



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO
ADMINISTRATIVAS

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA ECONOMÍA
AGRÍCOLA

**HORIZONTE DE AGOTAMIENTO DEL LITIO:
¿CUÁNTO TIEMPO QUEDA?
TESIS**

Que como requisito parcial para obtener el grado de:
DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

Presenta:

PABLO IVÁN FLORES GONZÁLEZ

Bajo la supervisión de:

DR. MIGUEL ÁNGEL MARTÍNEZ DAMIÁN



Chapingo, Estado de México, a octubre de 2026

Horizonte de agotamiento del litio: ¿Cuánto tiempo queda?

Tesis realizada por **PABLO IVÁN FLORES GONZÁLEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

DIRECTOR: 
DR. MIGUEL ÁNGEL MARTÍNEZ DAMIÁN

CODIRECTOR: 
DRA. DIXIA DANIA VEGA VALDIVIA

ASESOR: 
DR. JUAN HERNÁNDEZ ORTÍZ

LECTOR EXTERNO: 
DRA. ARACELI GONZÁLEZ JUÁREZ

CONTENIDO

Lista de Cuadros.....	iv
Lista de Figuras	iv
Abreviaturas usadas	v
Dedicatorias	vii
Agradecimientos	viii
Datos biográficos	ix
RESUMEN GENERAL.....	x
ABSTRACT.....	xi
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	12
1.1 Planteamiento del problema	13
1.2 Justificación	17
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo general:	19
1.3.2 Objetivos específicos:.....	19
1.4 Hipótesis	19
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
2.1 Economía de los recursos naturales.....	20
2.2 Importancia económica del litio.....	23
2.3 El litio como mineral estratégico	26
2.4 Literatura citada	29
CAPÍTULO 3. HORIZONTE DE AGOTAMIENTO DE LITIO: UN ENFOQUE EN STOCK FIJO 31	
CAPÍTULO 4. EFICIENCIA EXTRACTIVA DEL LITIO: ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAÍSES PRODUCTORES MEDIANTE ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS	56
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES.....	79
CAPÍTULO 6. LITERATURA CITADA.....	80

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Producción mundial de litio.....	15
Cuadro 2. Riesgos asociados al crecimiento del consumo de litio.....	16
Cuadro 3. Salida de resultados del modelo del logaritmo natural precio de litio.....	37
Cuadro 4. Salida de resultados del modelo de las reservas efectivas de litio.....	38
Cuadro 5. Variables utilizadas en el análisis de eficiencia extractiva del litio, 2025.....	60
Cuadro 6. Eficiencia extractiva y precios sombra de los países productores de litio, 2025.....	61

Lista de Figuras

Figura 1. Trayectorias proyectadas del precio del litio y del agotamiento de las reservas bajo un escenario de stock fijo, 2025 – 2093.....	41
Figura 2. Mapa de los productores de litio y su eficiencia extractiva, 2025.....	63

Abreviaturas usadas

Abreviatura	Palabras	Significado
ARMA	Autoregressive Moving Average (Modelo Autorregresivo de Media Móvil)	Modelo estadístico para el análisis, modelación y pronóstico de series de tiempo.
BEV	Battery Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico de Batería)	Automóvil impulsado exclusivamente por motores eléctricos alimentados con baterías recargables.
BGS	British Geological Survey (Servicio Geológico Británico)	Instituto del Reino Unido especializado en investigación geológica y estadísticas de minerales a nivel mundial.
CIIU / ISIC	Clasificación Industrial Internacional Uniforme / International Standard Industrial Classification	Estructura de clasificación de la ONU para categorizar de forma homogénea las actividades económicas.
CP	Código Postal	Esquema numérico asignado a zonas geográficas para la organización del correo postal.
CURP	Clave Única de Registro de Población	Código alfanumérico oficial de identificación individual para residentes y ciudadanos de México.
DEA	Data Envelopment Analysis (Análisis Envolvente de Datos)	Técnica no paramétrica de programación lineal utilizada para medir la eficiencia relativa de unidades productivas.
DMU	Decision Making Unit (Unidad Económica de Decisión)	Entidad o país sujeto de evaluación dentro de los modelos de eficiencia tipo DEA.
EBM	Epsilon-Based Measure (Medida Basada en Épsilon)	Modelo de evaluación en DEA que combina dimensiones radiales y no radiales de eficiencia.
EUA	Estados Unidos de América	País de América del Norte incluido en los análisis de reservas, producción y eficiencia del litio.

HEV	Hybrid Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico Híbrido)	Vehículo propulsado por la combinación de un motor de combustión interna y uno o más motores eléctricos.
IEA	International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía)	Organización intergubernamental orientada a coordinar políticas energéticas, seguridad y sostenibilidad.
ILOSTAT	International Labour Organization Statistics (Base de Datos Estadísticos de la OIT)	Plataforma internacional con indicadores y estadísticas sobre el mercado de trabajo a nivel global.
JEL	Journal of Economic Literature	Sistema estandarizado de clasificación de temas y códigos para publicaciones académicas de economía.
LCE	Lithium Carbonate Equivalent (Carbonato de Litio Equivalente)	Unidad de medida estándar para cuantificar y comparar volúmenes de litio en diversos compuestos.
Mt	Millones de toneladas	Unidad de medida de masa utilizada para expresar capacidades de procesamiento y reservas de minerales.
ORCID	Open Researcher and Contributor ID	Código digital único y permanente para identificar investigadores y autores académicos.
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Vehículo Eléctrico Híbrido Enchufable)	Vehículo híbrido equipado con batería que puede recargarse conectándose a la red eléctrica externa.
USD	United States Dollar (Dólar Estadounidense)	Divisa empleada como unidad monetaria estándar en las cotizaciones y precios del mercado internacional.
USGS	United States Geological Survey (Servicio Geológico de los Estados Unidos)	Agencia científica del gobierno estadounidense enfocada en la recolección de datos sobre recursos naturales y geología.

Dedicatorias

A Dios, por darme la vida, la fortaleza y la oportunidad de llegar hasta este momento. Por acompañarme en cada etapa de este camino y permitirme superar los retos que hicieron posible alcanzar esta meta.

A mi familia, por ser el fundamento de mi vida y por acompañarme, de una u otra manera, durante este largo recorrido. Este logro también les pertenece, porque detrás de cada paso hay palabras de aliento, sacrificios, enseñanzas y muestras de cariño que me impulsaron a continuar.

A mi padre, Juvenal Flores Estrada, por sus enseñanzas, su ejemplo y por mostrarme, con su vida, el valor del trabajo, la responsabilidad y la perseverancia. Gracias por ser parte esencial de lo que soy y de lo que he logrado.

A mi madre, María Elena González Toalá, por su amor incondicional, sus consejos y su apoyo constante. Gracias por enseñarme que la fortaleza también se encuentra en la paciencia, en la dedicación y en la confianza para seguir adelante aun en los momentos difíciles.

A mis hermanos, por compartir conmigo alegrías, experiencias y momentos que forman parte de nuestra historia familiar. De manera especial, a Williams Flores González, por su cercanía, apoyo y por ser parte importante de este camino.

A toda mi familia, porque cada uno, desde su lugar, ha contribuido a que hoy pueda culminar esta etapa. Este trabajo representa no solamente un logro académico, sino también el resultado de muchos años de esfuerzo, aprendizajes y del respaldo de las personas que han estado presentes en mi vida.

Con profundo cariño y gratitud, dedico este logro a ustedes.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios, por concederme la vida, la fortaleza y la oportunidad de concluir esta importante etapa de mi formación académica. Por acompañarme a lo largo de este camino y permitirme alcanzar una meta que representa años de esfuerzo, dedicación y aprendizaje.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi familia, por su cariño, apoyo y comprensión durante todo este proceso. Su presencia y confianza fueron fundamentales para mantenerme firme y continuar adelante en los momentos de mayor exigencia. Este logro es también resultado del acompañamiento de quienes han estado presentes a lo largo de mi vida.

Agradezco especialmente al Dr. Miguel Ángel Martínez Damián, director de esta tesis, por su orientación, acompañamiento y confianza durante el desarrollo de este trabajo doctoral.

Mi agradecimiento también a la Dra. Dixia Dania Vega Valdivia, por su disposición, acompañamiento y valiosas aportaciones a lo largo de este proceso.

De igual manera, agradezco al Dr. Juan Hernández Ortíz, por su apoyo, orientación y participación en esta etapa de mi formación académica.

Agradezco a la Universidad Autónoma Chapingo y a la División de Ciencias Económico-Administrativas, por brindarme el espacio y las condiciones para continuar con mi formación doctoral y desarrollar este trabajo.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de manera directa o indirecta, estuvieron presentes durante este recorrido. A quienes compartieron conmigo conocimientos, experiencias, palabras de aliento y momentos que contribuyeron a hacer posible la culminación de esta etapa.

A todos, mi más sincero agradecimiento.

Datos biográficos



Datos personales

Nombre: Pablo Iván Flores González

Fecha de nacimiento: 16 de julio de 1987

Lugar de nacimiento: Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

No. Cartilla militar: C-9056619

CURP: FOGP870716HCSLNB01

Profesión: Estudiante de posgrado

Cédula profesional: 11767491

Desarrollo académico

2002-2005: Bachillerato en Colegio de Bachilleres de Chiapas Plantel 01

2006-2011: Licenciatura en Comercio Internacional de Productos Agropecuarios por la Universidad Autónoma Chapingo

2019-2022: Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales por la Universidad Autónoma Chapingo

Desarrollo profesional

2011-2013: Comprador en Paden S.A. de C.V.

2014-2018: Encargado de Importaciones en Comercializadora de Insumos y Suministros Punicus S.A. de C.V.

2018-2019: Comprador en Eparq Arquitectura y Diseño S.A. de C.V.

RESUMEN GENERAL

HORIZONTE DE AGOTAMIENTO DEL LITIO: ¿CUÁNTO TIEMPO QUEDA?¹

Resumen

Esta investigación doctoral analiza la disponibilidad intertemporal y la eficiencia extractiva de las reservas mundiales de litio mediante un enfoque cuantitativo multinivel. En la primera vertiente, se aplica la regla de Hotelling mediante modelos econométricos de series de tiempo (ARMA) bajo un escenario conservador de stock fijo de 37 millones de toneladas y un precio base de 9,000 USD/t en 2025. Los resultados muestran un crecimiento continuo del precio de 7.56% anual y una relación inversa con respecto a las reservas efectivas, proyectando un horizonte teórico de agotamiento del stock actual de 68.43 años (aproximadamente hasta el año 2093). En la segunda vertiente, se evalúa la eficiencia extractiva relativa de nueve países productores clave en 2025 utilizando un modelo de Análisis Envolvente de Datos (DEA) orientado a insumos (reservas y empleo minero) y como producto la producción de litio. Se identifica una marcada heterogeneidad operativa: Australia, China, Portugal y Zimbabue alcanzaron el 100% de eficiencia, delimitando la frontera empírica. En contraste, economías con vastos recursos como Chile (52.5%), Argentina (38.5%), Canadá (10.9%) y Estados Unidos (4.2%) se ubicaron por debajo. El estudio concluye que la abundancia geológica no garantiza por sí sola un aprovechamiento óptimo ni el éxito productivo, y que la transición energética trasladará las presiones de escasez desde los combustibles fósiles hacia los minerales críticos. Por ello, resulta indispensable fortalecer la eficiencia, la innovación tecnológica, el reciclaje y las políticas públicas intertemporales en la gestión del recurso.

Palabras clave: Litio, Agotamiento de recursos, Análisis Envolvente de Datos, Regla de Hotelling, Eficiencia extractiva.

¹ Tesis de Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola
Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Pablo Iván Flores González
Director de Tesis: Dr. Miguel Ángel Martínez Damián

ABSTRACT

LITHIUM DEPLETION HORIZON: HOW MUCH TIME IS LEFT?²

This doctoral research analyzes the intertemporal availability and extraction efficiency of global lithium reserves using a multilevel quantitative approach. In the first aspect, Hotelling's rule is applied via time-series econometric models (ARMA) under a conservative scenario assuming a fixed stock of 37 million tonnes and a base price of 9,000 USD/t in 2025. The results show continuous price growth of 7.56% annually and an inverse relationship with effective reserves, projecting a theoretical depletion horizon for current stocks of 68.43 years (extending to approximately 2093). In the second aspect, the relative extraction efficiency of nine key producing countries in 2025 is evaluated using an input-oriented Data Envelopment Analysis (DEA) model, with reserves and mining employment as inputs and lithium production as the output. Marked operational heterogeneity is identified: Australia, China, Portugal, and Zimbabwe achieved 100% efficiency, defining the empirical frontier. In contrast, economies with vast resources—such as Chile (52.5%), Argentina (38.5%), Canada (10.9%), and the United States (4.2%)—ranked below this level. The study concludes that geological abundance alone does not guarantee optimal utilization or production success, and that the energy transition will shift scarcity pressures from fossil fuels to critical minerals. Therefore, strengthening efficiency, technological innovation, recycling, and intertemporal public policies regarding resource management is essential.

Keywords: Lithium, Resource depletion, Data Envelopment Analysis, Hotelling's rule, Extraction efficiency.

² Thesis: Universidad Autónoma Chapingo
Author: Pablo Iván Flores González
Advisor: Dr. Miguel Ángel Martínez Damián

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El litio ha emergido como un recurso de importancia económica a nivel mundial. Su demanda ha experimentado un crecimiento exponencial, impulsado principalmente por la expansión del mercado de vehículos eléctricos y el almacenamiento de energía renovable. Las baterías de ion litio, se han convertido en la piedra angular de la revolución de la movilidad eléctrica, con fabricantes de automóviles de renombre mundial compitiendo por asegurar suministros estables y asequibles de este elemento. Además, el almacenamiento de energía esencial para respaldar la intermitencia de fuentes renovables como la energía solar y eólica depende en gran medida de las baterías de litio para garantizar una disponibilidad constante de energía limpia.

La creciente demanda ha transformado las perspectivas económicas de las regiones ricas en litio, como Chile, Argentina y Australia, que poseen vastas reservas del metal. Estas naciones se han convertido en actores clave en el mercado mundial del litio, atrayendo inversiones significativas en infraestructura minera y plantas de procesamiento. Sin embargo, la oferta del material puede llegar a ser escasa si no se traza una optimización en cuanto a la extracción, inundar el mercado puede afectar el precio, aunque si bien lo atractivo del litio es su alto valor monetario, una caída estrepitosa en el precio podría colocar al recurso en una situación bastante complicada.

Además, el litio no se limita solo a las baterías; se utiliza en una variedad de aplicaciones industriales, desde vidrios y cerámicas hasta lubricantes y productos farmacéuticos. Este amplio espectro de usos industriales garantiza una demanda constante y diversificada de litio en los mercados globales, lo que respalda su estabilidad económica y su posición como una valiosa mercancía en el comercio internacional. Sin embargo, la creciente demanda y la volatilidad de los precios del litio plantean desafíos para los actores de la cadena de suministro, desde la extracción y el procesamiento hasta la fabricación y el reciclaje. La expansión de la capacidad de producción y la diversificación de las fuentes de

suministro son imperativas para garantizar una oferta adecuada y estabilizar los precios en el mercado mundial.

Es crucial abordar las preocupaciones ambientales y sociales asociadas con la extracción de litio, como la gestión sostenible de recursos hídricos, la rehabilitación de áreas afectadas y la equidad en la distribución de beneficios económicos entre las comunidades locales.

1.1 Planteamiento del problema

El mercado del litio ha cobrado mucha importancia debido al uso en baterías. De acuerdo con datos del Mineral Commodity Summaries (2019), la producción mundial de litio aumentó en 2018, para llegar a las 84,700 toneladas, un 24% de incremento con respecto a lo presentado en 2017. El aumento en la producción se deriva de la mayor demanda de litio para aplicaciones de baterías. Se prevé que el consumo de litio, en 2018, sea de alrededor de 47,600 toneladas, frente a las 39,700 toneladas en 2017. En este contexto, la producción en Australia aumentó aproximadamente un 28%; mientras que la producción de Chile y de Argentina se incrementó en 13% y 9%, respectivamente.

En los últimos años, la demanda china de litio le ha dado un fuerte impulso al mercado. En este sentido, cinco operaciones de espodumena, en Australia, y dos operaciones de salmuera, en Argentina y Chile, representaron la mayor parte de la producción mundial. Los dos productores de litio en Chile y el productor líder de litio en Argentina anunciaron, cada uno, planes para ampliar aún más la capacidad de producción de hidróxido de litio para satisfacer la creciente demanda de la industria del vehículo eléctrico.

México, de acuerdo con la Dirección General de Desarrollo Minero (2021), tiene intenciones de incurrir en el mercado del litio, como recurso natural escaso y altamente demandado tiene un precio bastante alto y en constante crecimiento, no obstante, el país aún no cuenta con infraestructura ni activos para la extracción y comercialización. Por tal motivo, esta investigación presenta una estimación en de gasto público inicial a invertir y posteriores costos de operaciones de dicho recurso para la producción (extracción), así como un comparativo en cuanto

utilidades por comercialización del litio versus las exportaciones de petróleo mexicano, todo esto para verificar los rendimientos económicos que el sector de litio proporcionará a México como paraestatal.

Aunque la actividad extractiva de litio todavía presenta un desarrollo limitado, sus efectos territoriales ya son perceptibles mediante la instalación de infraestructura destinada a las operaciones mineras, entre la que se encuentran edificaciones, vías de acceso, estanques de evaporación y equipos de perforación. A estas transformaciones se suma la delimitación de extensas superficies mediante cercados, situación que puede dificultar el tránsito y el acceso de las comunidades locales a determinados espacios. Asimismo, la extracción de agua asociada con el aprovechamiento de las salmueras genera inquietudes entre los habitantes, debido a sus posibles repercusiones en la disponibilidad de este recurso. En conjunto, la modificación del territorio, las limitaciones para acceder y utilizar determinadas áreas y las presiones sobre los recursos hídricos pueden afectar las actividades económicas que se desarrollaban previamente en la región. Por ello, una baja densidad demográfica no significa que el territorio carezca de ocupación, aprovechamiento o valor social, pues estos espacios también forman parte de las dinámicas de vida y de las prácticas productivas y culturales de las comunidades locales y de los pueblos originarios (Ruiz Peyré & Dorn, 2020).

Ahora bien, la seguridad del suministro de litio se ha convertido en una prioridad para las empresas de tecnología en los Estados Unidos y en Asia. Se siguen estableciendo alianzas estratégicas y empresas conjuntas entre compañías de tecnología y compañías de exploración para garantizar un suministro confiable y diversificado de litio para los proveedores de baterías y fabricantes de vehículos. En este sentido, las operaciones de salmuera se estaban desarrollando en Argentina, Bolivia, Chile, China y los Estados Unidos; por su parte, las operaciones mineras de espodumeno se estaban desarrollando en Australia, Canadá, China y Finlandia; además, se estaba desarrollando una operación minera jadarita en Serbia; y se está desarrollando una operación minera de arcilla de litio en México.

Finalmente, se señala que un fabricante líder de automóviles eléctricos estaba construyendo una planta de baterías de iones de litio en Nevada, capaz de producir hasta 500,000 baterías de vehículos de iones de litio por año. Se esperaba que la planta estuviera integrada verticalmente, y fuera capaz de producir paquetes de baterías terminados directamente a partir de materias primas.

Cuadro 1. Producción mundial de litio.

País productor	2017	2018
Australia	40,000	51,000
Chile	14,200	16,000
China	6,800	8,000
Argentina	5,700	6,200
Zimbabwe	800	1,600
Portugal	800	800
Brasil	200	600
Nambia	0	500

Fuente: Mineral Commodity Summaries, 2019

Los registros estadísticos de litio en México no reportan ninguna producción, dado que los yacimientos que se conocen se encuentran aún en etapa de exploración.

No obstante, actualmente se encuentra en construcción la planta de beneficio de la empresa Bacanora Lithium, en el estado de Sonora. Se espera que la planta comience a operar en el año 2023, siendo diseñada para procesar inicialmente 1.1 millones de toneladas (Mt) de mineral por año, durante la primera etapa del proyecto; aumentando, posteriormente, hasta alcanzar los 2.2Mt anuales en una segunda etapa.

Dado el peso que tiene el crecimiento de la electromovilidad sobre la demanda de litio, es prudente transparentar algunos de los riesgos más importantes que puede enfrentar la industria. Esto es particularmente relevante al considerar que históricamente las ventas de autos eléctricos han sido menores a las esperadas por el mercado, situación que naturalmente siembra sospechas sobre cualquier proyección de la demanda esperada de litio.

En general podemos agrupar estos riesgos según su temporalidad en corto, mediano o largo plazo según se expone en cuadro 2. Ahora bien, se debe acotar que esta temporalidad es únicamente referencial en tanto que naturalmente los acontecimientos de corto plazo pueden tener consecuencias significativas extendidas en el tiempo. En este contexto, debemos explicitar que clasificamos la crisis económica de 2020 a raíz de la pandemia COVID-19 como un riesgo de corto plazo, aun cuando existe la posibilidad latente de que suponga un impacto significativo al crecimiento mundial a largo plazo.

Cuadro 2. Riesgos asociados al crecimiento del consumo de litio.

Temporalidad	Riesgo
Corto Plazo	Crisis económicas mundiales (pandemia COVID-19)
Mediano Plazo	Variaciones en los subsidios autos eléctricos Menores impuestos a autos de combustión interna Menores mejoras tecnológicas que supongan costos mayores en autos eléctricos
Largo Plazo	Menor precio del petróleo (aminora costos de producción, pero a largo plazo puede abaratar costos de uso de autos de combustión interna) Sustitutos: Baterías de potasio-ion, hidrógeno, entre otros

Fuente: Agencia Internacional de Energía, 2023

Se puede advertir que en general los riesgos explicitados a mediano plazo tienen relación con el costo relativo de los autos eléctricos frente a los de combustión interna, por lo que a grandes rasgos es posibles revisarlos de manera conjunta. Por otra parte, un riesgo altamente discutido a largo plazo ha sido el potencial de los sustitutos, dentro de los cuales destacan desde luego los automóviles a celda de hidrógeno (y, en efecto, ya existe una incipiente industria buscando su consolidación en el mercado).

Agregando, en general se distinguen tres fuentes potencialmente explotables de litio a nivel mundial: de mineral de roca o pegmatitas (comúnmente

en la forma de espodumeno), salmueras (típicamente en reservorios acuosos continentales) y rocas sedimentarias.

1.2 Justificación

El litio se ha convertido en un recurso estratégico para la transformación de los sistemas energéticos y productivos debido a su utilización en baterías recargables, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía. El crecimiento de estas aplicaciones ha incrementado la importancia económica del mineral y ha generado una preocupación creciente respecto de la capacidad de los países productores para mantener y ampliar su oferta. En este contexto, analizar la disponibilidad y el aprovechamiento del litio resulta relevante no solo desde la perspectiva de la seguridad del suministro, sino también desde la economía de los recursos naturales y la sostenibilidad de las actividades extractivas.

La importancia de estudiar el litio radica en que su disponibilidad económica no depende exclusivamente de la cantidad de reservas reportadas. Las reservas pueden modificarse como consecuencia de nuevos descubrimientos, cambios tecnológicos, condiciones de mercado y variaciones en la rentabilidad de los proyectos mineros. Asimismo, la existencia de grandes reservas en un país no implica necesariamente una elevada capacidad de producción, debido a que su aprovechamiento requiere factores como capital, trabajo, infraestructura, tecnología y condiciones que permitan transformar el recurso geológico en producción efectiva. Por ello, resulta necesario distinguir entre la disponibilidad del recurso y la capacidad para aprovecharlo productivamente.

Desde esta perspectiva, la investigación adquiere relevancia al abordar dos dimensiones complementarias del aprovechamiento económico del litio. La primera corresponde a su disponibilidad intertemporal, mediante la estimación de un horizonte de agotamiento de las reservas bajo un escenario de stock fijo. Esta aproximación permite analizar cómo la evolución del precio y su relación con las reservas efectivas pueden asociarse con la reducción progresiva del stock

disponible. El resultado no pretende establecer una fecha determinista de agotamiento físico del litio, sino proporcionar una estimación condicionada por los supuestos del modelo que permita valorar la presión económica ejercida sobre las reservas actualmente consideradas.

La segunda dimensión corresponde a la eficiencia extractiva, mediante la comparación de los principales países productores de litio. El análisis permite evaluar las diferencias relativas en la capacidad de transformar las reservas disponibles y el empleo utilizado en la actividad minera en producción de litio. Esta perspectiva resulta pertinente porque una mayor disponibilidad de reservas no garantiza por sí misma una mayor producción ni una posición eficiente. La identificación de diferencias en eficiencia puede contribuir a comprender por qué países con distintas dotaciones de recursos presentan diferentes niveles de aprovechamiento extractivo.

La integración de ambas dimensiones permite ampliar el análisis tradicional de la disponibilidad de minerales críticos. Mientras que el horizonte de agotamiento proporciona una perspectiva temporal sobre la permanencia de un stock determinado, el análisis de eficiencia aporta una perspectiva comparativa sobre la capacidad de los países para aprovechar dicho recurso. En conjunto, ambas aproximaciones permiten analizar el problema desde una perspectiva económica más amplia: no solamente cuánto litio está disponible y durante cuánto tiempo podría mantenerse bajo determinados supuestos, sino también cómo se aprovecha productivamente entre los países que participan en su extracción.

La investigación presenta también una contribución metodológica, debido a que combina herramientas econométricas, análisis dinámico de reservas, cálculo integral y Análisis Envolvente de Datos (DEA). Esta combinación permite abordar un recurso natural no renovable desde perspectivas que generalmente son estudiadas de manera separada. La primera aproximación permite relacionar la dinámica del precio con la evolución de las reservas efectivas y obtener un horizonte temporal; la segunda permite establecer una comparación relativa de la eficiencia extractiva entre países productores.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general:

Analizar la disponibilidad y el aprovechamiento económico de las reservas mundiales de litio mediante la estimación de su horizonte temporal de agotamiento y la evaluación comparativa de la eficiencia extractiva de los principales países productores, considerando la dinámica del precio, las reservas efectivas, los recursos productivos y la producción de litio.

1.3.2 Objetivos específicos:

- Estimar el horizonte temporal de agotamiento de las reservas mundiales de litio mediante la integración de una trayectoria econométrica del precio y una función dinámica de reservas efectivas, bajo el supuesto de ausencia de nuevos descubrimientos o incorporación de reservas durante el período de proyección.
- Estimar y comparar la eficiencia extractiva relativa de los principales países productores de litio mediante un modelo de Análisis Envolvente de Datos (DEA), considerando como variables de entrada las reservas reportadas de litio y el empleo en minería y explotación de canteras, y como variable de salida la producción de litio correspondiente a 2025.

1.4 Hipótesis

El aprovechamiento económico del litio está condicionado por la dinámica intertemporal de su escasez y por la capacidad de los países productores para transformar sus reservas y factores productivos en producción extractiva, de manera que una trayectoria creciente del precio se relaciona con una reducción de las reservas efectivas bajo un escenario de stock fijo, mientras que la eficiencia extractiva difiere entre países de acuerdo con la combinación de reservas, empleo y producción.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

Este capítulo presenta una revisión de la literatura especializada en el análisis económico de los recursos no renovables como es el caso del litio, con énfasis en los fundamentos teóricos que permiten comprender su aprovechamiento y las decisiones relacionadas con su extracción. Entre los enfoques considerados destaca la regla de Hotelling, cuyo planteamiento constituye una referencia para examinar la explotación de los recursos minerales y la dinámica temporal de su tasa de extracción.

El análisis parte de los conceptos fundamentales asociados con la actividad minera y se amplía hacia las principales discusiones sobre la utilización, asignación y aprovechamiento económico de los recursos naturales. A partir de esta perspectiva, se examinan las aportaciones de diversos autores, las corrientes teóricas que han orientado el desarrollo de este campo de estudio y las principales líneas de investigación relacionadas con la economía de los recursos minerales. De esta manera, se busca establecer los antecedentes teóricos y empíricos que permitan contextualizar el problema de investigación e identificar los enfoques que contribuyen a su análisis.

2.1 Economía de los recursos naturales

Los recursos naturales no renovables tienen su importancia en el hecho de que no son renovables, no hay una tasa de recuperación del recurso que haga que haya más. Por ello, los estudios se centran en temas tanto económicos como políticos y de medio ambiente.

Desde una perspectiva más amplia, Toledo (1991) plantea que, ante la creciente importancia de los problemas ecológicos en el ámbito mundial, la ecología política debe ocuparse del estudio de los conflictos sociales y ambientales asociados con ellos. Esto implica analizar los mecanismos mediante los cuales se explota tanto el trabajo humano como la naturaleza, considerando las relaciones sociales de producción y las formas en que las actividades humanas transforman y aprovechan el entorno natural. Es aquí donde abordamos el concepto de ecología política apareció por primera vez en los

trabajos de Throne (1935) y fue retomado posteriormente por Wolf (1972), quien lo empleó para examinar la manera en que las normas locales de propiedad y herencia interactúan con las presiones provenientes de la organización social más amplia y con las necesidades propias de los ecosistemas locales.

Por su parte, Carlo y Ramos (2013) consideran que la ecología política constituye una herramienta teórico-analítica relevante para comprender las desigualdades en el consumo de energía y recursos naturales, así como la producción de residuos derivados de estos procesos. Tales diferencias en el aprovechamiento de los recursos y en la distribución de sus consecuencias ambientales contribuyen al surgimiento y la intensificación de los conflictos socioambientales.

En este contexto, los recursos naturales pueden entenderse como los bienes y servicios que proporcionan los ecosistemas en condiciones naturales, sin modificaciones o en su estado original. Cuando estos recursos se incorporan a los procesos productivos como insumos para generar bienes y servicios de valor económico, pueden integrarse al mercado y adquirir un precio (Bergstrom y Randall, 2016).

De acuerdo con Bergstrom y Randall (2016), los recursos naturales pueden clasificarse en dos categorías principales:

a) Recursos no renovables: aquellos cuya disponibilidad no puede restablecerse en un periodo de tiempo significativo para las actividades humanas. En este grupo se encuentran los minerales metálicos, los minerales industriales no metálicos y los combustibles fósiles.

b) Recursos renovables: aquellos que pueden regenerarse o recuperarse en periodos relativamente cortos. Entre ellos se encuentran las plantas, el agua, el aire y el suelo, aunque su capacidad de renovación depende de las condiciones ambientales y de la intensidad con que se utilizan.

La relación entre las actividades económicas, el crecimiento demográfico y el deterioro ambiental constituye otro aspecto fundamental para comprender los conflictos socioambientales. Martínez (2015) sostiene que el incremento de la población y la expansión de las actividades económicas ejercen una presión

directa sobre el medio ambiente, debido al aumento en la demanda de recursos y en la generación de residuos. Sin embargo, los efectos de este proceso no se distribuyen de manera uniforme, pues los individuos y los grupos sociales difieren tanto en la intensidad con que utilizan los recursos naturales como en las consecuencias que enfrentan por su aprovechamiento. Estas desigualdades constituyen una de las bases de los conflictos socioambientales.

A partir de esta problemática, la ecología política analiza la intervención de los factores políticos y las relaciones de poder en los conflictos relacionados con el ambiente. Su enfoque permite examinar las diferencias entre países con distintos niveles de desarrollo, así como la distribución desigual de los beneficios derivados de la explotación de los recursos y de los costos ambientales asociados con ella. Por esta razón, este campo de estudio mantiene una estrecha relación con los movimientos orientados a la justicia ambiental y con los principios de sustentabilidad.

El desarrollo económico, en sus distintas expresiones, requiere del aprovechamiento de los recursos naturales y, en determinadas condiciones, genera su deterioro o agotamiento. Incluso la reproducción de las condiciones materiales de la vida humana depende de los bienes y servicios que proporciona la naturaleza. Frente a esta situación, la investigación científica y, particularmente, el análisis económico debe contribuir a identificar alternativas de aprovechamiento y extracción que reduzcan los efectos negativos sobre el ambiente, sin perder de vista las necesidades de producción y bienestar social.

En este sentido, la economía de los recursos naturales incorpora conceptos e instrumentos de la teoría económica neoclásica para evaluar la asignación y el uso de los recursos desde una perspectiva de eficiencia. Este análisis comprende tanto los recursos renovables como los no renovables, aunque las características de cada categoría requieren enfoques específicos. En el caso de los recursos minerales, como la plata, su carácter no renovable hace necesario considerar la disponibilidad limitada de las reservas y las decisiones relativas al ritmo de extracción a lo largo del tiempo. Por consiguiente, determinar una trayectoria de explotación económicamente eficiente constituye una cuestión central para su

análisis. Entre los instrumentos teóricos utilizados para estudiar este problema se encuentra la regla de Hotelling, que permite examinar la relación entre el valor económico de los recursos agotables y las decisiones de extracción intertemporal.

2.2 Importancia económica del litio

El litio constituye un recurso mineral de importancia estratégica debido a sus propiedades fisicoquímicas y a su creciente demanda en diversos sectores industriales. Se caracteriza por ser el metal más ligero, presentar baja densidad, tener un punto de fusión relativamente bajo y poseer una elevada capacidad calorífica, así como una alta conductividad térmica y eléctrica. Asimismo, su elevada reactividad química determina que no se encuentre comúnmente en estado metálico en la naturaleza, sino formando parte de distintos compuestos minerales. Su presencia se ha identificado en silicatos, fluorosilicatos, aluminosilicatos, fosfatos, haluros y boratos, además de encontrarse en salmueras, aguas termales y agua de mar. Sin embargo, no todos los depósitos poseen las características necesarias para su explotación comercial, por lo que su importancia económica depende de las condiciones geológicas y de la viabilidad de su aprovechamiento. En América del Norte predominan los yacimientos asociados con minerales de roca, mientras que en América del Sur sobresalen los depósitos de salmueras como fuente de este elemento (Ceroni, 2018).

La relevancia económica del litio se relaciona principalmente con sus aplicaciones industriales y con su papel en la fabricación de baterías recargables. Estas últimas se utilizan en dispositivos electrónicos, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía, lo que ha fortalecido la posición del mineral dentro de las cadenas de suministro vinculadas con la innovación tecnológica y la transición energética. El crecimiento de estas actividades ha incrementado el interés por asegurar su disponibilidad, ya que el acceso al litio puede influir en la capacidad de los países para desarrollar industrias relacionadas con la electromovilidad, las energías renovables y la fabricación de

componentes tecnológicos. Por consiguiente, su valor estratégico no se explica únicamente por sus propiedades físicas y químicas, sino también por su contribución a sectores económicos cuya expansión requiere un suministro constante de materias primas.

La evolución del mercado internacional permite observar la importancia que adquirió este mineral durante la segunda mitad de la década de 2010. De acuerdo con las cifras del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) citadas para 2017, la producción mundial fue de aproximadamente 234 mil toneladas de carbonato de litio equivalente (LCE), mientras que la demanda alcanzó cerca de 221 mil toneladas. Para ese mismo año, se estimaba que el 54 % del consumo correspondía a usos industriales, como la elaboración de cerámicas, vidrio, polvos metalúrgicos, aleaciones de aluminio y productos farmacéuticos; el 46 % restante se destinaba a la fabricación de baterías. Las proyecciones disponibles en aquel momento anticipaban un aumento de la demanda hasta 275 mil toneladas de LCE en 2018 y 505 mil toneladas en 2022. En particular, el consumo vinculado con baterías para vehículos eléctricos e híbridos, autobuses eléctricos y bicicletas eléctricas se estimaba en 103 mil toneladas en 2018 y 298 mil toneladas en 2022. Estas previsiones reflejaban las expectativas de expansión de la industria automotriz y la necesidad de disponer de baterías con mayor capacidad de almacenamiento, eficiencia y costos competitivos.

Además de la magnitud de la demanda, la composición de los productos de litio utilizados en la industria influye en los costos de producción y en la posición competitiva de los países productores. Donoso Rojas et al. (2018) destacan la importancia creciente del hidróxido de litio, debido a su aplicación en baterías que requieren una mayor densidad energética. El desarrollo de este mercado puede modificar las condiciones de competencia entre los productores que obtienen litio de salmueras y aquellos que lo extraen de minerales de roca. En determinados procesos, la producción de hidróxido a partir de carbonato requiere etapas adicionales de transformación, lo que puede incrementar los costos para algunos productores de salmueras. En consecuencia, las ventajas competitivas de cada método de extracción dependen no solo de la disponibilidad

del recurso, sino también de los requerimientos de procesamiento, la tecnología utilizada y las características de la demanda industrial.

La distribución geográfica de la producción constituye otro elemento determinante de la importancia económica del litio. Australia, Chile, Argentina y China figuran entre los países relevantes para el abastecimiento del mercado mundial, situación que vincula la disponibilidad del mineral con las relaciones comerciales internacionales y la seguridad de suministro. Para las economías que dependen de las importaciones, las posibles restricciones de abastecimiento pueden representar un desafío para el desarrollo de industrias que requieren este insumo. Por el contrario, los países que cuentan con depósitos de litio pueden encontrar oportunidades para incorporarse a las cadenas de valor de las baterías y de las tecnologías energéticas. No obstante, la existencia de recursos minerales no garantiza automáticamente una posición competitiva, pues su aprovechamiento requiere inversiones, infraestructura, conocimientos técnicos, tecnologías adecuadas y condiciones de mercado favorables.

En México, la presencia de depósitos de litio ha generado expectativas sobre las posibilidades de desarrollar actividades mineras e industriales relacionadas con este recurso. Sonora destaca por la existencia de depósitos que contienen litio, particularmente aquellos asociados con arcillas. Su potencial podría representar una oportunidad para diversificar las actividades productivas, atraer inversiones y fortalecer la participación nacional en sectores vinculados con las tecnologías de almacenamiento energético. Sin embargo, es necesario distinguir entre los recursos geológicos identificados y las reservas cuya extracción resulta económicamente viable. La conversión de un depósito en un proyecto productivo depende de factores como la concentración del mineral, las características geológicas, los costos de extracción y procesamiento, la disponibilidad de tecnología y las condiciones prevalecientes en el mercado internacional.

El desarrollo de la industria del litio en México también podría contribuir a la generación de empleo, la formación de capacidades científicas y tecnológicas y la creación de nuevas actividades económicas. Para concretar estas

posibilidades, resulta necesario evaluar la viabilidad técnica y financiera de los proyectos, así como las condiciones institucionales que regulan la exploración, extracción y transformación del mineral. De igual manera, el aprovechamiento del recurso debe considerar sus posibles consecuencias ambientales y sociales, especialmente en relación con el uso del agua, la modificación de los ecosistemas y los efectos sobre las comunidades cercanas a las zonas de explotación. Por tanto,

2.3 El litio como mineral estratégico

El acceso a los recursos naturales ha constituido históricamente un factor determinante en las relaciones geopolíticas y en las estrategias de desarrollo económico de los países. Sin embargo, desde comienzos del siglo XXI, la competencia por determinados recursos ha adquirido una nueva relevancia debido a las necesidades de abastecimiento de las economías industrializadas y a las transformaciones de los sistemas productivos. Durante las décadas de 1980 y 1990, la expansión de la globalización generó la percepción de que los mercados internacionales podían garantizar una disponibilidad prácticamente ilimitada de materias primas, lo que favoreció la idea de una menor dependencia de los recursos naturales en el crecimiento económico. No obstante, las limitaciones físicas de la naturaleza y la disponibilidad finita de ciertos recursos continuaron siendo objeto de discusión. En este sentido, el informe **Los límites del crecimiento**, publicado en 1972 por Meadows y colaboradores, advirtió sobre las restricciones naturales que podrían condicionar la continuidad del crecimiento económico. Posteriormente, el debate sobre el cenit de la producción petrolera renovó las preocupaciones acerca de la disponibilidad de los recursos y sus implicaciones para la economía mundial.

Estas preocupaciones, junto con el incremento de los precios de diversas materias primas, impulsaron a las economías industrializadas a desarrollar estrategias para asegurar el suministro de los recursos necesarios para sostener sus actividades productivas. Un ejemplo de ello fue la “Raw Materials Initiative” de la Unión Europea, orientada a fortalecer el acceso a materias primas

consideradas esenciales para su desarrollo económico. En América Latina, el aumento de las actividades extractivas desde comienzos del siglo XXI también generó debates sobre las consecuencias económicas, sociales y ambientales de este modelo de aprovechamiento de los recursos naturales. Estas discusiones se han articulado en torno al concepto de neoextractivismo, mediante el cual se examinan las características de la expansión extractiva y sus efectos en las políticas públicas y en las relaciones entre el Estado, la sociedad y el medio ambiente.

En este escenario, la concepción de los minerales estratégicos se ha ampliado. Mientras que tradicionalmente la competencia internacional por los recursos naturales se concentraba en aquellos vinculados con el abastecimiento energético y la industria armamentística, el desarrollo tecnológico ha incorporado nuevas materias primas a las prioridades económicas y geopolíticas de los países. La expansión de las tecnologías digitales, los sistemas de almacenamiento energético y las alternativas de transporte con menores emisiones ha incrementado la importancia de minerales como las tierras raras, el coltán y el litio, además de los recursos tradicionalmente estratégicos, como los hidrocarburos, el cobre y el uranio. En consecuencia, el valor estratégico de un mineral no depende exclusivamente de su disponibilidad geológica, sino también de su utilidad en sectores productivos fundamentales, de las posibilidades de sustitución y de las condiciones bajo las cuales puede obtenerse y procesarse.

El litio destaca particularmente dentro de esta categoría por su capacidad para almacenar energía mediante su utilización en baterías recargables. Su presencia en numerosos dispositivos electrónicos portátiles, así como su aplicación en vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de electricidad, lo convierte en un insumo relevante para la transformación tecnológica y energética de la economía mundial. Asimismo, su utilización en baterías contribuye al desarrollo de sistemas que permiten integrar una mayor proporción de energía procedente de fuentes renovables, cuya generación puede presentar variaciones en el tiempo. De esta manera, la demanda de litio se encuentra vinculada tanto con la expansión de la industria electrónica como con las

estrategias de electrificación del transporte y de transformación de las matrices energéticas.

La importancia estratégica del litio no se explica únicamente por sus propiedades y aplicaciones industriales. Aunque este elemento se encuentra distribuido en distintas regiones del planeta, la existencia de depósitos no implica necesariamente que su explotación sea rentable. Las características geológicas de los yacimientos, la concentración del mineral, los métodos de extracción, los costos de procesamiento y las condiciones del mercado determinan la viabilidad económica de su aprovechamiento. Esta diferencia entre disponibilidad geológica y capacidad efectiva de producción contribuye a explicar por qué determinados territorios adquieren una posición relevante en el abastecimiento internacional. Por tanto, el control y el desarrollo de capacidades para extraer y transformar el litio pueden convertirse en factores de competencia económica y geopolítica.

En este sentido, América del Sur ocupa un lugar destacado debido a la presencia de importantes depósitos de litio en salmueras, particularmente en la región conocida como el Triángulo del Litio. La concentración de recursos en este espacio geográfico ha incrementado el interés internacional por su potencial productivo y ha influido en las decisiones nacionales relacionadas con la administración, explotación y aprovechamiento del mineral. Sin embargo, la disponibilidad de recursos no garantiza por sí misma el predominio en el mercado mundial, puesto que la posición de los países productores también depende de su capacidad tecnológica, sus inversiones, su infraestructura y su participación en las distintas etapas de la cadena de valor.

El litio debe entenderse como un mineral estratégico cuya relevancia articula dimensiones económicas, tecnológicas y geopolíticas. Su creciente utilización en actividades vinculadas con la transición energética ha intensificado la competencia por asegurar su suministro, al tiempo que ha abierto oportunidades para los países que cuentan con depósitos susceptibles de aprovechamiento comercial. Sin embargo, la transformación de esa disponibilidad en beneficios económicos depende de las condiciones de extracción, procesamiento y comercialización, así como de las decisiones de

política pública que regulan el acceso y el uso del recurso. Por ello, el análisis del litio requiere considerar no solo su demanda creciente, sino también la disponibilidad efectiva de las reservas y la dinámica de su explotación, aspectos fundamentales para comprender su valor económico y su papel en las estrategias de desarrollo de los países.

2.4 Literatura citada

- Bergstrom, J. C., & Randall, A. (2016). *Resource economics: An economic approach to natural resource and environmental policy* (4th ed.). Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781784717933>
- Ceroni Galloso, M. (2018). El litio: Que no sea otra oportunidad perdida. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 84(2), 173–174. https://www.researchgate.net/publication/335030682_El_litio_Que_no_se_a_otra_oportunidad_perdida
- Delgado Ramos, G. C. (2013). ¿Por qué es importante la ecología política? *Nueva Sociedad*, 244, 47–60. <https://nuso.org/articulo/por-que-es-importante-la-ecologia-politica/>
- Dirección General de Desarrollo Minero. (2018). Perfil de mercado del litio. Secretaría de Economía, Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419275/Perfil_Litio_2018__T_.pdf
- Donoso Rojas, F., Garay, V., & Cantallopts, J. (2018). Mercado internacional del litio y su potencial en Chile. Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), Dirección de Estudios y Políticas Públicas.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W., III. (1972). *The limits to growth: A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. Universe Books.
- Martínez Alier, J. (2015). Ecología política del extractivismo y justicia socio-ambiental. *INTERdisciplina*, 3(7), 57–73. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2015.7.52384>

- Thone, F. (1935). Nature rambling: We fight for grass. *The Science Newsletter*, 27(717), 5–14.
- Toledo, V. M. (1991). Hacia la construcción de una ecología política. *El Jarocho Verde*. <https://riaaver.org/material/el-jarocho-verde>
- United Nations Statistics Division. (2023). UN Comtrade database. United Nations. <https://comtradeplus.un.org/TradeFlow>
- U.S. Geological Survey. (2025). Lithium statistics and information. National Minerals Information Center. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lithium-statistics-and-information>
- Wolf, E. (1972). Ownership and political ecology. *Anthropological Quarterly*, 45(3), 201-205.

CAPÍTULO 3. HORIZONTE DE AGOTAMIENTO DE LITIO: UN ENFOQUE EN STOCK FIJO³

Lithium depletion horizon: a fixed-stock approach

Pablo Iván Flores González¹, Miguel Ángel Martínez Damián², Dixia Dania Vega Valdivia³, Juan Hernández Ortíz⁴

¹Doctorante de la División de Ciencias Económico-Administrativas de la Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México. CP. 56230. Tel.: 595 952 1668 ext. 1668, 5472. Correo electrónico: pablo.floresgz@hotmail.com. ORCID: 0000-0003-1436-2371

²Profesor investigador de la División de Ciencias Económico-Administrativas de la Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México. CP. 56230. Tel.: 595 952 1668 ext. 1668, 5472. Correo electrónico: angel24559@gmail.com. ORCID: 0000-0002-1215-7406

³Profesor investigador de la División de Ciencias Económico-Administrativas de la Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México. CP. 56230. Tel.: 595 952 1668 ext. 1668, 5472. Correo electrónico: dixiadania@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6465-3321

⁴Profesor investigador de la División de Ciencias Económico-Administrativas de la Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México. CP. 56230. Tel.: 595 952 1668 ext. 1668, 5472. Correo electrónico: jhdzo@yahoo.com.mx. ORCID: 0000-0001-5957-594X

Resumen

El estudio estima el horizonte de agotamiento de las reservas mundiales de litio bajo un escenario de stock fijo y sin incorporación de nuevas reservas. Se emplearon datos anuales de 1996 a 2025 y modelos ARMA para estimar la trayectoria del precio y su relación con las reservas efectivas. Los resultados mostraron crecimiento continuo del precio de 7.56% anual y una relación negativa entre precio y reservas. Mediante la integración de ambas funciones, considerando 37 millones de toneladas y un precio inicial de 9,000 USD/t en 2025, se estimó un horizonte teórico de 68.43 años, aproximadamente hasta 2093.

Palabras clave: Hotelling, reservas minerales, agotamiento de recursos no renovables, dinámica de precios.

Clasificación JEL: Q30, Q32, Q31, C32, Q02

Abstract

³ Artículo enviado a la Ensayos Revista de Economía, editada por la Facultad de Economía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, Nuevo León.

The study estimates the depletion horizon for global lithium reserves under a fixed-stock scenario with no addition of new reserves. Annual data from 1996 to 2025 and ARMA models were used to estimate the price trajectory and its relationship with effective reserves. The results showed continuous annual price growth of 7.56% and an inverse relationship between price and reserves. By integrating both functions, assuming a stock of 37 million tonnes and an initial price of 9,000 USD/t in 2025, a theoretical horizon of 68.43 years was estimated, extending approximately to 2093.

Keywords: Hotelling, mineral reserves, non-renewable resource depletion, price dynamics.

JEL Classification: Q30, Q32, Q31, C32, Q02

1. Introducción

El litio se ha consolidado como un mineral estratégico para la transición energética debido a su utilización en baterías recargables empleadas en vehículos eléctricos, dispositivos electrónicos y sistemas de almacenamiento de energía. El crecimiento de estas tecnologías ha incrementado las necesidades futuras de suministro y ha situado al litio en el centro de los debates sobre seguridad energética, disponibilidad de minerales críticos y sostenibilidad. Esta importancia también ha adquirido una dimensión industrial y territorial, particularmente en los países del denominado Triángulo del Litio, donde la disponibilidad del recurso se relaciona con estrategias de producción, investigación y agregación de valor (Fornillo & Gamba, 2019). En México, el interés por el litio también se ha incrementado debido a la identificación de recursos y al interés por desarrollar actividades asociadas con su aprovechamiento. Sin embargo, la existencia de recursos potenciales no equivale necesariamente a reservas económicamente explotables, por lo que resulta necesario distinguir entre ambos conceptos al analizar la disponibilidad futura del mineral (Sánchez & Pérez, 2023). Por otra parte, el aumento de la demanda no implica por sí misma una trayectoria determinada de precios o agotamiento, debido a que el mercado también responde a cambios en la oferta minera, costos de extracción, innovación tecnológica, reciclaje, sustitución y expectativas de los agentes económicos (Ambrose & Kendall, 2020; Fleming et al., 2024).

El carácter no renovable del litio introduce una dimensión intertemporal en las decisiones de extracción. Cada unidad extraída reduce el stock disponible para períodos posteriores, por lo que su aprovechamiento debe analizarse considerando tanto las condiciones económicas presentes como la disponibilidad futura. Vikström et al. (2013) muestran que las estimaciones sobre la disponibilidad del litio pueden presentar diferencias importantes dependiendo de los supuestos y métodos empleados, particularmente cuando se considera un crecimiento sostenido de la demanda asociado con la electrificación del transporte. Particularmente, esta evidencia muestra que la disponibilidad del recurso no depende únicamente del volumen de reservas reportadas, sino también de la evolución de la producción, la demanda y los criterios utilizados para definir el stock económicamente aprovechable. En este contexto, la economía de los recursos naturales proporciona herramientas para estudiar la asignación temporal de recursos agotables. La contribución de Hotelling (1931) establece que, bajo determinados supuestos, la renta de escasez de un recurso no renovable debe crecer a una tasa relacionada con la tasa de descuento, constituyendo uno de los principales fundamentos teóricos para analizar la relación entre precios, escasez y extracción.

No obstante, la aplicación empírica de la regla de Hotelling requiere cautela. La evidencia disponible muestra que los precios observados de los recursos minerales no necesariamente siguen de manera estricta la trayectoria predicha por la formulación clásica, debido a incertidumbre, costos de extracción, estructura de mercado, cambios tecnológicos y variaciones en las expectativas sobre las reservas. Ferreira da Cunha y Missemer (2020) revisan los fundamentos de la regla y señalan importantes limitaciones de su interpretación convencional para los recursos minerales. De manera más reciente, Cotrina-Teatino y Marquina-Araujo (2024), a partir de una revisión de varios artículos científicos indexados en Scopus, identifican el análisis de precios, agotamiento, validación empírica y gestión de recursos como algunas de las principales líneas de investigación relacionadas con la regla de Hotelling. Por ello, en este estudio Hotelling se emplea como fundamento para analizar la dinámica intertemporal del precio, y no como una predicción determinista del comportamiento futuro del mercado.

En el caso específico del litio, la discusión sobre agotamiento presenta una dificultad adicional: las reservas y los recursos minerales no constituyen magnitudes

estáticas. Su estimación puede modificarse mediante exploración, nuevos descubrimientos, avances tecnológicos, cambios en los precios y variaciones en la rentabilidad de los proyectos mineros. Fleming et al. (2024) muestran que los recursos de litio identificados aumentaron sustancialmente entre 2009 y 2023 y señalan que la disponibilidad física del recurso depende de la transformación de recursos en reservas y posteriormente en capacidad efectiva de extracción y procesamiento. Esta evidencia implica que el agotamiento de las reservas actualmente reportadas no debe interpretarse como el agotamiento físico de todo el litio existente en la corteza terrestre.

Diversos estudios han abordado la disponibilidad futura del litio mediante metodologías diferentes. Yaksic y Tilton (2009) utilizaron curvas de disponibilidad acumulada para analizar el riesgo de agotamiento, mientras que Sverdrup (2016) desarrolló un modelo de dinámica de sistemas que integra extracción, oferta, demanda, precios, reciclaje y agotamiento. Estudios más recientes han incorporado escenarios de demanda, economía circular e incertidumbre en la estimación de recursos. Wu et al. (2024), por ejemplo, muestran que el reciclaje puede modificar significativamente la participación futura del litio secundario y reducir la dependencia de la extracción primaria. Asimismo, Fleming et al. (2024) encuentran que la disponibilidad futura depende más de la transformación económica y tecnológica de los recursos que de una escasez física inmediata. Estos resultados evidencian que las estimaciones del horizonte de agotamiento dependen de los supuestos utilizados respecto de producción, demanda, reciclaje, tecnología y crecimiento de los recursos.

A pesar de estos avances, la literatura ha estudiado predominantemente el agotamiento del litio mediante modelos de disponibilidad acumulada, dinámica de sistemas, análisis de flujos materiales o escenarios de demanda y recursos. Existe, por tanto, una oportunidad para complementar estos enfoques mediante una aproximación que vincule explícitamente la trayectoria temporal del precio con la evolución de las reservas efectivas y que, a partir de esta relación, permita derivar una tasa de agotamiento y estimar un horizonte temporal. Esta integración resulta particularmente relevante porque permite conectar la dimensión económica de la escasez con la dimensión física del stock disponible.

En este sentido, el presente estudio propone una metodología en la que la trayectoria temporal del precio del litio se estima mediante una función log-lineal y se utiliza como variable explicativa de una función de reservas efectivas que incorpora el precio contemporáneo y un efecto rezagado. Posteriormente, ambas relaciones se integran algebraicamente para obtener una función continua de reservas efectivas en función del tiempo. A partir de dicha función se deriva la tasa de agotamiento y se utiliza una integral definida para estimar el período requerido para consumir el volumen de reservas considerado. El procedimiento permite transformar una relación econométrica precio-reservas en un horizonte temporal de agotamiento.

La cuestión se centró en ¿cuál es el horizonte temporal de agotamiento de las reservas mundiales de litio cuando la trayectoria temporal de su precio y su relación con las reservas efectivas se incorporan en un modelo dinámico bajo el supuesto de ausencia de incorporación de nuevas reservas? En consecuencia, el objetivo es estimar el horizonte temporal de agotamiento de las reservas mundiales de litio mediante la integración de una trayectoria econométrica del precio y una función dinámica de reservas efectivas, bajo el supuesto de ausencia de nuevos descubrimientos o incorporación de reservas durante el período de proyección.

La hipótesis de trabajo sostiene que una trayectoria creciente del precio del litio, asociada con condiciones de escasez intertemporal, se relaciona con una reducción de las reservas efectivas y permite estimar un horizonte finito de agotamiento cuando el stock de reservas considerado permanece fijo. La contribución del estudio es, por tanto, metodológica y aplicada: integra la perspectiva intertemporal de la economía de los recursos agotables con técnicas econométricas y herramientas de cálculo diferencial e integral para obtener una estimación del horizonte de agotamiento de un stock de reservas determinado.

El resultado debe interpretarse como un horizonte económico de agotamiento condicionado por los supuestos del modelo, y no como una fecha determinista de desaparición física del litio. En particular, el escenario considerado supone que las reservas analizadas constituyen un stock fijo y que no se incorporan nuevas reservas durante el período proyectado. Esta delimitación permite evaluar un escenario contrafactual de presión sobre las reservas actuales y proporcionar un punto de referencia

para discutir la importancia económica de la exploración, el reciclaje, la sustitución tecnológica y la diversificación de las fuentes de suministro.

2. Materiales y métodos

El desarrollo del trabajo de investigación constó de cuatro etapas: planteamiento de los modelos, supuestos del modelo, recopilación de datos y análisis de la información.

2.1 Planteamiento de los modelos

Se definió el modelo de agotamiento del recurso con ayuda de las siguientes funciones: la del precio con crecimiento exponencial propuesta por Hotelling en 1931 (1), la cual se linealiza para trabajarla de forma econométrico (1.1), y la cantidad de reservas efectivas en función del precio con rezago (3):

$$P_t = P_0 e^{rt} \quad (1)$$

Donde:

P_t : precio del litio en el periodo t en dólares americanos (USD).

P_0 : del precio inicial en USD.

e : número natural “e”

r : coeficiente de la tendencia temporal.

t : tiempo.

$$\ln P_t = \ln P_0 + rt \quad (1.1)$$

Donde:

$\ln P_t$: logaritmo natural del precio del litio en el periodo t .

$\ln P_0$: logaritmo natural del precio inicial.

r : coeficiente de la tendencia temporal.

t : tiempo.

$$R_t = \alpha_0 + \alpha_1 P_t + \alpha_2 P_{t-2} \quad (2)$$

Donde:

R_t : cantidad de reservas efectivas en el periodo t en toneladas.

P_t : precio del litio en el periodo t en USD.

P_{t-2} : precio del litio en el periodo $t-2$ en USD.

α_0 : término independiente.

α_1 : pendiente del precio del litio en el periodo t .

α_2 : pendiente del precio del litio en el periodo t-2.

También se definen las demás variables a utilizar como:

S_t : stock total mundial del litio en el periodo t en toneladas.

Q_t : tasa de agotamiento del litio en el tiempo t en toneladas/año.

T: tiempo estimado de agotamiento de las reservas de litio con stock estático en años.

El agotamiento del recurso ocurre en $t = T$, se cumple $S_T = Q_T = 0$. Considerando lo anterior además de la ayuda de las ecuaciones (1) y (2), tenemos:

$$R_t = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 e^{-2r})P_0 e^{rt} \quad (3)$$

Como R_t representa lo que queda en el subsuelo, su derivada indica cómo están cambiando las reservas:

$$\frac{dR_t}{dt} = (\alpha_1 + \alpha_2 e^{-2r})rP_0 e^{rt} \quad (4)$$

Las reservas deberían disminuir por extracción, esta derivada es negativa (5). Por eso definimos:

$$Q_t = -(\alpha_1 + \alpha_2 e^{-2r})rP_0 e^{rt} \quad (5)$$

El signo negativo convierte una disminución de reservas en una tasa positiva de extracción.

Al integrar la ecuación (5) bajo el intervalo de 0 a T, tuvimos que:

$$\int_0^T Q_t dt = S_T$$

Resolviendo la integral se obtuvo que:

$$\begin{aligned} \int_0^T Q_t dt &= -(\alpha_1 + \alpha_2 e^{-2r})P_0(e^{rT} - 1) \\ -(\alpha_1 + \alpha_2 e^{-2r})P_0(e^{rT} - 1) &= S_T \end{aligned} \quad (6)$$

Despejando T y sustituyendo el valor de θ en la ecuación (6):

$$T = \frac{1}{r} \ln \left[1 - \frac{S_T}{P_0(\alpha_1 + \alpha_2 e^{-2r})} \right] \quad (7)$$

De esta manera nuestras ecuaciones centrales a tomar en cuenta para estimar el horizonte de agotamiento del litio con stock finito fueron:

La tasa de agotamiento (5), expresada como:

$$Q_t = -(\alpha_1 + \alpha_2 e^{-2r})rP_0 e^{rt} \quad (5)$$

Y el tiempo estimado de agotamiento del stock finito (7):

$$T = \frac{1}{r} \ln \left[1 - \frac{S_T}{P_0(\alpha_1 + \alpha_2 e^{-2r})} \right] \quad (7)$$

Dados los modelos planteados con anterioridad, el parámetros r se obtienen del modelo expresado en la ecuación (1.1), para el parámetro P_0 no debe ser utilizado directamente ya que es el precio inicial del año t , para esta investigación el año $t=0$ es 2025, por lo que P_0 es el precio promedio anual del litio reportado en 2025; los parámetros α_1 , α_2 se obtienen del modelo expresado en la ecuación (2); por último el término S_T se obtienen de lo reportado de las reservas internacionales de litio al 2025.

2.2 Supuestos del modelo

Para la estimación del horizonte de agotamiento finito del litio se establecieron los siguientes supuestos. En primer lugar, se considera como stock inicial S_0 la cantidad de reservas internacionales de litio reportadas para 2025, equivalente a 37 millones de toneladas, estableciendo dicho año como $t = 0$. En segundo lugar, se supone que las reservas efectivas evolucionan de acuerdo con un balance de existencias, de manera que las reservas disponibles en el periodo t corresponden a las reservas del periodo anterior menos la cantidad extraída durante dicho periodo ($RE_t = RE_{t-1} - Q_t$). Asimismo, el cálculo del horizonte de agotamiento se realiza bajo un escenario de stock cerrado, por lo que no se consideran nuevos descubrimientos, exploraciones futuras que incorporen reservas adicionales ni la recuperación de material mediante reciclaje. En el caso del litio, existen recursos identificados que no necesariamente forman parte de las reservas reportadas, además de áreas cuya exploración aún puede ampliar el conocimiento sobre la disponibilidad del recurso. Cabello (2022), documenta la existencia de recursos adicionales y áreas prospectivas de litio en los salares del norte de Chile. En consecuencia, el supuesto de stock fijo adoptado en este estudio implica deliberadamente no incorporar posibles incrementos futuros derivados de exploración, nuevos descubrimientos o reclasificación de recursos como reservas, para un análisis enfocado al stock existente reportado.

Adicionalmente, se excluyen los efectos de bienes sustitutos y complementarios, y se supone que la tecnología de extracción y procesamiento, así como los costos de extracción, permanecen constantes durante el horizonte de proyección. La tasa de crecimiento del precio estimada para el periodo 1996 a 2025 se mantiene constante durante dicho horizonte. Finalmente, salvo las variables explícitamente incorporadas en los modelos, se mantiene el supuesto de *ceteris paribus* respecto de las demás condiciones económicas, tecnológicas y de mercado. Bajo estos supuestos, el valor de T debe interpretarse como un horizonte teórico de agotamiento, condicionado por las relaciones estimadas y no como una predicción determinística del agotamiento físico del litio.

2.3 Recopilación de datos

Los datos utilizados en esta investigación fueron obtenidos de fuentes institucionales y bases de información estadística reconocidas internacionalmente por su relevancia en el estudio de los recursos minerales y del mercado del litio. La información correspondiente a la producción mundial de litio, expresada en toneladas métricas por año, las reservas internacionales reportadas, expresadas en toneladas métricas, y la serie histórica del precio del litio, expresada en dólares estadounidenses por tonelada y calculada como promedio anual, se obtuvo principalmente de la base de datos estadística del United States Geological Survey (USGS). Como fuentes complementarias para contrastar la información sobre producción minera se consultaron las estadísticas del British Geological Survey (BGS) y los reportes anuales del Energy Institute (2023), que compilan información internacional sobre la producción de diversos minerales por país. Estas estadísticas permiten comparar la evolución de la producción reportada por diferentes fuentes y contribuyen a verificar la consistencia de las series utilizadas en el análisis (Brown et al., 2021). El empleo de estas fuentes permitió disponer de series históricas homogéneas y provenientes de organismos especializados en la recopilación y divulgación de información sobre recursos minerales y energía. Asimismo, se verificó que las fuentes utilizadas son de acceso público, lo que favorece la transparencia y reproducibilidad del estudio. Finalmente, el período de análisis se estableció de 1996 a 2025, considerando la disponibilidad, continuidad y consistencia de las series estadísticas necesarias para la estimación de los modelos econométricos empleados en la investigación.

2.4 Análisis de la información

Para analizar la dinámica temporal del precio y las reservas efectivas de litio se emplearon modelos de series de tiempo estimados mediante el método de Máxima Verosimilitud. La trayectoria del precio se estimó mediante un modelo ARMA con tendencia temporal, utilizando como variable dependiente el logaritmo natural del precio del litio, con información anual para el periodo 1996 a 2025. Esta especificación permitió estimar la tasa de crecimiento promedio anual del precio y considerar la dependencia temporal de las observaciones mediante términos autorregresivos.

Por otro lado, las reservas efectivas se modelaron mediante una especificación ARMA con variables explicativas y rezagos del precio, considerando el precio contemporáneo y su segundo rezago como determinantes de las reservas, además de un componente autorregresivo de segundo orden. La selección de las especificaciones consideró criterios de información y pruebas de diagnóstico de los residuos. Finalmente, los modelos estimados se calibraron al año 2025 utilizando un precio promedio de 9,000 USD por tonelada y reservas efectivas de 37 millones de toneladas, ambos datos reportados por la USGS, BGS y la Energy Institute, con el propósito de obtener una trayectoria conjunta precio-reservas y estimar el horizonte teórico de agotamiento del recurso mediante la condición de agotamiento finito.

3. Resultados

3.1 Modelo del precio de litio

De acuerdo con los resultados del modelo ARMA estimado para el logaritmo natural del precio de litio (LPR), correspondiente al periodo 1996 a 2025, mostrados en la tabla 1, presentó un ajuste general estadísticamente significativo con una $F = 23.12430$ y $p < 0.01$, a esto se le añade una R^2 ajustada de 0.753186, un buen ajuste del modelo. El coeficiente de la tendencia temporal ($r = 0.075614$) fue positivo y estadísticamente significativo ($p = 0.0005$), lo que indica una tendencia creciente del precio del litio equivalente a una tasa de crecimiento continuo aproximada de 7.56% anual. El componente autorregresivo de primer orden fue positivo y significativo ($AR(1) = 0.887817$; $p = 0.0011$), evidenciando persistencia temporal en la evolución del precio. El término $AR(2)$ presentó un coeficiente negativo de -0.400310 y significancia marginal al 10% ($p = 0.0981$), sugiriendo una

dinámica temporal adicional de menor intensidad. El estadístico Durbin-Watson (1.767) indica una reducción de la autocorrelación residual respecto de una especificación lineal simple. En conjunto, los resultados de la tabla 1 respaldan la existencia de una tendencia temporal positiva y persistencia dinámica en los precios del litio durante el periodo analizado.

Tabla 1. Salida de resultados del modelo del logaritmo natural precio de litio.

Dependent Variable: LPR				
Method: ARMA Maximum Likelihood (OPG - BHHH)				
Sample: 1996 2025				
Included observations: 30				
Convergence achieved after 29 iterations				
Coefficient covariance computed using outer product of gradients				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
LnP ₀	7.118089	0.374865	18.98840	0.0000
t	0.075614	0.018794	4.023412	0.0005
AR(1)	0.887817	0.241256	3.679982	0.0011
AR(2)	-0.400310	0.232989	-1.718148	0.0981
SIGMASQ	0.172164	0.048766	3.530433	0.0016
R-squared	0.787229	Mean dependent var		8.675188
Adjusted R-squared	0.753186	S.D. dependent var		0.914905
S.E. of regression	0.454529	Akaike info criterion		1.440681
Sum squared resid	5.164907	Schwarz criterion		1.674214
Log likelihood	-16.61021	Hannan-Quinn criter.		1.515390
F-statistic	23.12430	Durbin-Watson stat		1.767239
Prob(F-statistic)	0.000000			
Inverted AR Roots	.44-.45i		.44+.45i	

Fuente: elaboración propia con datos del U.S. Geological Survey (USGS), período 1996–2025, y estimación mediante EViews 12.

3.2 Modelo de las reservas efectivas de litio

Tocante a los resultados de la tabla 2 muestran que el modelo ARMA estimado para las reservas efectivas de litio (RE), durante el periodo 1996 a 2025, presenta un buen ajuste, con un R^2 ajustada de 0.951. El modelo en términos generales es significativo ($F = 142.294$; $p < 0.001$). El coeficiente asociado al precio contemporáneo del litio ($\alpha_1 = -8.0096$; $p = 0.0001$) presenta una relación negativa y estadísticamente significativa con las reservas efectivas, indicando que un incremento del precio se asocia con una reducción del stock de reservas. Esta relación es aún mayor para el segundo rezago del precio ($\alpha_2 = -17.9036$; $p < 0.001$), lo que sugiere que los cambios en el precio pueden tener efectos rezagados sobre las reservas. Asimismo, el término $AR(2) = 0.9730$ ($p < 0.001$) evidencia una elevada persistencia temporal en la dinámica de las reservas. El estadístico Durbin-Watson de 1.866 sugiere una reducción de la autocorrelación residual. Los resultados de la tabla 2 respaldan una relación inversa entre el precio del litio y la evolución de sus reservas efectivas.

Tabla 2. Salida de resultados del modelo de las reservas efectivas de litio.

Dependent Variable: RE				
Method: ARMA Maximum Likelihood (OPG - BHHH)				
Sample: 1996 2025				
Included observations: 30				
Convergence achieved after 9 iterations				
Coefficient covariance computed using outer product of gradients				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
α_0	38550332	422614.5	91.21868	0.0000
α_1	-8.009579	1.738389	-4.607471	0.0001
α_2	-17.90363	2.241660	-7.986774	0.0000
AR(2)	0.973011	0.152382	6.385340	0.0000
SIGMASQ	8.52E+09	2.96E+09	2.880155	0.0080
R-squared	0.957925	Mean dependent var		38347796
Adjusted R-squared	0.951193	S.D. dependent var		457734.2
S.E. of regression	101124.1	Akaike info criterion		26.23261

Sum squared resid	2.56E+11	Schwarz criterion	26.46615
Log likelihood	-388.4892	Hannan-Quinn criter.	26.30732
F-statistic	142.2942	Durbin-Watson stat	1.865705
Prob(F-statistic)	0.000000		
Inverted AR Roots	.99	-.99	

Fuente: elaboración propia con datos del U.S. Geological Survey (USGS), período 1996–2025, y estimación mediante EViews 12.

En conjunto, los resultados de las tablas 1 y 2 muestran un comportamiento en el que el precio del litio mantiene una trayectoria creciente mientras las reservas efectivas siguen una tendencia descendente durante el periodo analizado. Esta relación resulta relevante desde la perspectiva económica de un recurso no renovable, debido a que el valor del recurso y su disponibilidad cambian sobre un mismo stock fijo. El incremento sostenido del precio refleja una mayor valoración económica del litio a lo largo del tiempo, mientras que la reducción de las reservas efectivas representa la disminución del volumen disponible dentro del stock considerado.

La dinámica observada en las reservas también muestra que su comportamiento depende parcialmente de las condiciones de periodos anteriores. Por ell, la disponibilidad del recurso no responde únicamente al precio observado en un año determinado, sino que incorpora efectos acumulados de la trayectoria previa. Esto resulta importante para el análisis del agotamiento, ya que la reducción del stock no constituye un proceso aislado entre periodos, sino una situación que se va desarrollando conforme transcurre el tiempo.

Desde este punto de vista, los resultados permiten establecer una correspondencia entre dos procesos económicos del recurso: por un lado, el aumento del precio asociado con una mayor valoración de un bien cuya disponibilidad es limitada y, por otro, la reducción de las reservas efectivas. Esta relación proporciona la base para trasladar los resultados de los modelos econométricos al análisis del horizonte de agotamiento. Así, el agotamiento no se plantea únicamente como la desaparición física de una cantidad determinada de litio, sino como la disminución del stock considerado hasta alcanzar el límite definido en el escenario de análisis.

3.3 Horizonte de agotamiento estimado

De acuerdo con la ecuación (5), los resultados de los modelos estimados en las tablas 1 y 2, junto con la calibración del precio promedio del litio de 9,000 USD por tonelada para 2025, considerado como $t = 0$, permitieron obtener la trayectoria de extracción asociada al agotamiento del stock:

$$Q_t = 15924.62e^{0.075614t}$$

Esta expresión indica una tasa de extracción creciente en el tiempo, consistente con la trayectoria ascendente estimada para el precio y con la relación inversa identificada entre el precio y las reservas efectivas. Posteriormente, mediante la ecuación (7), se determinó el horizonte de agotamiento bajo la condición de stock finito, utilizando como condición inicial las 37 millones de toneladas de reservas reportadas para 2025 y el precio de 9,000 USD por tonelada. El resultado obtenido fue:

$$T = 68.43$$

Por tanto, bajo los supuestos establecidos, el agotamiento teórico del stock considerado en el modelo se alcanzaría aproximadamente en 68 años y 5 meses después de 2025, lo que sitúa el horizonte estimado alrededor del año 2093. Este resultado representa una medida de disponibilidad temporal del recurso a partir de la trayectoria de precios y de la relación estimada entre el precio y las reservas efectivas. En este sentido, el horizonte obtenido no debe interpretarse como una fecha en la que el litio dejará de estar disponible físicamente, sino como el momento en que el stock de reservas considerado alcanzaría su límite dentro de las relaciones especificadas por el modelo.

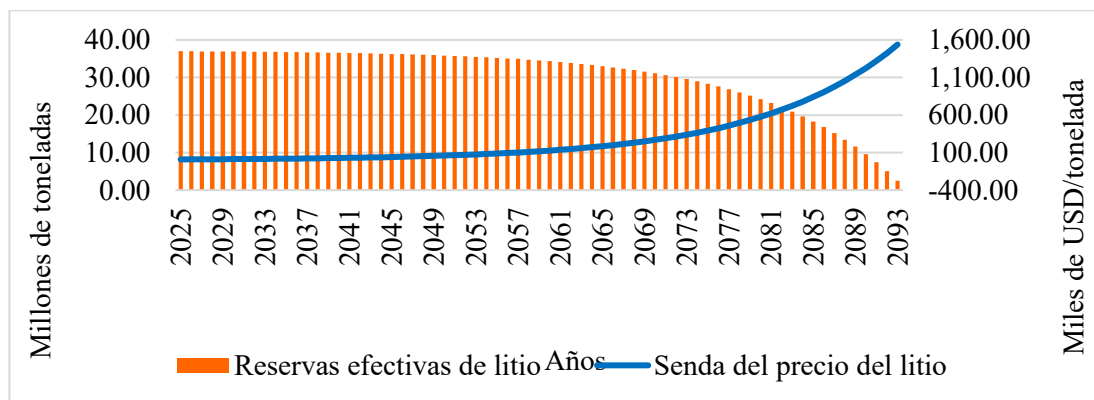
La estimación parte de la condición de stock fijo, por lo que supone que durante el periodo de proyección no se incorporan nuevas reservas provenientes de descubrimientos, exploración o reclasificación de recursos, ni se consideran mecanismos de recuperación mediante reciclaje. Asimismo, se mantiene la trayectoria de crecimiento del precio estimada a partir del periodo de tiempo analizado y la relación entre precios y reservas obtenida mediante el modelo econométrico. Es por ello que, cualquier modificación importante en estas relaciones podría alterar el horizonte calculado. Por ejemplo, avances tecnológicos que reduzcan los costos de extracción, cambios en la intensidad de uso del litio, el desarrollo de sustitutos, una mayor recuperación del material mediante reciclaje o

la incorporación de nuevos yacimientos modificarían las condiciones bajo las cuales se obtuvo la estimación.

De esta manera, los 68.43 años deben entenderse como un horizonte teórico condicionado por la información histórica y por los supuestos adoptados, y no como una predicción determinista de la disponibilidad mundial de litio. Su utilidad radica en mostrar que, aun considerando un stock inicial finito, la dinámica estimada de precios y reservas puede traducirse en un horizonte temporal definido de agotamiento. Por lo tanto, el resultado proporciona una referencia para analizar la dimensión intertemporal de la disponibilidad del recurso, manteniendo explícitas las condiciones que sustentan dicha estimación.

La figura 1 muestra las trayectorias estimadas del precio del litio y de las reservas efectivas bajo el escenario de stock fijo. A partir de la calibración para 2025, con un precio inicial de 9,000 USD por tonelada y reservas iniciales de 37 millones de toneladas, la senda del precio presenta un crecimiento exponencial consistente con la tasa estimada de 7.56% anual. Bajo esta trayectoria, el precio alcanzaría aproximadamente 1.59 millones de USD por tonelada al final del horizonte considerado. En contraste, las reservas efectivas muestran una reducción progresiva a través del tiempo, cuya disminución se vuelve más pronunciada durante los últimos años de la proyección, hasta alcanzar el límite del stock alrededor de 2093. De forma gráfica, se muestra el horizonte teórico de agotamiento de 68.43 años a partir de 2025.

Figura 1. Trayectorias proyectadas del precio del litio y del agotamiento de las reservas bajo un escenario de stock fijo, 2025 – 2093.



Fuente: elaboración propia con base en las estimaciones econométricas y los supuestos establecidos en el estudio.

Como se observó en la figura 1, las reducciones en las reservas no mantienen la misma intensidad durante todo el horizonte. Durante los primeros años, el descenso del stock es relativamente gradual, pero conforme avanza el periodo la reducción se hace más marcada, particularmente durante las últimas décadas de proyección. Este comportamiento indicó que la trayectoria de la disminución cobra mayor fuerza mientras se aproxima el límite del stock, mientras que por el lado del precio, éste se mantiene creciente durante todo el periodo, por lo que ambas series presentan comportamientos opuestos: mientras el volumen disponible disminuye, el valor monetario asociado al recurso aumenta.

La diferencia entre ambas trayectorias tiene una implicación económica relevante. En un escenario en el que no se incorporan nuevas reservas, la disponibilidad de una cantidad finita de litio se vuelve cada vez más restrictiva conforme avanza el tiempo. La senda creciente del precio representa, bajo el supuesto del modelo, la valoración económica de un recurso cuya existencia dentro del stock considerado es cada vez menor. Por su parte, la disminución de las reservas muestra que el crecimiento del valor económico del recurso no implica una ampliación de su disponibilidad física.

El punto en el que la trayectoria de las reservas alcanza el límite del stock, alrededor de 2093, constituye el horizonte de agotamiento calculado por el modelo. La figura 1 representa una trayectoria condicionada a un escenario cerrado, en el que no se consideran nuevos descubrimientos, incorporación de recursos a las reservas, reciclaje ni cambios tecnológicos que modifiquen las condiciones de extracción. Su principal utilidad es mostrar cómo, bajo estas condiciones, la interacción entre la evolución del precio y la disponibilidad de un stock finito conduce a un horizonte temporal determinado.

3.4 Discusión

Los cálculos en cuanto a la disponibilidad de un recurso no renovable pueden diferir, sin embargo, existen aproximaciones y similitudes de varios autores al realizar una búsqueda en la literatura especializada. El año crítico para el litio, de acuerdo con el cálculo realizado, fue 2093, donde se pronostica una escasez del recurso a nivel mundial, no contando con el material reciclado sino solo litio virgen. Diversos autores pronostican problemas de suministro de litio virgen entre los años 2030 a 2050. Por otro lado, las

alternativas para sustituir este material son prometedoras, aunque poco explotadas y no ofrecen las bondades que el litio ofrece.

3.4.1 Perspectivas para 2030 - 2050

Dentro de los estudios sobre el agotamiento del litio, destaca el índice de disponibilidad de material calculado por Nate et al. (2021). En este estudio, se analizaron 17 minerales clave, incluido el litio, y se concluyó que este recurso enfrentará serias dificultades de abastecimiento en los escenarios analizados hacia 2050. El índice de disponibilidad desarrollado por estos investigadores varía de 1 a 0, donde 1 indica una total disponibilidad del recurso y 0 señala una disponibilidad nula. Para el escenario proyectado al año 2050, el índice de disponibilidad para el litio se sitúa en 0.14. Este bajo valor no solo sugiere una disponibilidad limitada, sino que también pone de manifiesto un alto nivel de incertidumbre en torno al suministro futuro de litio, lo cual genera preocupación para sectores dependientes de este mineral. El análisis de Nate et al. (2021) señala que, en comparación con otros minerales evaluados, el litio muestra un riesgo considerablemente mayor de escasez, lo cual lo convierte en un foco rojo para la planificación a largo plazo. La combinación de una demanda creciente impulsada por la transición energética global y las limitaciones en la extracción y procesamiento del litio contribuye a este pronóstico pesimista.

Otra estimación significativa proviene de Han et al. (2023), quienes realizaron un análisis detallado en un escenario de alta oferta y demanda, destacando que el mayor riesgo de escasez se presenta en el litio, seguido por el cobalto. Estos dos elementos son fundamentales para la producción de baterías de iones de litio, que se utilizan ampliamente en vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos, así como en sistemas de almacenamiento de energía. En su investigación, Han et al. estiman que si la tasa de crecimiento anual compuesta de la demanda mundial de litio y cobalto alcanza un 15%, el mercado enfrentará un déficit de oferta significativo para el año 2030. Esta predicción es particularmente alarmante, ya que indica una escasez temprana.

Este escenario resalta no solo la acelerada demanda de estos minerales, impulsada por la transición global hacia la energía limpia y la electrificación del transporte, sino también las limitaciones estructurales y logísticas para aumentar la producción de manera

rápida y sostenible. Los autores sugieren que se necesita una acción inmediata para explorar alternativas como el reciclaje de baterías, la búsqueda de fuentes de suministro diversificadas y el desarrollo de tecnologías que puedan mitigar la dependencia del litio y el cobalto, para evitar una crisis de suministro que podría tener graves consecuencias económicas y tecnológicas.

Para Calvo y Valero (2022), la demanda anual de litio aumentará más de diez veces para el año 2050, impulsada principalmente por el crecimiento del sector de fabricación de automóviles eléctricos. La proyección de estos investigadores resalta que el litio se convertirá en un recurso extremadamente limitado, si no se encuentran alternativas o mejoras en la eficiencia del uso de este mineral en las próximas décadas.

Nuevamente, el año 2050 se presenta como un punto crucial de convergencia con los resultados de otros estudios, como el presente análisis, que también señala este año como un umbral crítico para la disponibilidad del litio. Esta perspectiva subraya la urgencia de invertir en tecnologías de reciclaje, la búsqueda de materiales alternativos para la fabricación de baterías y la diversificación de las fuentes de litio para garantizar la sostenibilidad de este recurso. La falta de acciones proactivas podría llevar a una crisis significativa en la industria de los vehículos eléctricos y otras tecnologías dependientes del litio, afectando los esfuerzos globales para combatir el cambio climático.

En países como Estado Unidos surgen preocupaciones sobre la escasez de "minerales críticos", los cuales son minerales esenciales para la fabricación de baterías y otras tecnologías renovables. Si se toma como referencia los patrones de consumo actuales, la demanda de litio en Estados Unidos, utilizado principalmente en baterías, podría requerir en 2050 hasta tres veces la cantidad de litio que se produce a nivel mundial en la actualidad, ocasionando un desabasto tan solo en dicho país (Battistoni & Riofrancos, 2023).

Deetman et al. (2018) respaldan el acelerado crecimiento en la demanda de litio por la adopción de vehículos eléctricos como medida de reducir los gases de efecto invernadero como efecto de las políticas globales contra el cambio climático; se resalta el escenario del año 2050 como la década crítica y de escasez del litio, con una demanda diez veces mayor a la que se tenía en 2018.

Todo apunta a la búsqueda de alternativas para sustituir el litio en la creación de baterías, debido a las preocupaciones sobre su escasez futura y los altos costos asociados con su extracción y procesamiento. Uno de los sustitutos más prometedores son las baterías a base de sodio. Este material ofrece varias ventajas significativas en comparación con el litio. El sodio es abundante y se encuentra fácilmente en la corteza terrestre y en el agua de mar, lo que lo convierte en una opción de bajo costo. Además, las baterías de sodio tienen la capacidad de proporcionar un alto voltaje, similar al de las baterías de litio, lo que las convierte en un candidato ideal para reemplazar al litio en muchas aplicaciones tecnológicas (Wang et al., 2021).

Además, las baterías de sodio presentan menos preocupaciones ambientales en términos de minería y procesamiento, lo que podría hacerlas más atractivas desde una perspectiva de sostenibilidad. Este enfoque más ecológico y económico hacia el almacenamiento de energía ha impulsado el interés en la investigación de baterías de sodio y ha llevado a la colaboración entre instituciones académicas, la industria y gobiernos para acelerar su desarrollo. Si se logran superar las barreras técnicas actuales, las baterías de sodio podrían desempeñar un papel fundamental en la transición hacia un futuro energético más sostenible y menos dependiente de los recursos limitados como el litio.

Todo indica un escenario pesimista para el litio en el periodo de 2030 a 2050, los autores citados concuerdan en ese periodo, sumando el cálculo de agotamiento presentado en este trabajo, todo indica que la industria de autos eléctricos enfrentaría problemas de suministro de baterías a base de litio, por lo que es crucial nuevas alternativas de baterías.

3.4.2 Agotamiento de litio versus petróleo

Es inminente el comparativo entre recursos, litio y petróleo, dos recursos importantes, por un lado, el novedoso litio para generar baterías implementadas en autos eléctricos, por el otro, el petróleo, materia prima para los combustibles como gasolina y diésel; el punto de comparativa es el tiempo de agotamiento. Avhad y Marchetti (2015) en su investigación de biodiésel, dentro de algunos hallazgos secundarios, mencionaron que, bajo la continuidad de los patrones de consumo del petróleo, éste podría enfrentar una situación de escasez en un horizonte aproximado de 40 años, tomando como referencia la información disponible alrededor de 2013, lo que situaría dicho horizonte hacia 2053,

aproximadamente. En contraste, los resultados obtenidos en este estudio estiman que el litio podría presentar una situación de escasez aproximadamente hacia 2093, es decir, alrededor de cuatro décadas después del horizonte señalado para el petróleo. Esta diferencia temporal sugiere que, bajo las condiciones y supuestos establecidos en el presente estudio, las reservas de litio presentan un horizonte de disponibilidad más prolongado; sin embargo, ello no implica que el recurso se encuentre exento de presiones derivadas del crecimiento de la demanda. Por el contrario, la importancia estratégica del litio para las tecnologías asociadas con la transición energética hace necesario considerar su disponibilidad futura y la dinámica de sus precios como elementos relevantes para anticipar posibles escenarios de escasez.

Otros escenarios optimistas en cuanto al petróleo sitúan los años críticos de agotamiento entre 2073 y 2091, como lo revelan las estimaciones de Salaet y Roca (2010). Estos horizontes muestran que las proyecciones sobre la disponibilidad de los recursos no renovables pueden variar considerablemente dependiendo de los supuestos sobre consumo, producción y disponibilidad de reservas. En este sentido, el horizonte de escasez del litio estimado en el presente estudio, ubicado alrededor de 2093, se encuentra en un rango temporal similar al de los escenarios más prolongados planteados para el petróleo. Esta coincidencia temporal resulta relevante debido a que el litio constituye un insumo estratégico para tecnologías vinculadas con la transición energética y, por tanto, su disponibilidad futura adquiere importancia en un contexto en el que también persisten restricciones sobre los combustibles fósiles. No obstante, la comparación debe interpretarse cautelosamente, ya que ambos horizontes fueron obtenidos bajo diferentes métodos, supuestos y condiciones de mercado.

En conjunto, los resultados sugirieron que la transición hacia sistemas energéticos con menor dependencia de combustibles fósiles no elimina las restricciones asociadas a la disponibilidad de recursos no renovables, sino que puede trasladarlas hacia minerales estratégicos como el litio. Bajo los supuestos establecidos en este estudio, el horizonte de escasez del litio se estima alrededor de 2093, un periodo que se encuentra próximo a los escenarios de agotamiento más prolongados reportados para el petróleo. Esta cercanía temporal adquiere relevancia debido al papel creciente del litio en las baterías utilizadas en vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía. Por tanto, la transición

energética debe considerar no solo la reducción del consumo de combustibles fósiles, sino también la disponibilidad de los minerales que sustentan las tecnologías empleadas para dicha transición. En este sentido, los resultados ponen de manifiesto la necesidad de incorporar la disponibilidad futura del litio en la planificación de largo plazo, particularmente ante escenarios de crecimiento sostenido de su demanda.

4. Conclusión

El presente estudio tuvo como objetivo estimar el horizonte temporal de agotamiento de las reservas mundiales de litio mediante la integración de una trayectoria econométrica del precio y una función dinámica de reservas efectivas, bajo el supuesto de un stock fijo y ausencia de incorporación de nuevas reservas durante el periodo de proyección. Los resultados obtenidos muestran, para el periodo de 1996 a 2025, una tendencia creciente estadísticamente significativa del precio del litio, con una tasa de crecimiento continuo estimada de 7.56% anual, así como una relación negativa y estadísticamente significativa entre el precio y las reservas efectivas, tanto para el precio contemporáneo como para su segundo rezago. Estos resultados permitieron establecer una relación dinámica entre la evolución del precio y la reducción del stock de reservas considerado.

A partir de la integración de ambas relaciones y utilizando como condición inicial las 37 millones de toneladas de reservas reportadas para 2025 y un precio de referencia de 9,000 USD por tonelada, el modelo estimó un horizonte de agotamiento de aproximadamente 68.43 años, lo que sitúa el resultado alrededor del año 2093. En consecuencia, los resultados son consistentes con la hipótesis de trabajo, en el sentido de que una trayectoria creciente del precio, asociada en el modelo con una reducción de las reservas efectivas, permite derivar un horizonte finito de agotamiento para un stock determinado. No obstante, este resultado debe interpretarse como un escenario teórico condicionado por los parámetros estimados y por el supuesto de stock fijo, y no como una fecha determinista de agotamiento físico del litio a escala mundial.

El resultado también permite diferenciar entre la escasez de las reservas actualmente consideradas y la disponibilidad futura del recurso. La literatura muestra que las estimaciones de disponibilidad pueden modificarse como consecuencia de nuevos descubrimientos, transformación de recursos en reservas, innovación tecnológica,

reciclaje, sustitución y cambios en las condiciones económicas de extracción. Por ello, el horizonte de 2093 representa la trayectoria del stock analizado bajo las condiciones establecidas en este estudio y constituye un punto de referencia para evaluar la dimensión intertemporal de la escasez del litio. En este sentido, la transición energética no elimina las restricciones asociadas a los recursos no renovables, sino que incrementa la importancia de considerar la disponibilidad futura de los minerales estratégicos que sustentan tecnologías como las baterías.

Por último, los resultados sugieren que la planificación de largo plazo del suministro de litio debe considerar simultáneamente la dinámica de los precios, la evolución de las reservas y los mecanismos capaces de modificar la disponibilidad futura del recurso. La exploración y transformación de recursos en reservas, el reciclaje y el desarrollo de tecnologías que reduzcan la intensidad de uso o permitan sustituir parcialmente al litio constituyen elementos que podrían modificar el horizonte estimado. Por tanto, el valor principal del presente estudio no radica en establecer una fecha definitiva de agotamiento, sino en proporcionar una estimación del horizonte de escasez de un stock fijo de reservas y una aproximación cuantitativa para analizar la relación entre precio, reservas y disponibilidad temporal del litio.

5. Referencias

- Ambrose, H., & Kendall, A. (2020). Understanding the future of lithium: Part 1, resource model. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 80–89. <https://doi.org/10.1111/jiec.12949>
- Avhad, M. R., & Marchetti, J. M. (2015). A review on recent advancement in catalytic materials for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 696–718. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.038>
- Battistoni, A., & Riofrancos, T. (2023). The Lithium Problem: An Interview with Thea Riofrancos. *Dissent*, 70(2), 72–81. <https://doi.org/10.1353/dss.2023.0012>
- Brown, T.J.; Idoine, N.E.; Wrighton, C.E.; Raycraft, E.R.; Hobbs, S.F.; Shaw, R.A.; Everett, P.; Deady, E.A.; Kresse, C. (2021). World mineral production 2015-2019. Nottingham, UK, British Geological Survey, 96pp. (World Mineral Statistics). <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/529923>

- Cabello, José. (2022). Reservas, recursos y exploración de litio en salares del norte de Chile. *Andean geology*, 49(2), 297-306. <https://dx.doi.org/10.5027/andgeov49n2-3444>
- Calvo, G., & Valero, A. (2022). Strategic mineral resources: Availability and future estimations for the renewable energy sector. *Environmental Development*, 41. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2021.100640>
- Cotrino-Teatino, M. A., & Marquina-Araujo, J. J. (2024). Hotelling rule in non-renewable resources: A bibliometric and systematic literature review analysis. *Resources Policy*, 98, 105342. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105342>
- Deetman, S., Pauliuk, S., Van Vuuren, D. P., Van Der Voet, E., & Tukker, A. (2018). Scenarios for Demand Growth of Metals in Electricity Generation Technologies, Cars, and Electronic Appliances. *Environmental Science and Technology*, 52(8), 4950–4959. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05549>
- Energy Institute. (2023). Resources and data downloads. *Statistical Review of World Energy*. <https://www.energyinst.org/statistical-review/resources-and-data-downloads>
- Ferreira da Cunha, R. and Missemmer, A. (2020), The Hotelling rule in non-renewable resource economics: A reassessment. *Canadian Journal of Economics/Revue canadienne d'économique*, 53: 800-820. <https://doi.org/10.1111/caje.12444>
- Fleming, M., Kannan, S. G., & Eggert, R. (2024). Long-run availability of mineral resources: The dynamic case of lithium. *Resources Policy*, 97, 105226. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105226>
- Fornillo, B., & Gamba, M. (2019). Industria, ciencia y política en el Triángulo del Litio. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, (Vol30No58). <https://doi.org/10.33255/3058/447>
- Han, S., Zhenghao, M., Meilin, L., Xiaohui, Y., & Xiaoxue, W. (2023). Global supply sustainability assessment of critical metals for clean energy technology. *Resources Policy*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103994>
- Hotelling, H. (1931). The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy*, 39(2), 137–175. <http://www.jstor.org/stable/1822328>

- International Energy Agency (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. IEA Paris. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>, Licence: CC BY 4.0
- Nate, S., Bilan, Y., Kurylo, M., Lyashenko, O., Napieralski, P., & Kharlamova, G. (2021). Mineral policy within the framework of limited critical resources and a green energy transition. *Energies*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/en14092688>
- Salaet Fernández, S., & Roca Jusmet, J. (2010). Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de co2: algunos posibles escenarios futuros de emisiones. *Revista Galega de Economía*, 19(1), 1-19. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=39113124001>
- Sánchez, Ricardo. & Pérez, Roberto. (2023). El litio de México. *Avance Y Perspectiva. CIVESTAV*. Vol. 9, No. 3. <https://avanceyperspectiva.cinvestav.mx/el-litio-de-mexico/>
- Sverdrup, H. U. (2016). Modelling global extraction, supply, price and depletion of the extractable geological resources with the LITHIUM model. *Resources, Conservation and Recycling*, 114, 112–129. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.07.002>
- U.S. Geological Survey (2023). Lithium Statistics and Information, 1952-2023. USGS. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lithium-statistics-and-information>
- Vikström, H., Davidsson, S., Höök, M. (2013). Lithium availability and future production outlooks. *Applied Energy*, 110(10): 252-266. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.005>
- Wang, Y., Zhang, Y., Cheng, H., Ni, Z., Wang, Y., Xia, G., ... Zeng, X. (2021). Research progress toward room temperature sodium sulfur batteries: A review. *Molecules*. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules26061535>
- Wu, Y., Yuan, Q., Yang, M., Zhai, M., Hu, G., et al. (2024). Impact of circular economy on the long-term allocation structure of primary and secondary lithium. *Communications Earth & Environment*, 5, 503. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01667-2>

Yaksic, A., & Tilton, J. E. (2009). Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: The case of lithium. *Resources Policy*, 34(4), 185–194.
<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2009.05.002>

CAPÍTULO 4. EFICIENCIA EXTRACTIVA DEL LITIO: ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PAÍSES PRODUCTORES MEDIANTE ANÁLISIS ENVOLVENTE DE DATOS⁴

Pablo Iván Flores González¹, Dixia Dania Vega Valdivia², Miguel Ángel Martínez Damián³, Juan Hernández Ortiz⁴

¹Doctorante de la División de Ciencias Económico-Administrativas de la Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México. CP. 56230. Tel.: 595 952 1668 ext. 1668, 5472. Correo electrónico: pablo.floresgz@hotmail.com. ORCID: 0000-0003-1436-2371

^{2*}Profesor investigador de la División de Ciencias Económico-Administrativas de la Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México. CP. 56230. Tel.: 595 952 1668 ext. 1668, 5472. Correo electrónico: dixiadanía@gmail.com. ORCID: 0000-0002-6465-3321

³Profesor investigador de la División de Ciencias Económico-Administrativas de la Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México. CP. 56230. Tel.: 595 952 1668 ext. 1668, 5472. Correo electrónico: angel24559@gmail.com. ORCID: 0000-0002-1215-7406

⁴Profesor investigador de la División de Ciencias Económico-Administrativas de la Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México. CP. 56230. Tel.: 595 952 1668 ext. 1668, 5472. Correo electrónico: jhdzo@yahoo.com.mx. ORCID: 0000-0001-5957-594X

Resumen

Este estudio evaluó y comparó la eficiencia extractiva relativa de nueve países productores de litio (Argentina, Australia, Brasil, Canadá, Chile, China, Estados Unidos, Portugal y Zimbabue) mediante un modelo de Análisis Envolvente de Datos (DEA) transversal con datos de 2025. Se utilizaron como insumos las reservas reportadas de litio y el empleo en minería/canteras (ILOSTAT), y como producto la producción del mineral (Statistical Review of World Energy 2026).

Los resultados revelan una marcada heterogeneidad productiva: Australia, China, Portugal y Zimbabue alcanzaron el 100 % de eficiencia, delimitando la frontera empírica. En contraste, Argentina, Brasil, Canadá, Chile y Estados Unidos se posicionaron por debajo de esta. Sobresale el caso de Chile, que, a pesar de poseer las mayores reservas de la muestra, registró una eficiencia del 52.5 %, mientras que países con escalas menores lograron una eficiencia plena.

⁴ Artículo enviado a la Revista de Economía editada por la Facultad de Economía de Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán.

Esto evidencia que la abundancia geológica por sí sola no asegura un aprovechamiento óptimo del recurso.

Las principales restricciones del modelo comprenden la naturaleza transversal de la muestra, el uso de datos agregados de empleo minero, el tamaño acotado de países y la omisión de factores tecnológicos y ambientales. La novedad de la investigación radica en integrar conjuntamente la dotación del recurso y el trabajo para analizar la capacidad de transformación de reservas en producción. En conclusión, se confirma que la eficiencia extractiva difiere entre naciones y que la disponibilidad de reservas no constituye un garante único de eficiencia operacional.

Palabras clave: litio, eficiencia extractiva, análisis envolvente de datos, reservas minerales, producción minera.

Clasificación JEL: C61, Q12, R11

Abstract

This study evaluated and compared the relative extraction efficiency of nine lithium-producing countries (Argentina, Australia, Brazil, Canada, Chile, China, the United States, Portugal, and Zimbabwe) using a cross-sectional Data Envelopment Analysis (DEA) model based on 2025 data. Reported lithium reserves and mining/quarrying employment (ILOSTAT) were used as inputs, while mineral production (Statistical Review of World Energy 2026) served as the output.

The results reveal marked heterogeneity in production: Australia, China, Portugal, and Zimbabwe achieved 100% efficiency, thereby defining the empirical frontier. In contrast, Argentina, Brazil, Canada, Chile, and the United States fell below this frontier. Chile stands out; despite possessing the largest reserves in the sample, it recorded an efficiency of 52.5%, whereas countries with smaller scales achieved full efficiency. This demonstrates that geological abundance alone does not ensure optimal resource utilization.

The model's main limitations include the cross-sectional nature of the sample, the use of aggregated mining employment data, the limited number of countries, and the omission of technological and environmental factors. The research is novel in its integration of resource endowment and labor to analyze the capacity to transform reserves into production. In conclusion, the study confirms that extraction efficiency varies across nations and that reserve availability is not the sole determinant of operational efficiency.

Keywords: lithium, extraction efficiency, data envelopment analysis, mineral reserves, mining production.

JEL Classification: C61, Q12, R11

1. Introducción

El proceso de transición hacia sistemas energéticos de menores emisiones ha incrementado la importancia económica de un conjunto de minerales requeridos por tecnologías como los vehículos eléctricos, los sistemas de almacenamiento de energía y diversos componentes de las tecnologías renovables. Entre estos recursos, el litio ocupa una posición particular debido al crecimiento de las baterías de ion-litio y a su utilización en aplicaciones asociadas con la electrificación del transporte y el almacenamiento energético. La expansión de estas tecnologías ha trasladado parte de la atención desde la disponibilidad de combustibles fósiles hacia la capacidad de asegurar el suministro de minerales considerados críticos para las nuevas cadenas productivas. En este contexto, el litio ha dejado de ser únicamente un recurso minero especializado para adquirir relevancia en las estrategias industriales, energéticas y comerciales de distintos países (Sánchez-López, 2023).

La importancia del litio no depende exclusivamente de su utilización final, sino también de las características de su oferta. La producción mundial se encuentra concentrada en un número relativamente reducido de países, mientras que las etapas posteriores de procesamiento y manufactura presentan una concentración geográfica todavía mayor. Esta configuración genera relaciones de dependencia entre países productores, procesadores y consumidores, además de introducir riesgos asociados con interrupciones de suministro, cambios tecnológicos y decisiones de política industrial. Liu et al. (2021) encontraron que el comercio de litio presenta relaciones de dependencia relevantes entre países y que la concentración de los flujos comerciales puede incrementar la exposición a perturbaciones. En una perspectiva complementaria, Sánchez-López (2023) señaló que la distribución geográfica de la extracción, el procesamiento y la fabricación de baterías está configurando nuevas relaciones económicas y geopolíticas alrededor del litio.

Esta situación ha intensificado el interés por incrementar y diversificar la oferta de litio. Sin embargo, aumentar la disponibilidad del recurso no necesariamente significa incrementar de manera equivalente la producción minera. El desarrollo de un proyecto requiere transformar un recurso geológico en reservas económicamente aprovechables y, posteriormente, en capacidad efectiva de extracción y procesamiento. En este proceso intervienen factores económicos, tecnológicos, geológicos, regulatorios y territoriales. Buarque et al. (2024), a partir del análisis de proyectos de litio a escala mundial, encontraron que la transición desde la exploración hacia la producción constituye un proceso complejo en el que intervienen distintas condiciones y que no todos los proyectos alcanzan la etapa de operación. Esto significa que la existencia de recursos o reservas constituye una condición necesaria para la actividad minera, pero no representa por sí misma una medida de la capacidad productiva efectiva de un país.

La relación entre disponibilidad y producción adquiere especial relevancia debido al crecimiento esperado de la demanda. Por ello, la discusión sobre la suficiencia del litio no puede reducirse a comparar reservas mundiales con demanda proyectada. También es necesario considerar la capacidad de los sistemas productivos para convertir las dotaciones minerales existentes en oferta efectiva. Fleming et al. (2024), mediante una evaluación dinámica de los recursos de litio, encontraron que los recursos identificados aumentaron considerablemente durante las últimas décadas y que la disponibilidad física del mineral difícilmente constituiría por sí sola la principal restricción para la transición energética.

Este planteamiento permite distinguir entre dos dimensiones que con frecuencia se analizan de manera conjunta: la dotación de recursos minerales y la capacidad para aprovecharlos productivamente. Un país puede contar con importantes reservas y, simultáneamente, presentar una producción relativamente limitada. De manera inversa, una

dotación menor puede acompañarse de una mayor producción relativa cuando existen condiciones que permiten transformar de manera más efectiva los factores disponibles en producto. Esta diferencia resulta particularmente relevante para el litio debido a la diversidad de depósitos y tecnologías de extracción. La producción puede provenir de salmueras o de minerales de roca dura, entre otras fuentes, y cada alternativa presenta diferentes requerimientos técnicos, económicos y ambientales. Por ello, comparar exclusivamente los volúmenes de producción puede favorecer a los países de mayor escala y ocultar diferencias en la utilización relativa de los recursos empleados.

Esta cuestión representa un problema de aprovechamiento de un recurso natural no renovable. Las reservas constituyen un activo mineral cuya contribución al desarrollo económico depende de la capacidad de incorporarlo al proceso productivo. En consecuencia, la magnitud de las reservas no debería interpretarse como equivalente a la capacidad extractiva de un país. La existencia de una brecha entre dotación mineral y producción puede estar relacionada con infraestructura, disponibilidad de capital, empleo, tecnología, características geológicas, regulación, capacidad empresarial o condiciones de mercado. No obstante, la importancia relativa de estos factores puede variar entre países y no puede inferirse únicamente a partir de los volúmenes de reservas o producción.

El problema de investigación de este estudio surge precisamente de esta diferencia entre disponibilidad del recurso y capacidad relativa de extracción. Aunque la literatura sobre litio ha avanzado en el análisis de la demanda, la seguridad del suministro, las cadenas de valor, la geopolítica y los impactos ambientales, persiste la necesidad de contar con medidas comparables que permitan evaluar cómo diferentes países transforman sus recursos disponibles y factores productivos en producción de litio. Una parte importante de los estudios se concentra en la suficiencia futura del suministro o en los riesgos asociados con la concentración de la producción, mientras que una comparación directa de la eficiencia extractiva entre países productores puede aportar una dimensión adicional para comprender las diferencias observadas en el desempeño minero. Esta perspectiva resulta relevante porque el crecimiento de la oferta mundial no depende únicamente de encontrar nuevos recursos, sino también de la capacidad de los países productores para aprovechar de manera productiva los recursos de los que disponen.

El análisis de la eficiencia resulta, además, pertinente frente al carácter estratégico que ha adquirido el litio. La creciente demanda de minerales para tecnologías bajas en carbono ha generado oportunidades económicas para los países productores, pero también riesgos asociados con la concentración de la oferta, los costos de los proyectos, las condiciones ambientales y las relaciones sociales en los territorios mineros. Jiskani et al. (2022) mencionan que garantizar el suministro de minerales críticos requiere considerar simultáneamente factores económicos, sociales, ambientales y de riesgo que pueden afectar el desarrollo de los proyectos mineros.

Esta consideración no significa que la eficiencia extractiva sea equivalente a sostenibilidad. Una medida de eficiencia basada en reservas, empleo y producción permite responder a una pregunta específica: qué países presentan las combinaciones observadas más favorables entre los factores considerados y el producto obtenido. Otros componentes del desempeño minero, como el consumo de agua, energía, emisiones, residuos, impactos territoriales o aceptación social corresponden a dimensiones diferentes que pueden incorporarse en investigaciones posteriores. Esta delimitación resulta importante para evitar interpretar una mayor eficiencia productiva como evidencia de un desempeño ambiental o social superior.

Para abordar el problema planteado, el objetivo de esta investigación es estimar y comparar la eficiencia extractiva relativa de los principales países productores de litio mediante un modelo de Análisis Envolvente de Datos (DEA), considerando como variables de entrada las reservas reportadas de litio y el empleo en minería y explotación de canteras, y como variable de salida la producción de litio correspondiente a 2025. La utilización del DEA permite construir una frontera empírica a partir de las unidades observadas y evaluar las diferencias relativas entre países sin imponer previamente una forma funcional a la relación entre entradas y salida. De esta manera, el análisis se orienta a identificar qué combinaciones de recursos y producción se encuentran sobre la frontera y cuáles presentan una posición relativa inferior.

A partir de este objetivo se formula la siguiente pregunta de investigación ¿existen diferencias en la eficiencia extractiva relativa entre los países productores de litio y en qué medida la dotación de reservas y el empleo minero se relacionan con su capacidad para generar producción de litio? La pregunta busca superar una comparación basada exclusivamente en el tamaño de las reservas o en el volumen producido, incorporando simultáneamente los factores utilizados en el proceso extractivo. Así, la eficiencia se entiende como una relación relativa entre las entradas consideradas y la producción observada, y no como una medida absoluta del desempeño minero de cada país.

En correspondencia, la hipótesis de investigación sostiene que la eficiencia extractiva relativa difiere entre los países productores de litio y que una mayor dotación de reservas no garantiza, por sí misma, una posición eficiente en la frontera DEA, debido a que el desempeño depende de la combinación observada entre disponibilidad del recurso, factor trabajo y producción obtenida. Esta hipótesis permite contrastar si los países con mayores reservas son necesariamente los que presentan las combinaciones más eficientes o si, por el contrario, existen países con dotaciones menores que alcanzan una posición relativamente eficiente debido a una relación más favorable entre los recursos considerados y su producción.

La contribución del estudio se encuentra, por tanto, en incorporar una dimensión comparativa de eficiencia al análisis internacional del litio. En lugar de considerar las reservas como un indicador directo de capacidad productiva o la producción como una medida suficiente de desempeño, se propone evaluar conjuntamente la dotación del recurso, el factor trabajo y el resultado extractivo. La comparación entre países productores permite identificar distintas configuraciones de eficiencia y, al mismo tiempo, establecer una base para investigaciones posteriores que incorporen variables tecnológicas, económicas, ambientales e institucionales. El análisis resulta especialmente pertinente en un mercado en expansión, donde la seguridad del suministro depende no solo de la existencia física del mineral, sino también de la capacidad para convertir los recursos disponibles en producción efectiva de manera económicamente viable.

Bajo este enfoque, el estudio no pretende establecer un ordenamiento absoluto de las industrias nacionales de litio ni determinar cuáles países poseen las mejores condiciones geológicas. La eficiencia estimada corresponde a una comparación relativa entre las unidades incluidas en la muestra y a las variables seleccionadas para el modelo. Esta delimitación permite interpretar los resultados en términos de aprovechamiento relativo de los factores considerados y evita atribuir al índice DEA significados que excedan la estructura del modelo. A partir de esta perspectiva, la investigación contribuye a la discusión sobre el aprovechamiento de los minerales estratégicos para la transición energética y proporciona evidencia cuantitativa sobre las diferencias existentes en la capacidad extractiva relativa de los países productores de litio.

2. Materiales y métodos

2.1 Datos y selección de variables

El análisis estimó la eficiencia extractiva relativa de nueve países productores de litio: Argentina, Australia, Brasil, Canadá, Chile, China, Portugal, Estados Unidos y Zimbabwe. Se empleó información correspondiente a 2025. La selección de las unidades estuvo condicionada por la disponibilidad de información homogénea para las variables incorporadas al modelo, con el propósito de mantener comparabilidad entre países.

El modelo consideró dos variables de entrada y una de salida. Las entradas corresponden a las reservas reportadas de litio y al empleo en minería y explotación de canteras, mientras que la salida corresponde a la producción de litio. Las reservas y la producción se expresaron en miles de toneladas, mientras que el empleo se expresó en miles de personas. Los datos de reservas y producción fueron obtenidos del Statistical Review of World Energy 2026 del Energy Institute, mientras que el empleo proviene de ILOSTAT, mediante el indicador de empleo por sexo, edad y actividad económica correspondiente al nivel 2 de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme.

La selección de las reservas como variable de entrada responde a la naturaleza particular de la actividad minera. A diferencia de otros sectores productivos, la extracción depende de la disponibilidad de un recurso natural que constituye parte de la base material del proceso productivo. En consecuencia, incorporar las reservas permitió distinguir entre la cantidad de recurso disponible y la capacidad de transformarlo en producción. Esta consideración resulta pertinente para comparar países con diferentes dotaciones de litio, ya que un mayor volumen de reservas no implica necesariamente una mayor capacidad extractiva. La literatura sobre eficiencia de los recursos naturales señaló precisamente la importancia de evaluar la forma en que los países y regiones utilizan sus dotaciones de recursos, en lugar de asociar directamente una mayor disponibilidad de recursos con un mejor desempeño. Wang et al. (2024), mediante un modelo análisis envolvente de datos (DEA, por sus siglas en inglés) aplicado a la gestión de activos de recursos naturales, mostraron que la eficiencia depende de la capacidad de utilización y gestión de los recursos y no únicamente de su disponibilidad.

Fue así como las reservas se incorporaron como una medida de dotación del recurso mineral. Su inclusión permitió analizar si las diferencias en la disponibilidad del litio se acompañan de diferencias en la capacidad relativa de extracción. Esto es importante en el contexto de la expansión de la demanda de minerales considerados estratégicos para la transición energética, donde la disponibilidad geológica y la capacidad de producción constituyen dimensiones distintas del desarrollo de una industria minera.

El empleo en minería y explotación de canteras se incorporó como segunda entrada debido a que representa el factor trabajo utilizado en la actividad extractiva. La productividad y eficiencia minera dependen, entre otros elementos, de la cantidad y utilización de los factores productivos empleados para obtener el producto. Chen et al. (2022) emplearon DEA para evaluar la eficiencia de la industria minera y analizar sus diferencias espaciales y temporales.

La utilización del empleo como variable de entrada debe interpretarse considerando la disponibilidad de información internacional. ILOSTAT reporta el empleo correspondiente a la actividad de minería y explotación de canteras en su conjunto, por lo que el indicador no identifica exclusivamente a los trabajadores ocupados en la extracción de litio. En este estudio

se utilizó como una aproximación al factor trabajo disponible en la actividad minera de cada país. Esta decisión permitió conservar la comparabilidad internacional.

La producción de litio se empleó como variable de salida debido a que representa el resultado observable del proceso extractivo. Su incorporación permitió relacionar la dotación del recurso y el factor trabajo con la cantidad efectivamente producida. La estructura de dos entradas y una salida es consistente con el DEA en el sector minero, método empleado para comparar unidades productivas a partir de múltiples factores y resultados. Chen et al. (2022) aplicaron DEA para estimar la eficiencia de la industria minera, mientras que Wang y Feng (2023) utilizaron una frontera DEA para analizar la utilización de capacidad en industrias de metales no ferrosos, mostrando la utilidad del enfoque para estudiar diferencias de desempeño dentro de actividades intensivas en recursos.

La selección de las variables permitió representar tres dimensiones complementarias de la actividad extractiva: la disponibilidad del recurso mineral, el factor trabajo y el resultado productivo. De esta manera, el análisis no se limitó a comparar los volúmenes de producción, sino que busca determinar qué países presentan las combinaciones observadas más eficientes entre los recursos considerados y la producción obtenida.

2.2 Método de Análisis Envolvente de Datos (DEA)

La eficiencia extractiva se estimó mediante el análisis envolvente de datos (DEA), método no paramétrico basado en programación lineal que permite comparar unidades de decisión que utilizan múltiples entradas para generar una o más salidas. Una de sus principales ventajas es que no requiere imponer una forma funcional específica a la relación entre insumos y productos.

En este estudio, cada país representó una DMU (unidad económica de decisión), con las reservas de litio y el empleo minero como variables de entrada y la producción de litio como variable de salida. El procedimiento construye una frontera empírica a partir de las combinaciones observadas de estas variables. Las unidades que se encuentran sobre dicha frontera obtienen un índice de eficiencia igual a uno, mientras que aquellas situadas por debajo de ella presentan valores inferiores a uno.

De manera general, el problema DEA puede representarse mediante la formulación del siguiente modelo:

$$\text{Min. } \theta_w$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^9 \lambda_i R_i \leq \theta_w R_w$$

$$\sum_{i=1}^9 \lambda_i E_i \leq \theta_w E_w$$

$$\sum_{i=1}^9 \lambda_i P_i \geq P_w$$

$$\sum_{i=1}^9 \lambda_i = 1$$

$$\theta_w, R_i, R_w, E_i, E_w, P_i, P_w, \lambda_i \geq 0$$

Donde:

θ_w : es el índice de eficiencia relativa en extracción de litio del país w observado.

R_i : son las reservas de litio del i-ésimo país reportadas al 2025.

R_w : son las reservas de litio de país w observado reportadas al 2025.

E_i : es el nivel de empleo en minas y canteras del i-ésimo país reportado al 2025.

E_w : es el nivel de empleo en minas y canteras de país w observado reportado al 2025.

P_i : es la producción de litio del i-ésimo país reportado al 2025.

P_w : es la producción de litio de país w observado reportado al 2025.

λ_i : es la combinación lineal que pondera dentro del DEA.

Para un mejor panorama del método aplicado es que, una comparación basada exclusivamente en producción favorecería a los países con mayor escala, mientras que el DEA permite evaluar la posición relativa de cada país considerando simultáneamente los recursos empleados y el producto obtenido.

La especificación del modelo anterior consideró un criterio de parsimonia en el número de variables. La incorporación de un número elevado de entradas y salidas frente al número de DMU puede disminuir la capacidad discriminatoria del DEA y aumentar el número de unidades que aparecen como eficientes. Por ello, la especificación se limitó a dos entradas y una salida, concentrando el análisis en la dotación del recurso, el factor trabajo y el resultado extractivo. Camanho et al. (2024) destacaron la importancia de la especificación del modelo y de la selección de las variables para la interpretación de las medidas de eficiencia.

Además del índice de eficiencia, el modelo permitió obtener precios sombra asociados con las variables. Estos valores corresponden a los multiplicadores o valores duales derivados de la solución del problema DEA y permiten identificar la ponderación que adquieren las diferentes variables en la construcción de la frontera eficiente.

3. Resultados

El cuadro 1 sintetiza las variables seleccionadas para el modelo de evaluación de la eficiencia extractiva: las reservas comprobadas de litio y el empleo en el sector de minería y explotación de canteras como variables de entrada (inputs), así como el volumen de producción de litio registrado en 2025 como variable de salida (output). La evidencia descriptiva reveló una pronunciada heterogeneidad entre los nueve países considerados en la muestra, confirmando la existencia de asimetrías estructurales dentro del mercado global del mineral.

Dichas discrepancias no se restringieron al tamaño de la base geológica disponible en cada territorio, sino que se manifestaron con igual intensidad en la escala del factor trabajo

ocupado en la industria extractiva y en los niveles efectivos de mineral extraído. Esta diversidad de configuraciones resultó especialmente pertinente para la aplicación del Análisis Envolvente de Datos (DEA), toda vez que la metodología no paramétrica requiere variabilidad en las proporciones de insumo-producto para delimitar la frontera de mejores prácticas. De esta forma, el contraste entre países con grandes reservas pero variada producción, frente a aquellos con inventarios modestos pero alta intensidad operativa, permitió evaluar objetivamente la capacidad relativa de cada economía para transformar su dotación inicial de recursos y trabajo en volumen de producción.

Cuadro 1. Variables utilizadas en el análisis de eficiencia extractiva del litio, 2025.

País	Reservas (miles de toneladas)	Empleo en minería y explotación de canteras (miles de personas)	Producción de litio (miles de toneladas)
Argentina	4400	61.70	23.00
Australia	8400	297.60	92.00
Brasil	540	596.00	12.00
Canadá	1600	501.40	5.60
Chile	9200	304.20	63.81
China	4600	26.10	62.00
Portugal	60	15.40	0.38
EUA	4400	372.50	1.32
Zimbabwe	500	248.20	28.00

Fuente: elaboración propia con datos de producción y reservas de litio del Energy Institute, y datos de empleo en minería y explotación de canteras de ILOSTAT, correspondientes a 2025.

De acuerdo con el cuadro 2, Australia, China, Portugal y Zimbabwe conformaron la frontera empírica de eficiencia al registrar el valor máximo del índice (100 %). Sin embargo, la convergencia de estos cuatro países en el nivel óptimo no implicó una homogeneidad en sus estructuras productivas ni significó que alcanzaran volúmenes equivalentes de extracción. De igual manera, su desempeño pleno no respondió de forma directa a la magnitud de sus depósitos geológicos. Por el contrario, cada uno de ellos representó una articulación particular entre insumos (reservas y factor trabajo) y productos (volumen de extracción), sirviendo dentro de la muestra como las unidades de referencia (benchmarks) respecto a las cuales se evaluó la distancia del resto de las economías.

Al examinar la composición de este grupo sobre la frontera, se observan estrategias y trayectorias operativas sumamente diferenciadas:

Australia: Destacó por consolidar una elevada dotación de reservas con el volumen de producción más alto del conjunto analizado, posicionándose como la referencia dominante para aquellos países con operaciones a gran escala.

China: Alcanzó la frontera plena mediante un esquema de alta producción combinado con una menor demanda relativa de factor trabajo por unidad de producto, sugiriendo un mayor grado de automatización o intensidad tecnológica en la transformación del recurso.

Portugal y Zimbabwe: Lograron la eficiencia plena a partir de escalas extractivas significativamente menores. Sus resultados demostraron que la escala física de la actividad y la eficiencia técnica relativa constituyen dimensiones conceptual y metodológicamente independientes, comprobando que un país con volumen reducido de producción puede aprovechar sus insumos de manera óptima como un líder global del mercado.

Cuadro 2. *Eficiencia extractiva y precios sombra de los países productores de litio, 2025.*

País	Índice de Eficiencia %	Precio sombra Producción	Precio sombra Empleo	Precio sombra Reservas
Argentina	38.53	-0.0207	-0.1448	1.5500
Australia	100.00	0	-0.3360	3.0410
Brasil	45.39	-0.1852	0	2.9501
Canadá	10.94	-0.0196	-0.1370	1.4663
Chile	52.50	-0.0109	0	1.3768
China	100.00	-0.0209	-0.1463	1.5659
Portugal	100.00	-0.5962	-4.1706	44.6508
EUA	4.18	0	-0.2685	0.0466
Zimbabwe	100.00	-0.0447	-0.3128	3.3490

Fuente: elaboración propia con base en los resultados del modelo de Análisis Envolvente de Datos (DEA).

El resultado de Zimbabwe resultó particularmente relevante. El país alcanzó la frontera con 500 mil toneladas de reservas y una producción de 28 mil toneladas, mientras que Chile, pese a disponer de 9.2 millones de toneladas de reservas y producir 63.81 mil toneladas, obtuvo un índice de 52.5 %. Esta diferencia sugiere que la disponibilidad del recurso natural no constituye, por sí misma, una condición suficiente para alcanzar una posición eficiente. Desde una perspectiva económica, las reservas representan una dotación potencial de riqueza minera, pero su contribución al desempeño extractivo depende de la capacidad para convertirlas en producción mediante los factores utilizados en el proceso. Por ello, una mayor disponibilidad de litio no necesariamente implica un mejor aprovechamiento relativo del recurso.

Una situación similar se observó en Estados Unidos y Canadá. Ambos países poseen reservas superiores a las de Zimbabwe y Portugal, pero registraron niveles de eficiencia considerablemente menores. En Estados Unidos, la reducida producción respecto de las reservas disponibles se reflejó en un índice de 4.2 %, el menor de la muestra. Canadá presentó un comportamiento semejante, con una eficiencia de 10.9 % y una cantidad de empleo minero elevada en relación con su producción de litio. Estos resultados pueden asociarse con la existencia de capacidades productivas, restricciones de explotación o estructuras sectoriales que impiden que la dotación del recurso se traduzca proporcionalmente en producción; sin embargo, el DEA por sí solo no permite identificar cuál de estos factores explica cada caso y, por tanto, estas posibilidades deben considerarse como líneas para análisis posteriores.

Argentina y Brasil presentaron niveles intermedios de eficiencia, aunque sus situaciones son diferentes. Argentina alcanzó un índice de 38.5 % con una producción de 23 mil toneladas, mientras que Brasil obtiene 45.4 %. En este último caso, destacó el elevado número de trabajadores registrados en minería y explotación de canteras frente al volumen de producción

de litio. El resultado planteó una cuestión relevante respecto de la utilización del factor trabajo: una mayor cantidad de empleo minero no se traduce necesariamente en una mayor eficiencia extractiva cuando se considera simultáneamente la disponibilidad de reservas y la producción obtenida.

Los precios sombra incluidos en el cuadro 2 complementaron los índices de eficiencia al mostrar la importancia relativa de los factores dentro de las soluciones duales del modelo. Las diferencias entre sus magnitudes indicaron que la contribución de las reservas y del empleo a la frontera no fue uniforme entre los países. El valor asociado a las reservas destacó particularmente en Portugal (44.6508), mientras que el empleo adquirió una mayor ponderación relativa en este mismo país (-4.1706) y en algunos de los restantes referentes de la frontera. En el caso del empleo, los precios sombra fueron negativos para los países en los que esta variable participa activamente en la solución dual, mientras que Brasil y Chile presentan un valor de cero. Esto indicó que, bajo la estructura del modelo, el empleo no constituye un factor limitante para estos dos países en la determinación de su frontera de referencia. Los valores relativamente elevados observados en Portugal y Australia sugirieron, por su parte, una mayor sensibilidad de sus soluciones eficientes respecto a la ponderación asignada al trabajo. En general, los precios sombra mostraron que la eficiencia extractiva no depende únicamente de la magnitud de las reservas o del nivel de producción, sino de la combinación específica de recursos empleada para transformar los insumos disponibles en producción de litio.

En una visión económica, los resultados permitieron distinguir entre dotación de recursos y capacidad de aprovechamiento extractivo. Un país puede disponer de grandes reservas y, simultáneamente, presentar una eficiencia relativa menor si los recursos disponibles no se traducen en una producción proporcional bajo la combinación de factores considerada. Esta distinción fue especialmente importante en el caso del litio debido a que las reservas representan un activo natural finito y su aprovechamiento implica decisiones relacionadas con inversión, capacidad extractiva, empleo y condiciones de explotación. Es así como, la eficiencia estimada no debe entenderse únicamente como una medida de producción minera, sino como una aproximación a la capacidad relativa de transformar la dotación del recurso y los factores productivos considerados en producción de litio.

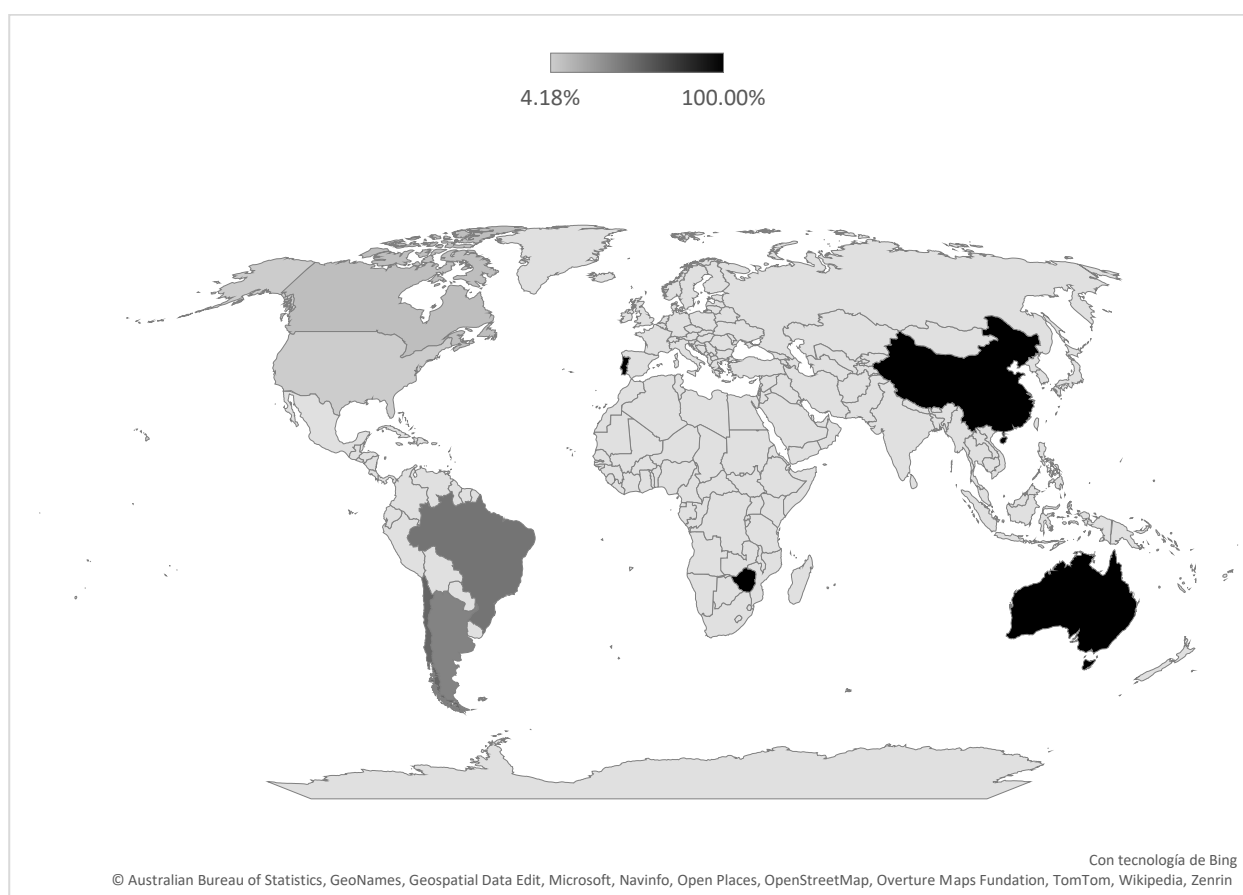
Estos resultados mostraron que la eficiencia puede alcanzarse bajo estructuras productivas diferentes. La presencia simultánea de Australia, China, Portugal y Zimbabwe en la frontera indicaron que no existe una única combinación de reservas y empleo asociada con el desempeño eficiente. Esta característica resulta relevante para la política de aprovechamiento de recursos minerales, ya que las estrategias orientadas a incrementar la producción de litio no necesariamente requieren ampliar la dotación de reservas, sino mejorar la forma en que los recursos disponibles se articulan con los factores productivos. En consecuencia, las brechas identificadas por el DEA pueden constituir un punto de partida para analizar las condiciones institucionales, tecnológicas y productivas que permiten a determinados países obtener una mayor producción relativa a partir de sus recursos disponibles.

La figura 1 permitió observar la distribución espacial de la eficiencia extractiva del litio entre los países analizados y complementa los resultados obtenidos mediante el modelo DEA. La representación cartográfica muestra que los niveles de eficiencia no siguen una relación directa con la disponibilidad de reservas ni con la localización geográfica de los principales productores. Los países que conforman la frontera eficiente se encuentran distribuidos en regiones diferentes: Australia y China en Asia, Portugal en Europa y Zimbabwe en África. Esta dispersión evidencia que la eficiencia relativa no constituye una característica exclusiva de una determinada región

minera, sino que depende de la combinación específica de reservas, empleo y producción considerada en el modelo.

La distribución espacial también permite identificar contrastes relevantes dentro del conjunto de países productores. En América del Sur, Argentina y Brasil presentan niveles intermedios de eficiencia, mientras que Chile, a pesar de contar con una de las mayores dotaciones de reservas de la muestra, alcanza una eficiencia de 52.5 %. En América del Norte se observa un contraste particularmente marcado: Canadá registra 10.9 % y Estados Unidos 4.2 %, lo que indica una baja correspondencia entre la disponibilidad de reservas y la producción obtenida bajo los factores considerados. En términos económicos, estos resultados sugieren que la dotación de litio representa un potencial productivo, pero su aprovechamiento depende de la capacidad de transformar dicha dotación en producción mediante los recursos empleados.

Figura 1. Mapa de los productores de litio y su eficiencia extractiva, 2025.



Fuente: elaboración propia con base en los resultados del modelo de Análisis Envoltorio de Datos (DEA) y el generador de mapas de Microsoft Excel con tecnología de Bing.

El análisis cartográfico permitió interpretar la eficiencia extractiva como una dimensión cualitativamente distinta de la escala e importancia minera de cada país. Los resultados mostraron que una nación podía albergar volúmenes significativos de reservas y mantener una posición determinante en el mercado internacional sin situarse de forma obligada en la frontera de eficiencia. En consecuencia, la distribución espacial observada no debía interpretarse como

un escalafón o ranking absoluto de desempeño sectorial, sino como una evaluación comparativa y relativa entre las unidades analizadas dentro de la muestra.

En este sentido, la Figura 1 evidenció que las disparidades internacionales en el aprovechamiento del litio no podían atribuirse de manera exclusiva a la magnitud del recurso geológico disponible. Por el contrario, la configuración del mapa demostró que el desempeño extractivo respondió a la articulación concreta entre la dotación mineral, la intensidad en el uso de los factores productivos, particularmente el trabajo, y el volumen final de producción alcanzado.

4. Discusión

4.1 Eficiencia extractiva y dotación de reservas

Uno de los resultados más relevantes fue que la magnitud de las reservas no presentó una correspondencia directa con la eficiencia estimada. Chile fue el ejemplo más claro, aunque presentó la mayor dotación de reservas dentro de la muestra, su índice de eficiencia fue de 52.5 %. Australia, por el contrario, presentó una menor cantidad de reservas que Chile y alcanzó una eficiencia del 100 %. Esta diferencia respalda la idea de que la disponibilidad geológica constituye una condición para la actividad extractiva, pero no garantiza por sí misma una utilización eficiente del recurso.

Esta interpretación coincide con estudios sobre la gestión de recursos naturales como el de Wang et al. (2024) y su modelo DEA aplicado a la gestión de activos de recursos naturales en China, con el cual encontraron diferencias importantes en la eficiencia entre regiones con dotaciones de recursos distintas. Los autores sostienen que la eficiencia en la gestión de los recursos depende de la capacidad institucional y productiva para utilizarlos y no solamente de su disponibilidad. En su investigación, únicamente tres de las 30 provincias consideradas fueron clasificadas como eficientes, lo que muestra que una importante dotación de recursos puede coexistir con problemas de gestión y aprovechamiento.

La comparación entre Chile y Australia resultó interesante para el caso del litio. Ambos países ocuparon posiciones centrales en la producción mundial, pero los números de extracción presentaron características diferentes. La producción australiana se encuentra asociada principalmente con minerales de roca dura, mientras que Chile obtiene litio principalmente a partir de salmueras. Esta diferencia tecnológica y geológica significa que la cantidad de reservas no puede analizarse de manera independiente de las características del depósito, los procesos de extracción y las condiciones de operación. Una evaluación comparativa de tecnologías de producción de litio encuentra precisamente diferencias importantes en los requerimientos de recursos y en los impactos ambientales entre las rutas basadas en salmueras y las asociadas con minerales de roca dura (Khakmardan et al., 2023).

Por tal motivo, el resultado obtenido para Chile no debe interpretarse como evidencia de un uso inadecuado de sus reservas. El DEA identifica que, dadas las variables consideradas y las combinaciones observadas en la muestra, Chile no se encuentra sobre la frontera definida por los países eficientes. Esta distinción es importante porque la eficiencia DEA no evalúa directamente la calidad del yacimiento, los costos de extracción, la disponibilidad de agua, la tecnología específica o las condiciones institucionales.

Tocante a la disponibilidad futura del litio, un elemento que matiza la interpretación basada exclusivamente en reservas, en el reporte anual de la Association négaWatt (2024) se estimó que los recursos de litio in situ aumentaron considerablemente entre 2009 y 2023 y concluyeron que la disponibilidad física del recurso probablemente no constituya, por sí sola, la principal restricción para satisfacer la demanda asociada con la transición energética. Este resultado introduce una perspectiva diferente a aquella que equipara una mayor cantidad de reservas con una ventaja productiva inmediata. Desde esta perspectiva, el desafío no reside únicamente en disponer del mineral, sino en desarrollar tecnologías, infraestructura y capacidades productivas capaces de convertir los recursos geológicos en oferta efectiva.

Esta discusión fortalece el resultado del presente estudio. Si la disponibilidad física del litio no constituye necesariamente la principal restricción de largo plazo, adquiere mayor importancia estudiar las diferencias entre países en su capacidad de transformar las dotaciones existentes en producción. El índice de eficiencia estimado puede contribuir a identificar esas diferencias, aunque debe reconocerse que el modelo utilizado representa únicamente una parte de los factores que determinan la producción.

4.2 Australia y China: eficiencia asociada con diferentes escalas productivas

Australia y China alcanzaron una eficiencia del 100 %, pero sus estructuras productivas son diferentes. Australia combina una elevada producción con una importante dotación de reservas y una escala considerable de empleo minero. China, por otro lado, también alcanzó la frontera, aunque presenta una estructura diferente en términos de empleo. Esto mostró que el DEA no identificó una única combinación óptima de factores, sino diferentes combinaciones que pueden constituir referencias eficientes.

El resultado para Australia es consistente con su posición como uno de los principales productores mundiales de litio. La elevada producción australiana no solo reflejó disponibilidad del recurso, sino también la existencia de una industria minera desarrollada, infraestructura especializada y experiencia acumulada en la explotación de minerales.

Sin embargo, una alta eficiencia productiva no debe confundirse con sostenibilidad. La revisión de Zaman et al. (2024) señaló que la eficiencia energética y ambiental de la industria minera está estrechamente vinculada con la incorporación de tecnologías, digitalización y mejoras en los procesos productivos. Los autores plantean que la modernización tecnológica puede mejorar la eficiencia energética de la actividad minera y reducir determinados impactos asociados con la producción.

Esto permite complementar el resultado obtenido para Australia. El hecho de que el país se ubique en la frontera DEA indica una utilización relativamente eficiente de las variables incluidas en el modelo, pero no permite afirmar que su sistema extractivo sea óptimo desde una perspectiva ambiental. La eficiencia estimada debe entenderse como eficiencia extractiva respecto de reservas, empleo y producción, no como eficiencia ambiental o energética.

El caso de China, también se encuentra sobre la frontera, lo cual coincide con investigaciones que han identificado niveles relativamente altos de eficiencia en su industria minera del país (Chen et al., 2022), donde, se encontró que el sector presentaba eficiencia, aunque también observaron una tendencia de retroceso tecnológico y diferencias regionales importantes.

Esta situación representa una posición parcialmente coincidente y crítica respecto del presente estudio. Por una parte, la clasificación de China como país eficiente es consistente con la evidencia de que una parte importante de su sector minero puede presentar un desempeño eficiente bajo determinadas especificaciones. Por otra, la evidencia de Chen et al. (2022) indica que la eficiencia productiva no necesariamente se mantiene cuando se incorporan variables ambientales. Dicho de otra manera, China puede ubicarse en la frontera de eficiencia extractiva definida en este estudio y, al mismo tiempo, enfrentar ineficiencias relacionadas con emisiones, energía o impactos ambientales.

Esta diferencia pone de manifiesto una de las implicaciones de los resultados: la eficiencia extractiva y la sostenibilidad minera son dimensiones relacionadas, pero no equivalentes. Una medida DEA construida con reservas, empleo y producción responde a qué países presentan una combinación relativamente eficiente entre estos factores y la producción obtenida. Si se incorporaran consumo energético, emisiones, agua utilizada, residuos o impactos territoriales, la frontera podría cambiar sustancialmente.

4.3 Portugal: eficiencia con una escala productiva reducida

Portugal presentó otro de los resultados más interesantes debido a que alcanzó una eficiencia del 100 % a pesar de operar con una escala de reservas, empleo y producción considerablemente menor que la de Australia o China. Este resultado confirmó que el DEA no mide tamaño productivo. Un país puede ser eficiente con una escala reducida si la relación observada entre sus entradas y su salida se encuentra sobre la frontera.

Si la eficiencia se hubiese evaluado únicamente mediante producción, Portugal ocuparía una posición muy inferior frente a los grandes productores. Sin embargo, al considerar simultáneamente las variables de entrada, su combinación observada resultó eficiente dentro de la muestra. Esto significó que el país constituye una referencia en términos de la relación entre los recursos considerados y la producción obtenida, aunque no representó una referencia en términos de escala industrial.

No obstante, el desarrollo del litio en Portugal muestra que la eficiencia extractiva no agota la discusión sobre la conveniencia de expandir la minería. Estudios en Portugal han documentado tensiones entre objetivos de transición energética, desarrollo económico y preocupaciones locales. Determinadas políticas de transición pueden generar conflictos territoriales cuando la expansión de la extracción es percibida por las comunidades como una forma de trasladar los costos ambientales y sociales de la transición hacia determinados territorios (Dunlap & Riquito, 2023).

El resultado de Portugal puede considerarse eficiente bajo la dimensión productiva estudiada, pero esta condición no implica automáticamente que la expansión de la extracción sea socialmente deseable ni que el proceso sea ambientalmente sostenible. El caso portugués también permitió cuestionar una interpretación frecuente de la eficiencia, es decir, alcanzar la frontera necesariamente constituye una condición suficiente para recomendar una mayor explotación. En el contexto del litio, la discusión plantea que el incremento de la extracción debe acompañarse de mecanismos de gobernanza, participación social y evaluación ambiental. Dou et al. (2023) señalaron que la sostenibilidad del suministro de minerales críticos requiere mecanismos de gobernanza que consideren tanto la seguridad del suministro como las demandas de desarrollo de los territorios productores.

4.4 Zimbabwe: el problema de interpretar la eficiencia como desempeño absoluto

Zimbabwe alcanzó una puntuación de eficiencia del 100 %, el país presenta una escala productiva menor que Australia y China. Su presencia sobre la frontera demuestra nuevamente que el tamaño absoluto de la producción no constituye el criterio utilizado por el DEA para determinar la eficiencia.

El resultado puede explicarse metodológicamente por la propia naturaleza de una frontera DEA. Las unidades que presentaron combinaciones particulares de entradas y salidas pueden definir segmentos de la frontera incluso cuando sus niveles absolutos de producción son relativamente pequeños. En una muestra reducida como la utilizada en este estudio, esta característica adquiere mayor importancia. Por ello, la eficiencia de Zimbabwe debe interpretarse como una referencia relativa y no como evidencia de que su industria del litio sea tecnológicamente superior a la de Australia o China.

Esta consideración es consistente con estudios de eficiencia minera que advierten sobre la heterogeneidad de las unidades y la necesidad de analizar conjuntamente eficiencia, escala y características tecnológicas (Zhang & Song, 2020).

La posición de Zimbabwe adquiere relevancia por la transformación reciente de la geografía del suministro de litio. La expansión de nuevos productores demostró que la producción mundial no depende exclusivamente de los países históricamente dominantes. La concentración de la producción de minerales críticos constituye una fuente de vulnerabilidad además de que, la disponibilidad del recurso, la localización de la producción y la estructura comercial deben analizarse conjuntamente para evaluar la seguridad del suministro (Jin et al., 2023)

4.5 Países por debajo de la frontera: eficiencia y capacidad de transformación del recurso

Los resultados de Argentina, Brasil, Canadá, Chile y Estados Unidos mostraron diferentes grados de distancia respecto de la frontera. La existencia de estos niveles inferiores a uno no son una falta absoluta de productividad. Más bien, indicaron que las combinaciones observadas de reservas, empleo y producción no alcanzaron las relaciones que caracterizan a las unidades eficientes dentro de la muestra.

El caso de Chile, su puntuación fue de 52.5 %, indicó que la mayor dotación de reservas no se traduce automáticamente en una posición eficiente. Esto puede estar relacionado con características propias de la extracción de litio en salmueras, aunque el DEA no permite identificar qué factor explica la distancia respecto de la frontera. Debido a esto, Souza et al. (2025) evidenciaron que la extracción de litio en el denominado Triángulo del Litio implica un consumo importante de agua, territorio y otros recursos, además de impactos sobre comunidades locales. En cuanto a una mayor producción de litio no puede considerarse automáticamente como una mejora de eficiencia desde una perspectiva integral. Una tecnología puede ser eficiente en términos de producción por trabajador y, al mismo tiempo, presentar un uso intensivo de agua.

En consecuencia, lo obtenido para Chile, la menor eficiencia relativa respecto de la frontera no necesariamente indica una deficiencia tecnológica. Puede reflejar una combinación

de reservas, empleo y producción distinta de la observada en Australia, China, Portugal y Zimbabwe. Para determinar las causas específicas sería necesario incorporar variables adicionales, tales como consumo de agua, energía, inversión, capacidad instalada, tecnología utilizada o características de los yacimientos.

Argentina presentó una eficiencia de 38.5 %, inferior a la de Chile pese a contar también con una importante dotación de reservas. Esta cantidad resuena debido a que Argentina forma parte del denominado Triángulo del Litio y ha incrementado su participación en la producción mundial. La comparación entre Argentina y Chile mostró que la pertenencia a una misma región geológica no garantiza resultados similares en términos de eficiencia. Las diferencias pueden estar asociadas con infraestructura, tecnología, organización empresarial, empleo, regulación, escala de las operaciones y condiciones específicas de cada proyecto, aunque estas variables no fueron incorporadas directamente en el modelo.

4.6 Brasil y Canadá: el papel del empleo

Brasil obtuvo un índice de eficiencia de 45.4 % y, dentro de la muestra, registró el mayor nivel de empleo minero. La combinación de un empleo elevado con una producción relativamente menor que la de los principales productores genera una posición alejada de la frontera. Nuevamente, Chen et al. (2022) indicó que la eficiencia de la industria minera presenta diferencias regionales importantes y que factores tecnológicos y ambientales pueden modificar la posición de las unidades en la frontera. Complementariamente, Yousefian et al. (2024) encontraron, en una muestra de empresas mineras europeas, una relación entre productividad total de los factores y elementos institucionales y organizacionales, incluidos aspectos de capacitación, seguridad, transparencia y gestión de recursos. Esta evidencia permitió matizar la interpretación del resultado brasileño; a una mayor cantidad de trabajadores no constituye necesariamente una desventaja; el problema identificado por el DEA es la relación conjunta entre empleo, reservas y producción. La eficiencia podría mejorar mediante mayor productividad laboral, incorporación tecnológica, mejor organización de los procesos o incremento de la producción, pero el modelo no permite establecer cuál de estos mecanismos sería el determinante.

En cuanto a Canadá, éste presentó una situación aún más marcada, con una eficiencia de 10.9 %. El país dispone de reservas importantes y un volumen de empleo minero considerable en relación con la producción de litio registrada. Sin embargo, este dato de eficiencia debe considerar el estado de desarrollo de su industria de litio. La producción de litio en Estados Unidos mostró que la disponibilidad de recursos, reservas, tecnología y condiciones sociales son dimensiones diferentes del desarrollo de la industria, esto evidencia que un país puede disponer de recursos importantes y, sin embargo, mantener una producción limitada debido a las características de los depósitos, la tecnología disponible, las restricciones ambientales y la aceptación social (Brett et al., 2025). Aunque la evidencia se refiere específicamente a Estados Unidos, el argumento es aplicable como consideración interpretativa para Canadá, la existencia de reservas no implica que el recurso se encuentre inmediatamente disponible para explotación comercial. Por tal motivo, el índice DEA debe leerse como una fotografía de la relación entre las variables en 2025, no como una valoración del potencial minero de largo plazo.

4.7 Estados Unidos: disponibilidad de recursos versus producción efectiva

En la situación de Estados Unidos, el resultado especificó la menor eficiencia de la muestra, con un valor de 4.2 %. Sin duda, esto reflejó una diferencia considerable entre la dotación de reservas y la producción observada en 2025. Este caso fue particularmente útil para demostrar la diferencia entre potencial geológico y capacidad extractiva efectiva. Brett et al. (2025) señaló que Estados Unidos posee una cantidad considerable de recursos de litio, pero que su producción doméstica sigue siendo limitada y enfrenta restricciones relacionadas con tecnología, características de los depósitos, impactos ambientales y aceptación social.

Sin embargo, existe una diferencia conceptual que debe resaltarse, el DEA utiliza reservas reportadas y no recursos geológicos potenciales, por ello, la baja eficiencia estadounidense no significa que el país carezca de potencial para aumentar su producción futura. De hecho, la expansión de tecnologías como la extracción directa de litio puede modificar las relaciones observadas entre reservas y producción. Esto significa que el resultado de Estados Unidos debe considerarse como una medida de desempeño relativo para 2025 y no como una predicción de su capacidad futura. La frontera DEA puede cambiar conforme evolucionen las tecnologías, entren nuevos proyectos en operación y se modifiquen las condiciones de mercado.

4.8 Eficiencia extractiva frente a sostenibilidad

Uno de los principales aportes de los resultados consistió en mostrar que la eficiencia extractiva debe diferenciarse de la sostenibilidad minera. La clasificación de Australia, China, Portugal y Zimbabwe como eficientes no es sinónimo de que sus actividades de extracción sean necesariamente las más sostenibles desde una perspectiva ambiental o social.

Una parte importante de la literatura cuestiona una visión, según la cual, la expansión de la extracción de minerales críticos constituye automáticamente una actividad favorable para la transición energética. Dou et al. (2023) señalaron que la seguridad del suministro de minerales críticos debe acompañarse de mecanismos de gobernanza que consideren los intereses de los países productores y los objetivos de desarrollo sostenible.

En el caso específico del litio, Wolters y Brusselaers (2024) plantearon que la transición energética puede generar una paradoja: la expansión de una tecnología destinada a reducir impactos ambientales puede aumentar las presiones ambientales y sociales asociadas con la extracción de los minerales necesarios para producirla. Su análisis destacó problemas relacionados con degradación ambiental, conflictos sociales, gobernanza y distribución de los costos de la transición.

La evidencia del Triángulo del Litio refuerza esta preocupación. Souza et al. (2025) mencionó que la extracción de litio a partir de salmueras puede involucrar importantes consumos de agua y territorio y generar impactos sobre comunidades locales, particularmente pueblos indígenas. Los autores también identificaron vacíos de información que dificultan una evaluación completa de los impactos ambientales y sociales.

Estos argumentos no contradicen los resultados DEA; más bien, establecen sus límites. El presente estudio responde a una pregunta de eficiencia extractiva, no a una pregunta de sostenibilidad. Por ello, un país puede ser eficiente respecto de las variables incluidas y, simultáneamente, presentar problemas ambientales que no son capturados por el modelo. Esta consideración es particularmente relevante para interpretar Chile, Argentina y Portugal, donde

el desarrollo del litio ha generado debates relacionados con el agua, el territorio y las comunidades. También resulta pertinente para Australia, China y Zimbabwe, ya que una posición eficiente no elimina los posibles impactos derivados de la extracción.

Por lo tanto, una posible extensión del modelo consistiría en incorporar variables ambientales y sociales, como consumo de agua, emisiones, generación de residuos o indicadores de afectación territorial. Esta ampliación permitiría construir una medida de eficiencia ambiental o de eficiencia sostenible y determinar si las unidades que actualmente se encuentran en la frontera permanecen en ella cuando se incorporan externalidades.

4.9 Implicaciones para la política de los países productores

Los resultados plantearon implicaciones específicas según la posición de cada país respecto a la frontera de eficiencia. En aquellos casos que alcanzaron la frontera, como Australia, China, Portugal y Zimbabwe, la política pública debe evitar reducir sus metas a un simple aumento de la producción, velando por que la expansión no deteriore otras dimensiones omitidas en el modelo. Por su parte, para los países ubicados por debajo de la frontera, las desviaciones sugieren la necesidad de investigar las causas de la distancia frente a las mejores prácticas. Sin embargo, el DEA no permitió determinar de manera aislada si las deficiencias radican en el uso de la fuerza laboral, la tecnología, la escala operativa, la infraestructura, la gestión del recurso o la calidad de los depósitos, lo que impide formular prescripciones rígidas, como reducir personal o forzar la extracción, sin evaluar detalladamente las holguras, las metas y las referencias específicas de cada unidad analizada.

Articular políticas enfocadas únicamente en aumentar el volumen de reservas reportadas ofrece efectos acotados sobre la capacidad extractiva real. En este esquema, el componente tecnológico cobra un rol determinante, Ma et al. (2024) comprobaron que la innovación técnica favorece la eficiencia energética en la minería, efecto que se intensifica al reestructurar el sector; aunque su hallazgo analiza el uso de energía y no la extracción directa de litio, ilustra cómo las disparidades tecnológicas modifican las posiciones relativas en un modelo DEA ampliado. Asimismo, la dimensión institucional ejerce un impacto directo sobre el rendimiento general. Wang et al. (2024) destacaron que la eficiencia en la gestión de recursos naturales se ve afectada por cuellos de botella institucionales, rigideces administrativas y el manejo de los ingresos derivados de la actividad minera. En una línea convergente, Yousefian et al. (2024) identificaron una relación positiva entre la productividad de las empresas mineras europeas y la adopción de prácticas de responsabilidad social, transparencia, capacitación, seguridad laboral y gestión de recursos. En conjunto, estos hallazgos confirmaron que las diferencias de eficiencia entre países no obedecen de forma exclusiva a la riqueza del yacimiento, sino al desempeño articulado de sus capacidades productivas, tecnológicas, organizacionales e institucionales.

4.10 Limitaciones e implicaciones para futuras investigaciones

En primer lugar, la naturaleza transversal del estudio, al tomar datos de 2025, impidió evaluar la evolución temporal de la eficiencia o diferenciar entre ajustes operativos y desplazamientos de la frontera tecnológica, aspecto que requeriría un modelo de panel. En segundo lugar, ante la falta de series internacionales desagregadas, el factor trabajo se midió a través del empleo total en minería y canteras en lugar de una cifra exclusiva para el litio, limitación que podrá corregirse con información detallada por proyecto o empresa. En tercer lugar, no se integraron variables ambientales como agua, energía, emisiones o residuos, un elemento crucial considerando que la

literatura reciente evidencia que los impactos varían de forma sustancial según la tecnología de extracción y la tipología del depósito. Por último, la muestra se acotó deliberadamente a nueve países para mantener una proporción metodológica adecuada entre observaciones y variables, por lo que la frontera representa una comparación relativa dentro del grupo y no un escalafón mundial absoluto.

A partir de estas premisas, se proyectaron una agenda de investigación articulada en tres ejes. El primero propuso transitar hacia un DEA dinámico para dar seguimiento a la evolución temporal de los países. El segundo planteó incorporar externalidades ambientales y sociales para contrastar si la eficiencia volumétrica se sostiene al considerar los impactos del proceso. El tercero consistió en complementar la medición no paramétrica con modelos econométricos en dos etapas, permitiendo identificar los factores tecnológicos, económicos e institucionales que explican las brechas de eficiencia observadas.

5. Conclusión

La presente investigación permitió cumplir el objetivo de estimar y comparar la eficiencia extractiva relativa de nueve países productores de litio mediante un modelo de Análisis Envolvente de Datos (DEA), considerando como entradas las reservas reportadas y el empleo en minería y explotación de canteras, y como salida la producción de litio correspondiente a 2025. La evidencia empírica mostró diferencias importantes entre los países analizados, lo que confirma que la magnitud de las reservas y el volumen de producción, considerados de manera aislada, no son suficientes para caracterizar el desempeño extractivo relativo.

La hipótesis planteada se respalda con la evidencia empírica, debido a que la eficiencia presentó diferencias entre los países y no se observó una correspondencia directa entre la disponibilidad de reservas y la posición sobre la frontera. Australia, China, Portugal y Zimbabwe alcanzaron una eficiencia de 100 %, mientras que Argentina, Brasil, Canadá, Chile y Estados Unidos se ubicaron por debajo de la frontera. En particular, la comparación entre países con mayores dotaciones de reservas y aquellos con menores existencias mostró que una mayor disponibilidad del recurso no garantiza una posición eficiente. El caso de Chile resulta ilustrativo, al contar con la mayor cantidad de reservas de la muestra y alcanzar una eficiencia inferior a la unidad, mientras que Portugal y Zimbabwe se ubicaron sobre la frontera con escalas productivas considerablemente menores.

Se concluye también que sí existen diferencias en la eficiencia extractiva relativa entre los países productores de litio y que la relación entre reservas, empleo y producción varía significativamente entre las unidades analizadas. La frontera DEA mostró, además, que pueden existir diferentes combinaciones eficientes de recursos y producción, por lo que alcanzar una mayor escala productiva no constituye necesariamente una condición para obtener una mayor eficiencia relativa.

Los resultados permitieron distinguir entre la dotación de un recurso mineral y la capacidad para transformarlo en producción efectiva. Esta diferencia adquiere relevancia en un contexto de creciente demanda de litio, ya que la expansión de la oferta no depende exclusivamente de la existencia de reservas, sino también de la capacidad productiva asociada con los recursos disponibles. No obstante, la eficiencia estimada debe interpretarse como relativa a las variables incluidas y al conjunto de países analizados, por lo que no representa una medida absoluta de desempeño tecnológico, económico o de sostenibilidad minera.

Por último, los resultados obtenidos constituyeron una base para ampliar el análisis mediante modelos dinámicos y la incorporación de variables tecnológicas, económicas, ambientales y sociales. En particular, integrar consumo de agua, energía, emisiones, inversión, infraestructura y características de los yacimientos permitiría determinar si las posiciones de eficiencia identificadas se mantienen cuando el aprovechamiento del litio se evalúa desde una perspectiva más amplia de productividad y sostenibilidad.

6. Referencias

- Association négaWatt. (2024). Lithium: A major ecological challenge for low-carbon mobility (Minimal Project Report). ADEME; European Climate Foundation. <https://www.negawatt.org/MINIMAL-lithium>
- Brett, A. C., Holley, E. A., Deberdt, R., Fahle, L., & Smith, N. M. (2025). Lithium production in the United States: Socio-technical review of sites, environmental impacts, and social acceptance. *Resources Policy*, 107, 105599. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105599>
- Buarque, L., Frenzel, M., Bookhagen, B., Kresse, C., Schmidt, M., Nassar, N. T., Alonso, E., Shojaeddini, E., & Sandmann, D. (2024). From exploration to production: Understanding the development dynamics of lithium mining projects. *Resources Policy*, 99, 105423. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105423>
- Camanho, A. S., Silva, M. C., Piran, F. S., & Lacerda, D. P. (2024). A literature review of economic efficiency assessments using Data Envelopment Analysis. *European Journal of Operational Research*, 315(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.07.027>
- Chen, J., Wen, S., & Liu, Y. (2022). Research on the efficiency of the mining industry in China from the perspective of time and space. *Resources Policy*, 75, 102475. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102475>
- Dunlap, A., & Riquito, M. (2023). Social warfare for lithium extraction? Open-pit lithium mining, counterinsurgency tactics and enforcing green extractivism in northern Portugal. *Energy Research & Social Science*, 95, Article 102912. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102912>
- Dou, S., Xu, D., Zhu, Y., & Keenan, R. (2023). Critical mineral sustainable supply: Challenges and governance. *Futures*, 146, 103101. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2023.103101>
- Energy Institute. (2026). Statistical review of world energy 2026. <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Fleming, M. T., Kannan, S. G., & Eggert, R. G. (2024). Long-run availability of mineral resources: The dynamic case of lithium. *Resources Policy*, 97, 105226. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105226>
- International Labour Organization. (2026). Employment by sex, age and economic activity – ISIC level 2 (thousands) [Data set]. ILOSTAT. <https://ilostat.ilo.org/data/>
- Jiskani, I. M., Moreno-Cabezali, B. M., Rehman, A. U., Fernandez-Crehuet, J. M., & Uddin, S. (2022). Implications to secure mineral supply for clean energy technologies for

- developing countries: A fuzzy based risk analysis for mining projects. *Journal of Cleaner Production*, 358, 132055. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132055>
- Jin, P., Wang, S., Meng, Z., & Chen, B. (2023). China's lithium supply chains: Network evolution and resilience assessment. *Resources Policy*, 87, 104339. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104339>
- Khakmardan, S., Rolinck, M., Cerdas, F., Herrmann, C., Giurco, D., Crawford, R., & Li, W. (2023). Comparative Life Cycle Assessment of Lithium Mining, Extraction, and Refining Technologies: A global perspective. *Procedia CIRP*, 116, 606–611. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.102>
- Liu, H., Li, H., Qi, Y., An, P., Shi, J., & Liu, Y. (2021). Identification of high-risk agents and relationships in nickel, cobalt, and lithium trade based on resource-dependent networks. *Resources Policy*, 74, 102370. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102370>
- Ma, X., Xu, X., Wang, Z., Zhao, X., Lee, H., & Truskolaski, T. (2024). Technological innovation, industrial structure upgrading and mining energy efficiency: An analysis based on the super-efficient EBM model. *Resources Policy*, 98, 105339. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105339>
- Sánchez-López, M. D. (2023). Geopolitics of the Li-ion battery value chain and the Lithium Triangle in South America. *Latin American Policy*, 14(1), 22–45. <https://doi.org/10.1111/lamp.12285>
- Souza, R. G., Domingues, A. M., Spindlegger, A., Mair-Bauernfeind, C., & Part, F. (2025). Review of the current knowledge and identified gaps in assessing the social and environmental impacts of mining processes in the Lithium Triangle. *Sustainable Production and Consumption*, 53, 40–63. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.11.031>
- Wang, M., & Feng, C. (2023). Measuring capacity utilization under the constraints of energy consumption and CO2 emissions using meta-frontier DEA: A case of China's non-ferrous metal industries. *Resources Policy*, 80, Article 103278. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2022.103278>
- Wang, S., Xing, L., Chen, X., & Song, M. (2024). Evaluating and enhancing natural resource asset management efficiency in China: A data envelopment analysis study. *Resources Policy*, 92, 105000. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105000>
- Wolters, L., & Brusselselaers, J. (2024). The energy transition paradox: How lithium extraction puts pressure on environment, society, and politics. *The Extractive Industries and Society*, 19, Article 101498. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101498>
- Yousefian, M., Bascompta, M., Sanmiquel, L. et al. Corporate social responsibility and total factor productivity: the case of European mining industry. *Miner Econ* 37, 149–161 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13563-024-00423-4>
- Zaman, Q. U., Zhao, Y., Zaman, S., Batool, K., & Nasir, R. (2024). Reviewing energy efficiency and environmental consciousness in the minerals industry amidst digital transition: A comprehensive review. *Resources Policy*, 91, 104851. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.104851>

Zhang, Y., & Song, Y. (2020). Unified efficiency of coal mining enterprises in China: An analysis based on meta-frontier non-radial directional distance functions. *Resources Policy*, 65, 101581. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101581>

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES GENERALES

La presente investigación ofrece un análisis multidimensional sobre el litio como un insumo crítico para la transición energética global, al integrar de manera complementaria la dimensión intertemporal de su escasez física con la evaluación de la eficiencia operativa en su proceso de extracción. Por un lado, mediante un modelo dinámico de precios que registra una tasa de crecimiento continuo estimada del 7.56 % anual en el periodo 1996-2025 y su relación inversa con las reservas efectivas, se estableció un horizonte teórico de agotamiento de 68.43 años para un stock fijo de referencia de 37 millones de toneladas, proyectando un límite tendencial hacia el año 2093. Este hallazgo no pretende fijar una fecha determinista de agotamiento físico, sino proporcionar una métrica cuantitativa sobre la finitud del stock considerado y evidenciar que el proceso de descarbonización global enfrenta restricciones temporales concretas en sus insumos estratégicos.

Por otro lado, la evaluación de la eficiencia extractiva relativa mediante Análisis Envolvente de Datos demostró que la sola posesión de grandes reservas geológicas no constituye una condición suficiente para garantizar un desempeño productivo óptimo. El análisis reveló heterogeneidades profundas entre los países productores, situando en la frontera de eficiencia a economías como Australia, China, Portugal y Zimbabwe, mientras que naciones con vastas dotaciones de recursos, de las cuales Chile representa el caso más ilustrativo, mostraron ineficiencias relativas al evaluar la relación entre sus insumos de capital natural y trabajo frente a la producción efectiva alcanzada.

La articulación de ambos enfoques permite concluir que el desafío del suministro mundial de litio abarca tanto un límite geológico temporal como un reto de capacidad técnica y productiva. La presión sobre el stock analizado y la eventual postergación del horizonte estimado hacia 2093 dependerán fundamentalmente de la capacidad de los países productores para cerrar sus brechas de eficiencia operativa, así como del dinamismo de los mecanismos capaces de ampliar la disponibilidad futura del recurso, tales como el descubrimiento de nuevos yacimientos, el desarrollo tecnológico, la sustitución

de materiales y el escalamiento del reciclaje en un marco de sostenibilidad integral.

CAPÍTULO 6. LITERATURA CITADA

- Agencia Internacional de Energía [IEA]. (2023). Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/6554483d-en>
- Secretaría de Economía. (2018). Perfil del litio (Dirección General de Desarrollo Minero, Ed.). Gobierno de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419275/Perfil_Litio_2018__T_.pdf
- U.S. Geological Survey (2023). Lithium Statistics and Information, 1952-2023. USGS. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/lithium-statistics-and-information>
- Ruiz Peyré, F., & Dorn, F. M. (2020). Aprovechamiento del litio en el Noroeste Argentino: Realidades, desafíos y perspectivas en un mundo globalizado. Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, 24(632), 1–27. <https://doi.org/10.1344/SN2020.24.22466>