallan las capacidades óptimas de cada tecnología identificadas por el modelo, además de las cantidades de materia prima y Li_2CO_3 exportadas para cada caso. Es importante destacar que la exportación disminuye un 38% en el caso D2 con respecto al caso C2 al igual que en el Escenario I. Esta disminución se debe al hecho de que en el escenario D2 se satisface por completo la demanda de Li_2CO_3 . Es importante destacar que para el caso A2, no se lleva a cabo la producción de LiOH por ninguna vía.

En este sentido, en la **Tabla 4.3** se encuentran desglosados los costos de transporte de cada ruta, junto con los costos operativos y de capital, además de los ingresos generados por las ventas.

Tabla 4.2 Capacidades óptimas en Escenario II.

Concepto	Caso A2	Caso B2	Caso C2	Caso D2
Demanda Nacional (ton/ Año)	600	100,000	150,000	150,000
Capacidades Óptimas				
Plantas de Procesamiento de Salmuera (ton/año)				
CDMX	26,000	26,000	26,000	26,000
Guanajuato	52,000	52,000	52,000	26,000
Ciudad Juárez	52,000	52,000	52,000	52,000
Saltillo	--	--	--	26,000
Producción Total	130,000	130,000	130,000	130,000
Plantas de Procesamiento de Arcilla-Li_2CO_3 (ton/año)				
Hermosillo	55,000	55,000	55,000	55,000
CDMX	35,000	27,500	23,500	23,500
Guanajuato	55,000	23,500	23,500	23,500
Producción Total	145,000	106,000	102,000	102,000
Plantas de Procesamiento de Arcilla-LiOH (ton/año)				
Hermosillo	--	2,400	9,800	9,800
CDMX	--	8,500	13,100	13,100
Guanajuato	--	13,100	13,100	13,100
Producción Total	0	24,000	36,000	36,000
Plantas de Producción de LiBr y LiCl (ton/año)				
Guanajuato				
Producción de LiBr	--	2,500	3,750	--
Producción de LiCl	--	2,500	3,750	--
CDMX				
Producción de LiBr	--	--	--	3,750
Producción de LiCl	--	--	--	3,750
Exportación de Arcilla (ton/año)	365,000	349,500	301,900	301,900
Exportación de Li_2CO_3 (ton/año)	254,900	209,500	192,160	117,600

La función objetivo, que representa las ganancias aumenta un 6.43 % del caso B2 al A2, y un 2.97 % del caso C2 con respecto al B2. Por otro lado, el caso D2 muestra un aumento

del 2.30 % con respecto al C2. Sin embargo es relevante resaltar que en el escenario D2 se logra satisfacer la demanda de todos los compuestos de litio al 100%.

Por su parte, la cantidad de recursos hídricos necesarios para la producción es consistente en todos los casos asciende a las 260,000 ton de agua/año debido a que la producción es uniforme en cada caso, lo que varía es la exportación de Li_2CO_3 . Sin embargo, con la implementación de las unidades de desalinización de salmuera se obtiene una generación de agua apta para usos cotidianos de 4,368,000 ton.

En el siguiente capítulo se hace una comparación directa de los escenarios I y II. En donde se compara el impacto de la implementación de las unidades de desalinización.

Tabla 4.3 Desglose de costos e ingresos en Escenario II.

Concepto	Caso A2	Caso B2	Caso C2	Caso D2
Costos de Transporte (Millones USD/año)				
Zona de Extracción Salmuera – Planta de Procesamiento	347.183	347.183	347.183	372.081
Zona de Extracción Arcilla – Planta de Procesamiento	548.601	559.309	592.469	592.469
Li ₂ CO ₃ Plantas de Procesamiento - Mercados	0.053	8.760	13.139	107.384
Li ₂ CO ₃ Plantas de Procesamiento - Exportación	191.155	157.091	144.122	88.209
LiBr Plantas de Procesamiento - Mercados	0	4.325	6.487	8.614
LiCl Plantas de Procesamiento - Mercados	0	4.325	6.487	8.614
LiOH Plantas de Procesamiento – Mercados	0	35.242	69.042	69.042
Transporte Venta de Agua	0.149	0.149	0.149	0.149
Costos totales de transporte (TTC)	1,087.141	1,116.384	1,179.078	1,246.562
Costos de Operación (Millones USD/año)				
Extracción de Salmuera	12.480	12.480	12.480	12.480
Extracción de Arcilla	511	511	511	511
Unidades de Procesamiento de Salmuera Virgen	24.960	24.960	24.960	24.960
Unidades de Procesamiento de Salmuera Concentrada	2,561.520	2,561.520	2,561.520	2,561.520
Unidades de Procesamiento de Arcilla-Li ₂ CO ₃	5,485.048	4,651.496	4,475.207	4,475.207
Unidades de Procesamiento de Arcilla-LiOH	0	971.244	1,456.865	1,456.865
Unidades de Producción de LiBr	0	9.188	13.781	13.781
Unidades de Producción de LiCl	0	9.188	13.781	13.781
Costos totales de operación de plantas de procesamiento (TOPC)	8,595.008	8,751.076	9,069.594	9,069.594
Costos operativos totales (TOC)	9,682.149	9,867.460	10,248.672	10,316.156
Costos de Capital (Millones USD)				
Unidades de Procesamiento de Salmuera Virgen	35.565	35.565	35.565	35.565
Unidades de Procesamiento de Salmuera Concentrada	15.931	15.931	15.931	20.973
Unidades de Procesamiento de Arcilla-Li ₂ CO ₃	15.489	15.430	15.417	15.417
Unidades de Procesamiento de Arcilla-LiOH	0	8.002	8.233	8.233
Unidades de Producción de LiBr	0	2.520	2.520	2.520
Unidades de Producción de LiCl	0	2.538	2.538	2.538
Costos totales de capital (TCC)	66.985	79.986	80.204	85.246
Ingresos Generados por Ventas (Millones USD/año)				
Venta de Li ₂ CO ₃ a Mercados	6.007	1,011.750	1,517.625	5,150.622
Venta de Li ₂ CO ₃ para Exportación	11,979.045	9,844.383	9,031.633	5,527.783
Venta de LiBr	0	147.500	221.250	221.250
Venta de LiCl	0	147.500	221.250	221.250
Venta de LiOH	0	1,334.400	2,001.600	2,001.600
Venta de Potasa	1,107.600	1,107.600	1,107.600	1,107.600
Venta de Na ₂ SO ₄	955.208	974.342	1,025.788	1,025.788
Exportación de Arcilla	225.383	215.868	186.406	186.406
Venta de Agua	8.736	8.736	8.736	8.736
Ventas totales (TS)	14,282.042	14,792.078	15,321.888	15,451.035
Ganancias Totales (Millones USD/año)				
Función Objetivo	4,532.908	4,844.632	4,993.012	5,049.633

Capítulo 5. Comparación de escenario I y escenario II.

Con el propósito de aclarar las diferencias entre los escenarios I y II expuestos en los capítulos 3 y 4 de este proyecto, se procede a compararlos detalladamente.

Ambos códigos fueron ejecutados en un equipo de cómputo con un procesador Intel(R) Core (TM) i5-1035G4 CPU @ 1.10GHz 1.50 GHz y 8.0 GB de memoria RAM utilizando los solvers DICOPT y CPLEX. Por su parte, las diferencias en cuanto a programación matemática se refieren, se muestran a continuación en la **Tabla 5.1**.

Tabla 5.1 Diferencias de modelos.

	Escenario I	Escenario II
Ecuaciones	4792	5591
Variables	8296	8773
Variables Binarias	60	65
Tiempo de cómputo (s)	1.631	2.068

Por su parte, analizando los resultados obtenidos de cada escenario, las **Figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5** muestra la satisfacción de la demanda de cada uno de los compuestos en los escenarios I y II. Es importante señalar que en los casos A1 y A2, hay una diferencia en la satisfacción de la demanda de LiOH en cada mercado, ya que en el escenario A2 no se produce este compuesto. No obstante, los casos B, C y D en ambos escenarios muestran un comportamiento similar en cuanto a la satisfacción de la demanda.

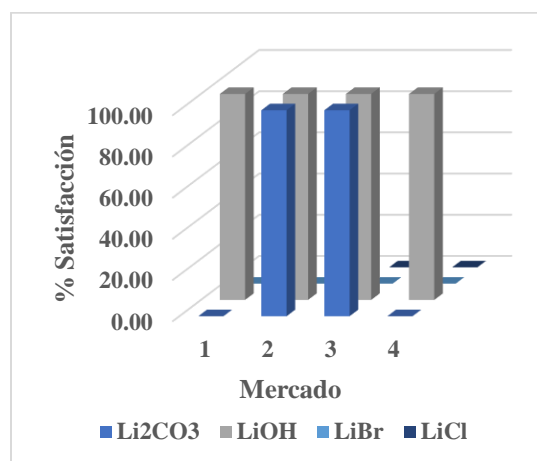


Figura 5.1 Satisfacción de demanda caso A1.

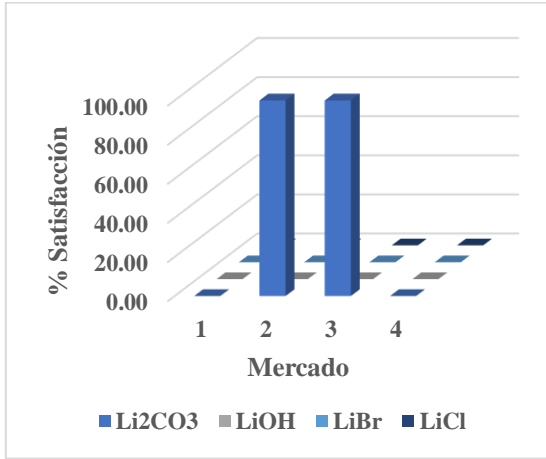


Figura 5.2 Satisfacción de demanda caso A2.

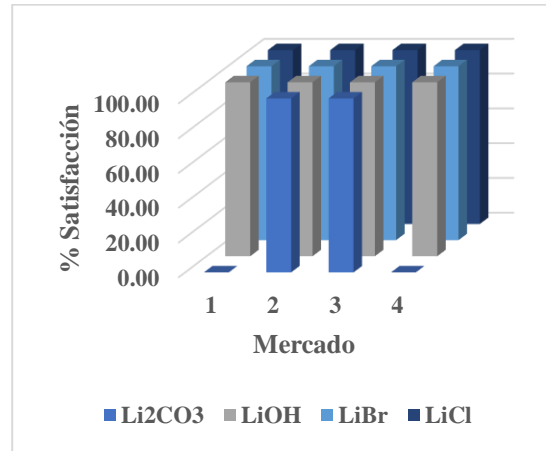


Figura 5.4 Satisfacción de demanda caso C1 y C2.

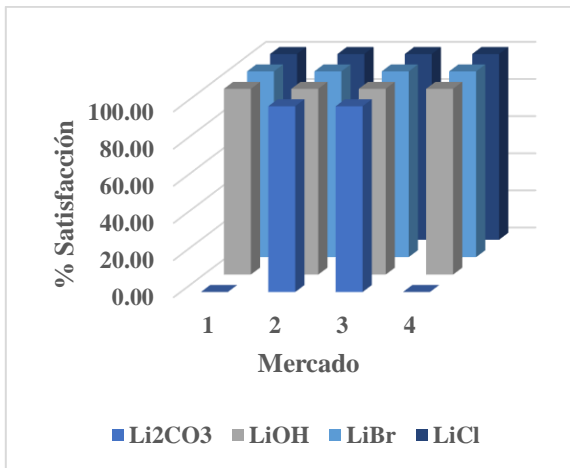


Figura 5.3 Satisfacción de demanda casos B1 y B2.

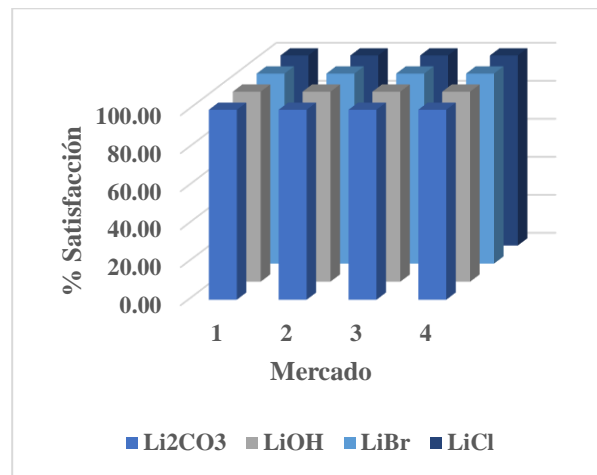


Figura 5.5 Satisfacción de demanda caso D1 y D2.

En relación con el análisis del recurso hídrico se refiere, el escenario I registra un consumo de 260,000 ton de agua en cada caso. En contraste, el escenario II, al incorporar las unidades de desalinización se tiene una producción de 4,368,000 ton. Realizando un balance general, se obtiene que al momento de implementar estas unidades se puede cubrir la demanda de agua para la producción de compuestos de litio, y además se genera un excedente del 94.04%. Este mismo podría utilizarse para satisfacer las necesidades hídricas de ciudades cercanas a la zona, en actividades agrícolas u otros usos cotidianos. Cabe destacar que debido a los procesos de separación aplicados en dichas unidades, el agua obtenida cumple con los estándares necesarios para su utilización en diversas actividades según la zona de extracción.

Por su parte la Figura 5.6 representa el agua producida y necesaria durante el horizonte del proyecto en ambos escenarios. Es importante notar que para el caso A, se tiene un déficit del 20.4 %, es decir, se requiere un 20.4 % más de agua en el proceso global con respecto a la obtenida por las unidades de desalinización. En este sentido, los casos B, C y D presentan una disminución del déficit a un 9.20 y 8.61 % respectivamente. Por lo tanto, es evidente que la presencia de un aumento en la producción de compuestos de litio, disminuye el impacto en cuanto al recurso hídrico se refiere. Sin embargo, la disminución está directamente asociada con el incremento en la producción de LiOH, el cual tiene un menor consumo de agua durante su producción.

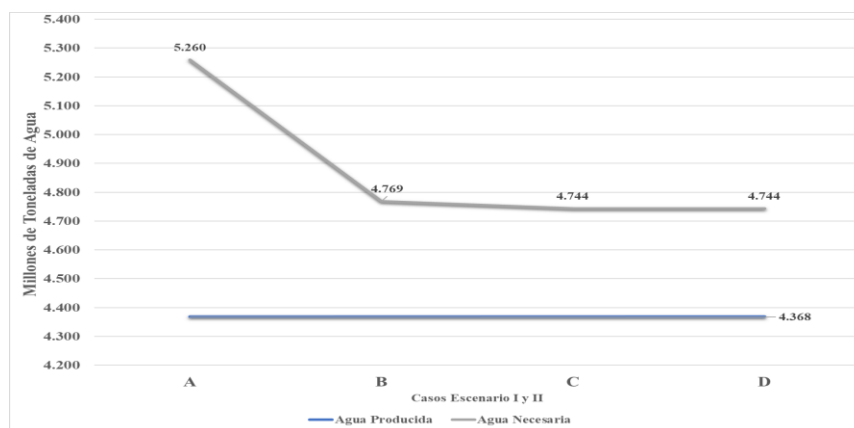


Figura 5.6 Agua producida vs agua necesaria.

Por otro lado, en cuanto a las ganancias obtenidas por cada escenario es importante destacar las diferencias existentes con y sin las unidades de desalinización. Por consiguiente,

en la **Tabla 5.2** se muestran las diferencias económicas presentes en cada escenario. Es notable que en los casos D, la diferencia económica es muy poca, en comparación con el beneficio obtenido por la producción de agua.

Tabla 5.2. Diferencias en función objetivo de Escenario I y II.

Escenario I	Diferencia (%)	Escenario II
A1	1.32	A2
B1	1.12	B2
C1	0.99	C2
D1	0.23	D2

Capítulo 6. Conclusiones

En este trabajo se presentan dos nuevos modelos para la implementación de una cadena de suministro de los principales compuestos de litio, cumpliendo con los requerimientos necesario, y cuidando la sustentabilidad. En los modelos propuestos, se realiza la integración másica de las diversas fuentes de materia prima con unidades de procesamiento en las que se incluyen diversas tecnologías y mercados que demande compuestos de litio. En el segundo modelo presentado en el capítulo 4 se incluye la implementación de unidades de desalinización con la tecnología adecuada que permita realizar la concentración de la salmuera virgen. En este sentido, estas unidades demuestran tener numerosas ventajas entre las que destacan la gran producción de agua apta para su uso en actividades cotidianas, además de quitar la limitante de las grandes áreas necesarias para la evaporación solar y la dependencia a las condiciones climatológicas del área, siendo entonces posible el procesamiento de salmuera en cualquier área que cumpla con los requerimientos.

Por su parte, los resultados muestran que la diferencia económica de la implementación de unidades de desalinización es mínima, siendo únicamente un 0.23%. Es decir, con una mayor inversión inicial es posible llevar a cabo la producción de todos los compuestos de litio, producir y vender agua que a su vez ayude a mitigar los efectos de sequía en las zonas de explotación de salmuera y a su vez, hacer el proceso de concentración de salmuera más controlable y adaptable a la demanda mundial. Además, la implementación de una cadena de suministro de compuestos de litio en México es posible, rentable y sustentable con el medio ambiente.

Además, es importante mencionar que los modelos desarrollados son generales y pueden aplicarse para cualquier caso de estudio deseado siempre y cuando se tengan los datos pertinentes. Finalmente, las metodologías desarrolladas en este proyecto servirán como punto de partida para investigaciones en el tema a nivel nacional e internacional.

Bibliografía

- AMIA, Asociación mexicana de la industria automotriz a. c. (2023). *Reporte de venta de vehículos híbridos y eléctricos*.
- Baspineiro, C., Franco, J., & Flexer, V. (2020). Potential water recovery during lithium mining from high salinity brines. *Sci. Total Environ*, 720, 137523. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137523>
- Basudev, S. (2017). Recovery and recycling of lithium: A review. *Separation and Purification Technology*, 172, 388-403. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.08.031>
- Bibienne, T., Magnan, J.-F., Rupp, A., & Laroche, N. (2020). From mine to mind and mobiles: Society's increasing dependence on lithium. *Elements*, 16, 265-270. <https://doi.org/10.2138/gselements.16.4.265>
- Bowell, R. J., Lagos, L., de los ojos, C. R., & Declercq, J. (2020). Classification and Characteristics of Natural Lithium Resources. 259-264.
- BP. (2015). *BP Energy Outlook 2035: growing gas and shifting flows*. Obtenido de <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-energy-outlook-2035.html>
- C&EN. (22 de Enero de 2024). *Cheaper electric vehicle batteries will be here to stay*. Recuperado en Enero de 2024, de https://cendigitalmagazine.acs.org/2024/01/19/cheaper-electric-vehicle-batteries-will-be-here-to-stay/content.html?utm_email+=24F61427D49F948D14E5F5AAEF
- Castilla, J. C., Meza, F. J., Vicuña, S., Marquet, P., & Montero, J. P. (2019). *Cambio climático en Chile: ciencia, mitigación y adaptación*. Ediciones UC.
- Comisión Chilena del Cobre. (2020). *Oferta y demanda de litio hacia el 2030*.

- Dai, Q., Kelly, J. C., Gaines, L., & Wang, M. (2019). Life cycle analysis of lithium-ion batteries for automotive applications. *Batteries*, 5(48). <https://doi.org/doi:10.3390/batteries5020048>
- Diaz Paz, W. F., Escosteguy, M., Seghezzi, L., Huffly, M., Kruse, E., & Iribarnegaray, M. A. (2023). Lithium mining, water resources, and socio-economic issues in northern Argentina: We are not all in the same boat. *Elsevier, Resources Policy*, 81, 103288. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103288>
- Dubois, A., & Seminario Hurtado, N. (2019). Paris Agreement: Instrument of international law in the fight against climate warming. *Lumen*, 15(1), 62-68. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3855837>
- Dwight, B. C., Stillings, L., Jaskula, B., Munk, L., & McCauley, A. (2017). *Critical Mineral Resources of the United States-Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply*. U.S.G.S.
- Escudero Martínez, L., & Álvarez, D. I. (2021). *Modelización del yacimiento y planificación de la explotación a largo plazo de una mina de Litio con Surpac*. Oviedo.
- Flexer, V., Baspineiro, C. F., & Galli, C. I. (2018). Lithium recovery from brines: a vital raw material for green energies with a potential environment impact in its mining and processing. *Science of The Total Environment*, 639, 1188-1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>
- Gallego, J. (2020). Emisiones de CO₂ del sector energético y fuentes renovables en América Latina y el Caribe. *Cepei*.
- Gao, T.-m., Fan, N., Chen, W., & Dai, T. (2023). Lithium extraction from hard rock lithium ores (spodumene, lepidolite, zinnwaldite, petalite): Technology, resources, environment and cost. *China Geology*, 6, 137-153. <http://dx.doi.org/10.31035/cg2022088>

- Gunther, M., Rentsch, L., Hock, M., & Bertau, M. (2017). Lithium market research-global supply, future demand and price development. *Energy Storage Materials*, 6, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2016.11.004>
- IEA. (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the global energy sector*. Paris: OECD, Publishing. <https://doi.org/10.1787/c8328405-en>
- INEGI. (2023). *Registro administrativo de la industria automotriz de vehículos ligeros*. Recuperado el Diciembre de 2023, de <https://www.inegi.org.mx/datosprimarios/iavl/>
- Jandová, J., Dvorák, P., Kondás, J., & Havlák, L. (2012). Recovery of lithium from waste materials. *Ceramics-Silikáty*, 56, 50-54.
- Jaskula, B. (2019). *Statistics and information on the worldwide supply of, demand for, and flow of the mineral commodity lithium*. U. S. Geological Survey. Recuperado el Diciembre de 2023, de <https://www.usgs.gov/centers/nmic/lithium-statistics-and-information>
- Jaskula, B. (Enero, 2023). *Mineral Commodity Summaries*. U. S. Geological Survey. Recuperado en Diciembre de 2023, de <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2023/mcs2023-lithium.pdf>
- Jerez, B. (2018). *Impacto socio ambiental de la extracción de litio en las cuencas de los salares altos andinos del Cono Sur*. Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina.
- 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 & Recycling*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105762>
- Ling, Z., Shi, C., Li, F., Fu, Y., Zhao, J., Dong, H., . . . Song, Y. (2020). Desalination and Li⁺ enrichment via formation of cyclopentane hydrate. *Separation and Purification Technology*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115921>

- Liu, W., & B. Agusdinata, D. (2020). Interdependencies of lithium mining and communities sustainability in salar de atacama, Chile. *Journal of Cleaner Production*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120838>
- Macedonio, F., & Drioli, E. (2017). Advanced membrane-based desalination systems for water and minerals extracted from the sea. En *Desalination Sustainability* (págs. 237-259). Elsevier. <https://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-809791-5.00006-7>
- Marmolejo Cervantes, M. Á., & Garduño Rivera, R. (2022). Mining-energy public policy of lithium in Mexico: Tension between nationalism and globalism. *Resources Policy*, 77. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102686>
- Meng, F., Mcneice, J., S. Zadeh, S., & Grahreman, A. (2019). Review of lithium production and recovery from minerals, brines, and lithium ion batteries. *Mineral Processing and extractive metallurgy review*. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1668387>
- Obaya, M., & Céspedes, M. (2021). *Análisis de las redes globales de producción de baterías de ion de litio: Implicaciones para los países del triángulo del litio*. Santiago: Documentos de Proyectos (LC/TS.2021/58), Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Ramones Fernández, F. (2016). *Energías limpias: el reto eléctrico en México*. Centro de Investigación Económica y Presupuestaria, A. C., Transición energética y finanzas públicas.
- Sakunai, T., Ito, L., & Tokai, A. (2021). Environmental impact assessment on production and material supply stages of lithium-ion batteries with increasing demands for electric vehicles. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23, 470-479. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01166-4>
- SE, S. D. (Enero, 2021). *Perfil de mercado del Litio*.
- SENER. (2020). Demanda y consumo 2020 - 2034. En SENER.

- Serrano Moreno, J. R. (2020). México con Chihuahua y Sonora, Mayor depósito mundial de litio: un recurso destinado a suplantar sociedades fincadas en petróleo. En *Factores críticos y estratégicos en la interacción territorial desafíos actuales y escenarios futuros* (Vol. 1). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C.
- SGM, S. G. (2015). *Monografía del Litio*.
- Shao, L., & Jin, S. (2020). Resilience assessment of the lithium supply chain in China under impact of new energy vehicles and supply interruption. *Journal of Cleaner Production*, 252(119624). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119624>
- Solis Avila, J. C., & Sheinbaum Pardo, C. (2016). Energy consumption and CO2 emission from road transport in Mexico and mitigation scenarios. *Revista Internacioanal de Contaminación Ambiental*, 31(1).
- Stamp, A., J.Lang, D., & A. Wager, P. (2012). Environmental impacts of a transition toward e-mobility: the present and future role of lithium carbonate production. *Journal of Cleaner Production*, 23, 104-112. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.026>
- Sticco, M., Scravaglieri, P., & Damiani, A. (2019). *Estudio de los Recursos Hidricos y el Impacto por Explotación Minera de Litio. Cuenca Salinar Grandes y Laguna Guayatayoc - Provincia de Jujuy*. Fundación Ambiente y Recursos Naturales (FARN).
- Sun, X., Hao, H., Hartmann, P., Liu, Z., & Zhao, F. (2019). Supply risks of lithium-ion battery materials: An entire supply chain estimation. *Materials today energy*, 14(100347). <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2019.100347>
- USGS. (2017). *Minerals Yearbook - Lithium [Advance Release]*.
- USGS. (2019). *Lithium Statistics and Information*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/centers/nmic/lithiumstatistics-and-information>

- Vera, M. L., Torres, W. R., Galli, C. I., Chagnes, A., & Flexer, V. (2023). Environmental impact of direct lithium extraction from brines. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00387-5>
- Wang, J., Yang, S., Bai, R., Chen, Y., & Zhang, S. (2019). Lithium recovery from the mother liquor obtained in the process of Li_2CO_3 production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58, 1363-1372. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05495>
- Xu, Z., Zhang, H., Wang, R., Gui, W., Liu, G., & Yang, Y. (2014). Systematic and direct production of battery-grade lithium carbonate from a saline lake. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, 16502-16507. <https://dx.doi.org/10.1021/ie502749n>
- Zhang, H., Shen, D., GAO, D., Wang, S., Guo, Y., & Deng, T. (2012). Lithium Recovery Techniques from Solid and Liquid Mineral Resources. *Advanced Materials Research*, 549, 528-531.
- Zhou, N., Su, H., Wu, Q., Hu, S., Xu, D., Yang, D., & Cheng, J. (2022). China's lithium supply chain: Security dynamics and policy countermeasures. *Resources Policy*, 78(102866). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.102866>

Capítulo 7. Apéndices

Apéndice I

Los datos utilizados para la implementación de los modelos presentados se muestran a continuación:

- El horizonte del proyecto contempla 12 meses, es decir, un año.
- Se considera la explotación de 5 zonas de extracción de salmuera y 5 zonas de extracción a partir de arcilla.
- La producción máxima de salmuera concentrada (6%) por zona es de 8,666.64 ton/mes.
- Al producir una tonelada de salmuera concentrada se producen a la vez 8.52 ton de Potasa como subproducto.
- La producción máxima de arcilla concentrada (>63%) por zona es de 21,291.62 ton/mes.
- Para producir una tonelada de Li_2CO_3 es necesario alimentar 4 ton de salmuera concentrada.
- Para producir una tonelada de Li_2CO_3 a partir de arcilla es necesario alimentar 7.3 ton de arcilla concentrada (Kelly y Col., 2021).
- Al producir cada tonelada de Li_2CO_3 a partir de arcilla se obtiene como subproducto 1.92 ton de Na_2SO_4 (Kelly y Col., 2021).
- Para producir una tonelada de LiOH a partir de arcilla es necesario alimentar 6.42 ton de arcilla concentrada (Kelly y Col., 2021).
- Al producir cada tonelada de LiOH a partir de arcilla se obtiene como subproducto 1.72 ton de Na_2SO_4 (Kelly y Col., 2021).
- Los porcentajes de demanda existentes de cada uno de los compuestos es: Li_2CO_3 -71%, LiOH -24%, LiBr -2.5% y LiCl -2.5%.
- La capacidad mínima que hace viable la instalación de cada una de las tecnologías en las plantas de producción de derivados es igual a 1000 ton/año.

- La capacidad máxima de producción de Li_2CO_3 para las tecnologías de procesamiento de salmuera es de 52,000.00 ton/año.
- La capacidad máxima de producción de Li_2CO_3 para las tecnologías de procesamiento de arcilla es de 55,000.00 ton/año.
- El precio unitario de extracción de salmuera virgen es de \$1.00 USD/ton.
- El precio unitario de extracción de arcilla virgen es de \$400.00 USD/ton.
- El costo unitario de procesamiento de salmuera virgen es de \$2.00 USD/ton (Macedonio & Drioli, 2017).
- El factor de recuperación de agua en las unidades de desalinización es de 0.35 (Baspineiro y col., 2020).
- Los requerimientos de agua para la producción de Li_2CO_3 a partir de salmuera son 2 ton agua/ton Li_2CO_3 (Kelly y col., 2021).
- Los requerimientos de agua para la producción de Li_2CO_3 y LiOH a partir de arcilla son 40 y 11.24 ton agua/ton producida (Kelly y col., 2021).