

UNIVERSIDAD SAN SEBASTIÁN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA

SEDE SANTIAGO

EXPORTACIÓN CHILENA DE CARBONATO DE LITIO: CADENA DE PRODUCCIÓN Y VARIABLES DE MERCADO

Trabajo de proyecto de título para optar al título de Ingeniero Civil en Minas

Profesora Guía: Dra. Bárbara Andrea Valenzuela Klagges

Estudiante: Daniel Alexis Alamos Pichuncheo

SANTIAGO, CHILE

2018

CALIFICACIÓN TRABAJO DE PROYECTO DE TÍTULO

Santiago, de del 2	019
Los miembros de la comisión evaluadora, detallados al final la presente página, dejan constancia de que el alur Daniel Alexis Alamos Pichuncheo , ha aprobado su Proyecto	mno
Título para optar al título de Ingeniero Civil en Minas, con r	
Titalo para optar ar titalo de frigerilero civil en ivilitas, con i	iota
·	
Nombre y Firma Nombre y Firma	
Nombre y Firma	

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que han contribuido tanto directa, como indirectamente en la realización de este trabajo. En primer lugar, quisiera agradecer a mi profesora guía quien creyó en mí desde el comienzo y que, a lo largo del periodo que tomó llevar a cabo este trabajo, me motivó no sólo para que sirviera en la obtención de mi título profesional, sino también para que sus alcances pudieran traerme satisfacciones a lo largo del proceso y en mi futuro profesional. Finalmente, destaco su gran calidad humana que facilitó en gran medida la realización de esta investigación.

De igual manera, me gustaría destacar el gran aporte de los profesores integrantes de la comisión revisora, quienes me exigieron y apoyaron en todo momento. En especial agradezco a Andrés Soto que mostró un gran compromiso con sus estudiantes y el futuro de la carrera, así también a Vlamir Muñoz que siempre estuvo abierto a recibirme para consultas, revisiones y conversaciones.

Otra parte importante en el proceso fueron mis compañeros y amigos que hice dentro de la carrera, siempre abiertos a apoyar, opinar y ofrecer momentos de distención. No me queda duda que serán grandes profesionales.

También me gustaría agradecer a mi polola que me acompañó y apoyó durante todo el proceso de este trabajo. Gracias por motivarme a ser cada día mejor.

Finalmente, no puedo concluir este apartado sin antes agradecer a mis padres. Ellos que hace cinco años atrás confiaron ciegamente en mí y me dieron la posibilidad de estudiar a 2.200 kms. de casa. Gracias por siempre permitirme soñar e instarme a atreverme. Saber que cuento con su apoyo hace que cada meta se vea más alcanzable. También tú, hermana, siempre has sido un pilar fundamental en mi vida y las cosas por las que debo agradecerte son incontables.

El apoyo de cada uno de ustedes, así también como el de muchas personas que aquí no han sido nombradas, ha hecho posible la realización de este trabajo y por ello mi gratitud es inmensa. Muchas gracias.

CONTENIDO

INTRO	DUCC	ión	1				
CAPÍT	ULO 1	: ASPECTOS GENERALES	3				
1.1.	1.1. Planteamiento del problema3						
1.2.	Obj	jetivos	3				
1.	2.1.	Objetivo general	3				
1.	2.2.	Objetivos específicos	4				
1.3.	Me	todología	4				
1.4.	Lim	nitaciones	5				
CAPÍT	ULO 2	: MARCO TEÓRICO	6				
2.1.	Liti	o y sus características	6				
2.2.	Pri	ncipales usos del litio	8				
2.	2.1.	Uso en la fabricación de cátodos para baterías	8				
2.	2.2.	Usos en la industria de vidrios y cerámicas	11				
2.	2.3.	Uso en grasas lubricantes	12				
2.	2.4.	Uso en la industria farmacéutica	13				
2.	2.5.	Uso en aleaciones con aluminio	14				
2.	2.6.	Uso en refrigeración industrial	15				
2.	2.7.	Uso en la fabricación de caucho sintético	16				
2.	2.8.	Potencial uso futuro: reactores de fusión nuclear	17				
2.3.	Red	cursos y reservas mundiales de litio	19				
2.4.	Ext	racción de litio	23				
2.	4.1.	Extracción de litio a partir de yacimientos pegmatíticos	23				
2.	4.2.	Extracción a partir de salmueras de litio	27				
CAPÍT	ULO 3	: MERCADO MUNDIAL DEL LITIO	31				
3.1.	Pro	oducción mundial de litio	31				
3.2.	Pro	oducción de litio en Chile	33				
3.	2.1.	Productores de litio en Chile	33				
3.	2.2.	Productos de litio en Chile	36				

3.3.	Prir	ncipales compradores del litio chileno37					
3.3	3.3.1. Ingresos por exportaciones de productos de litio						
CAPÍTU	LO 4:	MODELO Y ESTIMACIÓN	45				
4.1.	Esp	ecificaciones del modelo gravitacional	45				
4.2.	Me	todología	49				
4.3.	Res	ultados de modelamiento	54				
4.3	.1.	Multicolinealidad	54				
4.3	.2.	Heterocedasticidad	58				
4.3	.3.	Revisión aspectos generales	59				
4.3	.4.	Estimación mediante datos de panel	60				
CONCLU	JSIOI	NES	69				
BIBLIO	GRAF	ĺΑ	73				
ANEXO	N°1:	Proyección de exportaciones de carbonato de litio	82				

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del litio	7
Tabla 2. Cuadro comparativo de características de baterías	9
Tabla 3. Observaciones litio en baterías.	10
Tabla 4. Observaciones litio en vidrios y cerámicas	11
Tabla 5. Observaciones litio en grasas lubricantes.	12
Tabla 6. Observaciones litio en industria farmacéutica	13
Tabla 7. Observaciones litio en aleación con aluminio	14
Tabla 8. Observaciones litio en sistemas de refrigeración.	15
Tabla 9. Observaciones litio en fabricación de caucho sintético	16
Tabla 10. Evolución y proyección 2018 de usos del litio	17
Tabla 11. Observaciones litio en reactores de fusión nuclear	18
Tabla 12. Recursos mundiales de litio	19
Tabla 13. Reservas mundiales de litio.	20
Tabla 14. Factores claves en la viabilidad de un salar.	21
Tabla 15. Comparación de factores principales salares del mundo	22
Tabla 16. Producción mundial de litio (toneladas)	31
Tabla 17. Porcentaje de carbonato de litio dentro de la producción global de Chile.	37
Tabla 18. Evolución valor FOB carbonato de litio (2005-2016)	41
Tabla 19. Estimación precio de venta por tonelada exportada de carbonato de litio cada país en 2016	
Tabla 20. Autores con trabajos basados en el modelo gravitacional	46
Tabla 21. Bibliografía estrategias para abordar observaciones cero	49
Tabla 22. Detalle distancia entre puertos.	52
Tabla 23. Resultados estimación datos de panel con efectos fijos	63
Tabla 24. Resultados datos de panel dinámicos.	65
Tabla 25. Valores a sumar a la ecuación según año	66
Tabla 26. Porcentaje error estimación de logaritmo natural por año	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.Distribución de los recursos mundiales de litio	20
Figura 2.Distribución de las reservas mundiales de litio	20
Figura 3. Proceso de extracción de carbonato de litio de mineral de roca	26
Figura 4. Triángulo del litio	27
Figura 5. Proceso de evaporación solar	30
Figura 6. Distribución de la producción mundial de litio en 2017	32
Figura 7. Logo SQM	34
Figura 8. Logo ALBEMARLE	35
Figura 9. Producción total de productos de litio 2006-2016 (ton)	36
Figura 10. Producción chilena por compuesto 2012-2016	36
Figura 11. Exportaciones de carbonato de litio chileno según país de destino (2016)38
Figura 12. Exportaciones hacia Corea del Sur, China y Japón	38
Figura 13. Exportaciones de salmuera de litio según país de destino (2016)	39
Figura 14. Exportaciones de hidróxido de litio según país de destino (2016)	39
Figura 15. Montos exportados por productos de litio (2016)	40
Figura 16. Exportaciones en miles de USD según productos de litio (2012-2016)	40
Figura 17. Exportaciones de carbonato de litio v/s valor FOB	42
Figura 18. Distribución por monto total de carbonato de litio exportado según país destino (2016)	
Figura 19. Participación del litio en exportaciones de Chile 2017	44
Figura 20. Matriz de correlación de variables cuantitativas independientes	55
Figura 21. Test de VIF de variables cuantitativas independientes	56
Figura 22. Matriz de correlación variables independientes sin costo de exportar contenedor	57
Figura 23. Test de VIF de variables cuantitativas independientes sin precio de exportación de contenedor	57
Figura 24. Test de White	58
Figura 25. Regresión sin logaritmo natural	59

Figura 26. Regresión con logaritmo natural	60
Figura 27. Estimación datos de panel con efectos fijo	61
Figura 28. Estimación datos de panel con efectos aleatorios	62
Figura 29. Test de Hausman	63
Figura 30. Estimación datos de panel dinámicos	64
Figura 31. Exportaciones reales, bajo logaritmo natural v/s modelo estimado, bajo	
logaritmo natural	66
Figura 32. Exportaciones reales v/s exportaciones modelo	68
Figura 33. Anexo 1: Proyección de exportaciones de carbonato de litio (2017-2019)	82

RESUMEN

El carbonato de litio, principal producto de litio exportado por Chile, presenta una clara tendencia al aumento tanto de precio como de demanda, sin embargo, no se han documentado estudios donde se proponga una ecuación que permita modelar el comportamiento exportador del mineral. De acuerdo a esto y dado lo importante del carbonato de litio en el desarrollo tecnológico actual, este estudio tiene como finalidad proponer una ecuación, mediante un estudio descriptivo, exploratorio y empírico, que permita modelar las exportaciones de carbonato de litio además de identificar las variables que más influyen en el intercambio comercial de dicho producto entre dos países. En este estudio se emplea el modelo gravitacional, que hace alusión al modelo de gravitación universal de Isaac Newton, relacionando la atracción entre dos cuerpos en función de sus masas y la distancia que los separa. En la versión económica, las masas de los cuerpos están representadas por el PIB de cada país, la distancia entre ellos se encuentra representada por los costos de logística y transporte, mientras que la atracción entre cuerpos es el intercambio comercial entre los países de estudio.

El modelo estimado no es consistente con la teoría del modelo gravitacional ya que, al aumentar el PIB del exportador, las exportaciones bajan y, al aumentar la distancia entre los países comerciantes, las exportaciones aumentan. Esto se debe a que el carbonato de litio es un insumo de manufactura y los costos de transporte e importación de carbonato de litio no influyen en el volumen que se importa demostrando que, en su formulación y evaluación de proyectos, los importadores consideran más rentable adquirir este bien asumiendo todos los costos de transporte, antes que buscar un sustituto con menores costos de traslado.

La ecuación propuesta es la siguiente:

$$ln(E_{ijt}) = \beta_0 + \beta_1 ln (E_{ijt-1}) + \beta_1 ln (E_{ijt-2}) + \alpha_1 ln \gamma_{it} + \alpha_2 ln \gamma_{jt}$$

$$+ \delta_1 ln \varepsilon_{ij} + \eta_1 ln \theta_{jt} + \lambda_1 ln \mu_{it} + \lambda_2 ln \mu_{jt} + \rho_1 ln \tau_{it}$$

$$+ \rho_2 ln \tau_{jt} + \sigma_1 ln \varphi_{it} + \sigma_2 ln \varphi_{jt} + \zeta_1 ln \nu_{it} + \zeta_2 ln \nu_{jt}$$

$$+ \vartheta ln \varepsilon_{it} + \sum_k \phi_k P_{ij} + \omega_{ijt}$$

Esta investigación ha abierto nuevas propuestas de estudio, como mejorar el procedimiento de estimación de exportaciones de carbonato de litio tomando en cuenta el problema de las observaciones 0 (cero) dentro de la muestra, es decir, aplicar una estrategia que asuma un valor más acertado para el intercambio comercial entre dos países, distinto de cero, permitiendo realizar una estimación final más acertada.

ABSTRACT

The lithium carbonate, main lithium product exported by Chile, presents an increase in price and demand, however, there is not studies where an equation is proposed that allows modeling the exported behavior of the mineral. According to this and giving the importance of lithium carbonate in the technological development, the purpose of this study is put forward an equation, through a descriptive, explorative and empirical study, that allows to model the lithium carbonate exports in addition to identify the most influence variables in the commercial exchange of that product between two countries. In this study the gravitational model is used, which makes an allusion to Isaac Newton's universal gravitation model, that relates the attraction between two bodies according to their masses and the distance that separates them. In the economic version, the GDP of each country represents the masses of the bodies, the distance between them is represented by the logistic and transport cost while the attraction between the bodies is the countries study's commercial exchange.

The estimated model is not consistent with the gravitational model theory as the exporter GDP increases, the exports fall and while the distance between the merchant countries increases, exports increase too. This is because lithium carbonate is a manufacturing input and the costs of transporting and importing lithium carbonate do not influence the volume that is imported, demonstrating that, in its formulation and evaluation of projects, the importers consider more profitable acquire this good assuming all transport costs rather than looking for a substitute with lower transfer costs

The proposed equation is as follows:

$$\begin{split} \ln \bigl(E_{ijt}\bigr) &= \beta_0 + \beta_1 \ln \left(E_{ijt-1}\right) + \beta_1 \ln \left(E_{ijt-2}\right) + \alpha_1 \ln \gamma_{it} + \alpha_2 \ln \gamma_{jt} \\ &+ \delta_1 \ln \varepsilon_{ij} + \eta_1 \ln \theta_{jt} + \lambda_1 \ln \mu_{it} + \lambda_2 \ln \mu_{jt} + \rho_1 \ln \tau_{it} \\ &+ \rho_2 \ln \tau_{jt} + \sigma_1 \ln \varphi_{it} + \sigma_2 \ln \varphi_{jt} + \zeta_1 \ln \nu_{it} + \zeta_2 \ln \nu_{jt} \\ &+ \vartheta \ln \varepsilon_{it} + \sum_k \phi_h P_{ij} + \omega_{ijt} \end{split}$$

This research has opened new study proposal, such as improve the lithium carbonate export estimation taking into consideration the problem of 0 (zero) observations within the sample, that is, apply a strategy that assume a more successful value for commercial exchange between two countries, different from zero, allowing a more accurate final estimate to be made.

INTRODUCCIÓN

El mundo avanza a pasos agigantados en la implementación de energías renovables en el uso cotidiano y es allí donde el litio es uno de los principales protagonistas debido a su aplicación en baterías, especialmente con miras hacia el electro movilidad. En cuanto a las reservas, Chile tiene una destacada participación en este mercado con el 52% del total mundial (USGS, 2018) en el Salar de Atacama, donde además posee condiciones geológicas y climáticas especialmente favorables para la producción de minerales de litio. Dentro de estas condiciones está su gran extensión, su baja tasa de precipitación, sus altas temperaturas, la baja humedad en el ambiente, la presencia de viento en la zona, además de la alta concentración de litio, potasio y baja relación litio-magnesio.

El carbonato de litio, principal producto de litio exportado por Chile, presenta una clara tendencia al aumento tanto de precio como de demanda, sin embargo, no se han documentado estudios donde se proponga una ecuación que permita modelar el comportamiento exportador del mineral. De acuerdo a esto y dado lo importante del carbonato de litio, este estudio tiene como objetivo proponer una ecuación, mediante un estudio descriptivo, exploratorio y empírico, que permita modelar las exportaciones de carbonato de litio, además de identificar las variables que más influyen en el intercambio comercial de dicho producto entre dos países.

Para cumplir el objetivo del trabajo de título, se propone el modelo gravitacional, estimando las exportaciones de carbonato de litio mediante datos de panel estáticos y dinámicos.

Este trabajo consta de cuatro capítulos. El primer capítulo expone los aspectos que gobiernan la realización del estudio y sus principales limitaciones. El segundo capítulo expone las principales propiedades del litio; sus principales usos actuales y potencial uso futuro, junto a diversos trabajos de autores que los validan. Se presentan los recursos y las reservas a nivel mundial; y finalmente se realiza una breve descripción de los procesos de extracción y producción de

carbonato de litio. El capítulo tres describe el mercado del litio a nivel mundial y nacional, presentando los principales productores y productos de intercambio comercial, además de los principales compradores del carbonato de litio producido en Chile. El capítulo cuatro y último, realiza una descripción del modelo a utilizar, junto con diversas publicaciones de autores que lo han aplicado en sus investigaciones; expone el fundamento teórico utilizado para generar la ecuación general propuesta por el modelo; describe el proceso utilizado para la modelación y obtención de los resultados.

Finalmente, se agrega un apartado de conclusiones donde se procede a interpretar los resultados obtenidos en la modelación, tanto generales, como específicas para cada una de las variables significativas resultantes.

CAPÍTULO 1: ASPECTOS GENERALES

1.1. Planteamiento del problema

El mercado del litio ha adquirido cada vez más importancia para Chile en los últimos años debido a su crecimiento en el aporte a la economía nacional, además de su creciente demanda. Las proyecciones son favorables para la exportación de carbonato de litio, no obstante, no se encuentra documentada ninguna ecuación matemática que modele las exportaciones de carbonato de litio de Chile, ni alguna que identifique y asigne peso a las variables más significativas dentro del resultado.

Si bien cada año algunos organismos estatales emiten informes sobre el carbonato de litio añadiendo predicciones para años futuros, estas proyecciones están hechas mediante modelos estimativos predictivos, los que no identifican las variables que inciden dentro del resultado final y menos le asignan un peso a cada valor.

La investigación propuesta busca generar una ecuación mediante datos de panel estáticos y dinámicos, aplicando el modelo gravitacional. De esta manera, el resultado incluye una ecuación matemática controlada por distintas variables que tienen un determinado peso dentro del resultado.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

 Determinar las variables que influyen en el proceso exportador del carbonato de litio de Chile con sus principales socios comerciales durante el periodo 2005-2016.

1.2.2. Objetivos específicos

- Exponer las propiedades, proceso productivo y usos del litio y sus derivados.
- Plantear un modelo lineal que permita determinar las variables que influyen en el proceso exportador chileno del litio.
- Determinar qué metodologías econométricas se adaptan mejor a la estimación del modelo.
- Estimar el modelo de acuerdo a las metodologías planteadas.

1.3. Metodología

Investigación descriptiva, exploratoria y empírica. Mediante la recopilación e interpretación de la información se describen las características más importantes del mineral, sus alternativas de procesamiento, sus variados usos y los principales destinos de exportación. Posteriormente, utilizando el modelo gravitacional y adaptándolo a la realidad chilena y al mercado del litio, se estima dicho modelo mediante datos de panel estáticos y dinámicos.

Los primeros autores que utilizaron el modelo gravitacional para analizar el comercio internacional fueron Tinbergen (1962), Pöyhönen (1963) y Linnemann (1966). En los estudios de Anderson (1979), Bergstrand (1985) y Helpman y Krugman (1985), se derivan ecuaciones gravitacionales de modelos de comercio internacional fundados en la diferenciación del producto y en el rendimiento a escala creciente, y se brinda un sustento teórico riguroso. Mátyás (1997), Cheng y Wall (1999), Bayoumi y Eichengreen (1998), Breuss y Egger (1999), y Egger (2000) proporcionan especificaciones econométricas. En las últimas décadas, el modelo gravitacional es uno de los modelos que más se ha utilizado para analizar los flujos del comercio internacional debido tanto a sus propiedades como a su soporte teórico y empírico, así como a su flexibilidad y adaptación a diferentes realidades regionales o de un país en particular.

1.4. Limitaciones

La principal limitación para realizar el trabajo es la falta de datos para un periodo más amplio de tiempo. Al no existir una base de datos específica para modelar las exportaciones de carbonato de litio, se debe proceder a elaborar una a partir de indicadores escogidos por los autores del estudio.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

El marco teórico de esta investigación abarca las principales características del litio, los usos que tiene este elemento, los recursos y reservas tanto a nivel mundial, como los correspondientes a Chile, y el proceso de extracción de minerales de litio a partir de fuentes pegmatíticas y salmueras. Este modelo conceptual fundamenta la investigación y da una contextualización del porqué las exportaciones de carbonato de litio son de alta importancia para el desarrollo económico y minero de Chile basándose en sus condiciones favorables para la extracción y la creciente demanda a nivel mundial.

2.1. Litio y sus características

El litio es el tercer elemento del sistema periódico, después del hidrógeno y el helio, siendo el primer elemento del grupo de metales alcalinos. Es altamente reactivo por lo que en la naturaleza existe sólo combinado en la forma de minerales de litio en rocas pegmatíticas (principalmente espodumeno), rocas sedimentarías (hectorita) y mayoritariamente en salmueras naturales continentales. Su baja masa atómica, 6,941 g/mol, es el promedio de la distribución normal de dos isótopos estables de pesos atómicos 6 y 7. La abundancia natural del Li⁷ es de 92,4 por ciento y la del Li⁶ de 7,6 por ciento en peso (Comisión Nacional del Litio, 2014, p. 39). Es el más liviano de todos los elementos sólidos con una densidad de 0,54 g/cm3, lo que, junto a su alto potencial electroquímico en condiciones standard, de 3,045 Volt, lo convierten en el componente preferido de las baterías recargables de alta densidad energética.

La tabla 1 resume algunas propiedades del mineral:

Tabla 1. Propiedades del litio

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Número atómico	3	Masa atómica (gr/mol)	6,941
Estado de oxidación	+1	Densidad (gr/cm³)	0,535
Carácter del óxido	Básico	Temperatura de fusión (C°)	180,5
Electronegatividad (Pauling)	1,0	Temperatura de ebullición (C°)	1330
Radio covalente (Å)	1,23	Estructura cristalina	Cúbica centrada en el cuerpo (BCC)
Radio iónico (Å)	0,6	Potencial redox (Volts)	3,045
Radio atómico (Å)	1,55	Potencial de ionización (eV)	5,39
Configuración electrónica	$1s^22s^1$	Calor específico (cal/gr)	0,79

Fuente: Elaboración propia según datos de "Tabla periódica de los elementos", Editorial Universitaria (2016).

Cabe destacar que, si bien el litio no se encuentra en forma pura en la naturaleza por su alta reactividad, no es escasa la existencia de minerales de litio. La British Geological Survey afirma que "hay más de 100 minerales conocidos que pueden contener litio, aunque solo algunos de éstos son económicamente factibles de extraer" (2016, p. 1). Tal como publica un estudio reciente de la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO) (2017), dentro de los minerales más comunes con contenidos de litio están el espodumeno (LiAlSi₂O₆), la lepidolita $(LiAlSi_4O_{10}),$ $(KLi_2Al(Si_4O_{10})(F,OH)_2),$ la petalita la hectorita $Na_{0.3}(Mg, Li)_3(Si_4O_{10})(F, OH)_2$, la jadarita $(LiNaSiB_3O_7(OH))$, la ambligonita $(LiAlPO_4F)$ y la eucriptita $(LiAlSiO_4)$. Por otra parte, gran parte de la producción mundial se obtiene a partir de salmueras que contienen concentraciones suficientes para la producción económica de minerales de litio.

2.2. Principales usos del litio

Los primeros usos del litio a gran escala son las baterías de litio, hidróxido de litio en grasas de litio, en la absorción de dióxido de carbono en submarinos durante la segunda guerra mundial y en el relleno de globos aerostáticos. Entre 1955 y 1960 comienza el uso masivo en cerámicas y vidrios, además del empleo del isótopo 6 de litio para fabricar el tritio para bombas de hidrógeno. A finales de los 50's comienza el uso en refrigeración industrial donde el litio actúa en forma de bromuro de litio (BrLi) como absorbente. En 1961 se utiliza en la fabricación de caucho sintético como catalizador. El litio se comienza a utilizar en aleaciones con aluminio en la segunda mitad de los 60's y de 1972 en adelante se registran variados nuevos usos del elemento.

2.2.1. Uso en la fabricación de cátodos para baterías

Las baterías funcionan mediante los fundamentos de las celdas electrolíticas. Éstos dispositivos convierten la energía química de los elementos en energía eléctrica mediante reacciones de óxido-reducción. Estas celdas se pueden ensamblar en serie o en paralelo en la cantidad necesaria para satisfacer los requerimientos de voltaje.

La celda electroquímica consta de tres componentes principales, el ánodo o electrodo negativo, el cátodo o electrodo positivo y el electrolito. En un proceso habitual de descarga, el cátodo sufre una reducción y el ánodo una oxidación de parte de sus elementos químicos constitutivo. Contrariamente, se produce la reacción inversa durante la carga. El electrólito debe ser un buen conductor iónico y aislante eléctrico.

Una batería de ion litio clásica contiene LiCoO₂ como electrodo positivo, un material basado en carbono como electrodo negativo, y un electrólito no acuoso, teniendo un voltaje medio de aproximadamente 3,7 V. (Vidal-Abarca, C., 2012).

Pero, ¿por qué preferir las baterías de litio sobre las demás existentes en el mercado? La tabla 2 muestra la comparación entre distintos tipos de baterías.

Tabla 2. Cuadro comparativo de características de baterías

Tipo	Enorgía/noso	Tensión por	Duración (número	Tiempo de	Auto-descarga por
	Energía/peso	elemento (V)	de recargas)	carga	mes (% del total)
Plomo	30-50 Wh/kg	2 V	1000	8-16 hrs.	5%
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1,25 V	500	10-14 hrs.	30%
Ni-Mh	60-120 Wh/kg	1,25 V	1000	2-4 hrs.	20%
Li-ion	110-160 Wh/kg	3,16 V	4000	2-4 hrs.	25%
Li-Po	100-130 Wh/kg	3,7 V	5000	1-1,5 hrs.	10%

Fuente: Departamento de electrónica. Universidad Técnica Federico Santa María (2010)

Tal como indican sus las propiedades energéticas del litio, es capaz de almacenar mucha más energía que otros elementos en un mismo volumen, llegando en algunos casos a ser cuatro veces mayor la densidad de carga. Además, queda al descubierto la gran diferencia en tensiones que poseen las baterías, siendo ampliamente mayor en las que están hechas con litio. En cuanto a la vida útil, una batería de litio puede llegar a durar de cuatro a cinco veces más que una batería a base de plomo y hasta diez veces más que una de Ni-Cd. Por otra parte, si bien la densidad de carga es mucho mayor en las baterías hechas a partir de litio, el tiempo de carga es notoriamente inferior al de otros tipos de baterías, llegando a representar cerca del 6% del tiempo de carga en comparación a las baterías de otros componentes. Al analizar la auto-descarga que presentan las baterías, se observa que las baterías a base de litio se encuentran dentro del promedio de auto-descarga, pero al tener una mayor densidad energética, en la actualidad siguen siendo las baterías más convenientes para almacenar altas cargas de energía en un tamaño reducido.

Dicho lo anterior, las baterías de litio actualmente son las más eficientes en la actualidad y, por ende, es de esperar que sean las elegidas a la hora de crear tecnología, en especial para la electro-movilidad.

La tabla 3 expone algunas observaciones sobre el uso del litio en baterías.

Tabla 3. Observaciones litio en baterías.

AUTOR (ES)	AÑO	OBSERVACIONES
•		
COCHILCO	2017	"El litio presenta un elevado potencial electroquímico dentro de los metales y una masa atómica baja. Estas propiedades proporcionan una densidad de energía alta en equipos de reducido tamaño y de poco peso, lo cual son propiedades altamente valoradas en el mercado de las baterías."
Carmeán, I.	2016	"nanotubos y nanofibras de carbono así como grafeno, son potenciales candidatos para sustituir al grafito de tamaño micrométrico, actualmente utilizado como material activo en los ánodos de las baterías de ión litio con vistas a mejorar las prestaciones de estas baterías y de esta forma cumplir los requerimientos necesarios para su implementación en vehículos eléctricos o sistemas de almacenamiento de energía eléctrica a gran escala."
CORFO	2016	"Se espera que el mercado mundial de baterías de litio continúe con su crecimiento acelerado para llegar a duplicar el mercado actual que se estima cerca de US\$ 20-22 mil millones."
Manrique, A.	2014	"Se espera que las baterías de ión-litio mejoren sustancialmente sus prestaciones, impulsadas por la evolución de la nano-tecnología y los nuevos materiales. Las mejoras estarán en la capacidad de almacenamiento, tiempo de recargas y vida útil. Se estima que los elevados costos asociados a la producción de baterías puedan reducirse en los próximos años."
Iglesias, Lago, Nogueiras, Martines-Peñalver, Marcos, Quintans, Moure, Valdés.	2012	Las baterías de Li-ion tienen una alta densidad de energía, un buen rendimiento a altas temperaturas y son reciclables. Las principales ventajas de las baterías de Li-ion son un bajo efecto de memoria, una alta potencia específica (W/kg), una elevada energía específica (Wh/kg) y una larga vida útil. Estas características hacen estas baterías indicadas para su uso en vehículos híbridos eléctricos (HEVs) y vehículos eléctricos (EVs).

2.2.2. Usos en la industria de vidrios y cerámicas

El litio se usa para crear productos térmicamente estables y capaces de soportar choques térmicos repetidos. Además, reduce la viscosidad del vidrio fundido y aumenta su resistencia cambios térmicos.

En la tabla 4 se aprecia una recopilación de observaciones del litio en vidrios y cerámicas.

Tabla 4. Observaciones litio en vidrios y cerámicas.

AUTOR (ES)	AÑO	OBSERVACIONES
Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.	2017	"Dentro de los efectos de la incorporación de litio en los esmaltes cerámicos se destaca la baja viscosidad de los vidrios de sílice, lo cual otorga mejores características de flujo y permite esmaltes de menor espesor y mayor homogeneidad."
Macquarie	2016	 "El litio exhibe las siguientes propiedades que lo hacen atractivo para diversas aplicaciones: Bajo coeficiente de expansión térmica: beneficios en la industria de la cerámica, al crear productos térmicamente estables y capaces de soportar choques térmicos repetidos. Reducción de la viscosidad del vidrio fundido y aumento de la resistencia de éste a cambios térmicos."
Comisión Nacional del Litio	2014	"Su bajo coeficiente de dilatación lineal permite, a su vez, su uso en cerámicas expuestas a cambios bruscos de temperatura."
Manrique, A.	2014	"Su alto potencial electroquímico lo hace especialmente adecuado en las baterías, la cerámica y el vidrio. A su alta conductividad térmica se agrega su baja viscosidad."
Garcés, I.	s/f	"El óxido de litio es un aditivo importante en la industria del vidrio y la cerámica. Su efecto es disminuir el punto de fusión y mejorar las propiedades de escurrimiento del material fundido, reducir el coeficiente de expansión térmica y de viscosidad del producto terminado. La fuente de Li2O más utilizadas es el Li2CO3 y además los concentrados de minerales de litio. En las piezas cerámicas resistentes al choque térmico, "pirocerámicas" como vajillas de loza o vidrio tipo Corning, se utilizan preferentemente concentrados de minerales de litio con bajo contenido de hierro. "

2.2.3. Uso en grasas lubricantes

Las grasas lubricantes en base a litio conservan sus propiedades en un amplio rango de temperaturas, además de ser resistentes al agua y la corrosión. Se usan en automóviles, camiones, trenes, aerotransportes y en los equipos pesados usados en la industria y minería.

En la tabla 5 se presentan observaciones del litio en grasas lubricantes.

Tabla 5. Observaciones litio en grasas lubricantes.

AUTOR (ES)	AÑO	OBSERVACIONES
Kumar, A.	2016	"Las grasas de litio complejo poseen buena estabilidad mecánica, características de alta temperatura y resistencia al barrido por agua. Otros requisitos de desempeño como extrema presión, antidesgaste, resistencia a la herrumbre y a la corrosión pueden ser mejoradas con la adición de aditivos."
Chitue-de-Assunção- Nascimento, J. (et al.)	2013	"Las magnitudes de algunas propiedades de la grasa de jabón de litio de uso comercial Lisan 2, tales como álcalis libre, carga crítica y la carga de soldadura fueron tomadas del Catálogo de especificaciones de productos de la Empresa Cubana de Lubricantes CUBALUB."
Sánchez, R.	2011	"Los jabones metálicos de litio, calcio, sodio, aluminio y bario son los más usados como espesantes, aunque otros espesantes como poliureas o arcillas están siendo usados progresivamente bajo condiciones especiales."
SQM	2009	"se utiliza el hidróxido de litio, consiguiendo que las grasas sean resistentes al agua y a la oxidación, permitiendo además, que tengan un buen desempeño en un amplio rango de temperaturas. El uso en grasa lubricante representa aproximadamente el 75% del mercado total de hidróxido de litio. De hecho, las estimaciones indican que más del 70% de las grasas lubricantes producidas en el mundo contienen litio."
Ministerio de Minería de Chile	s/f	"Las grasas a base de jabones de litio (fabricadas a partir de hidróxido de litio LiOH) denominadas grasas multipropósito, conservan sus propiedades lubricantes en un amplio rango de temperatura (bajo 0 °C hasta 200 °C) poseen muy buena resistencia al agua y a la oxidación. Son utilizadas en todo tipo de transportes, tanto industriales como militares."

2.2.4. Uso en la industria farmacéutica

El carbonato de litio es usado como estabilizador de ánimo en personas con trastornos de bipolaridad. Si bien se posiciona como el tratamiento más frecuente, no está exento de efectos colaterales, entre ellos la intoxicación por litio.

La tabla 6 presenta algunas observaciones sobre el litio como fármaco.

Tabla 6. Observaciones litio en industria farmacéutica.

AUTOR (ES)	AÑO	OBSERVACIONES
González, J.	2017	"El descubrimiento de las propiedades farmacológicas del litio como antimaníaco y estabilizador del ánimo supuso un hito importante en la historia de la psicofarmacología clínica. Su eficacia y la posibilidad de adquirirlo en forma de genérico hacen que actualmente se siga considerando como tratamiento de primera línea para el trastorno bipolar, a pesar del aumento cada vez mayor de las opciones farmacológicas disponibles."
Giraldo, J.	2016	"Alrededor del 75 a 90 % de los pacientes tratados crónicamente con carbonato de litio pueden tener niveles tóxicos durante su tratamiento. Este medicamento es ampliamente usado en Colombia para el tratamiento del trastorno afectivo bipolar."
Tondo, L.	2014	"En la actualidad, el tratamiento a largo plazo de los trastornos del humor con litio no puede considerarse ideal, por la presencia de efectos colaterales o no deseados, pero en la mayoría de los casos es el más eficaz. Además de su efectividad en la prevención de todas las fases del trastorno bipolar, el tratamiento con litio posee una acción específica sobre la prevención del suicidio."
Roncero, C.	2009	"Se puede utilizar litio en pacientes bipolares en PMM (Programa de Mantenimiento con Metadona) si su nivel de colaboración permite los controles habituales de litemia."
Sociedad Chilena de Trastornos Bipolares (SOCHITAB)	s/f	"Estudios de seguimiento de pacientes con trastorno bipolar tratados con litio por periodos prolongados de tiempo en Europa Y Norteamérica coinciden en que los pacientes que se tratan con litio presentan una menor tasa de intentos y de suicidio consumado, comparados con las personas que toman un anticonvulsivante como estabilizador del ánimo."

2.2.5. Uso en aleaciones con aluminio

Las aleaciones de aluminio-litio producen materiales estructurales livianos y resistentes. De esta manera, se obtiene un producto de gran desempeño y de bajo peso que puede ser utilizado para ahorrar energía en transporte terrestre o en aplicaciones donde el peso es punto crucial, como la aeronáutica.

La tabla 7 recopila observaciones del litio en aleación con aluminio.

Tabla 7. Observaciones litio en aleación con aluminio.

AUTOR (ES)	AÑO	OBSERVACIONES
Briones, Bosselin, Gutiérrez, Zagal.	2017	"contribuye a la eficiencia energética, con el empleo de aleaciones de aluminio-litio en aviones, barcos y rodados. Estas aleaciones permiten tener materiales estructurales livianos y resistentes, cuyo uso en la industria aeronáutica y de transporte terrestre significa un ahorro considerable de energía."
Asdrúbal, G.	2016	"Las aleaciones de aluminio y litio son materiales livianos de alto desempeño, que se pueden utilizar en construcciones soldadas, en todas las aplicaciones donde la reducción de peso sea un punto crucial para la selección de los elementos estructurales, como es el caso de la industria aeroespacial."
Maffia, E.	2013	"También se puede lograr una baja densidad y una rigidez mayor en aquellas aleaciones que contengan litio"
Damborenea, J.	2002	"En la actualidad existen distintas piezas susceptibles de fabricarse con aleaciones de Al-Li como bordes de ataque, cubiertas de acceso, rieles de los asientos y revestimientos de las alas."
Melero, F.	1993	"Se trata de aleaciones de Al/Li, con mayor módulo elástico (rigidez), resistencia y tenacidad, que las obtenidas por las aleaciones de Al convencionales de alta resistencia, y con una reducción de densidad del orden del 7/10%"

2.2.6. Uso en refrigeración industrial

El litio es utilizado como bromuro de litio en sistemas de refrigeración por absorción. En estos sistemas, el LiBr actúa como absorbente, mientras que el refrigerante es el agua.

En la tabla 8 se muestran algunas observaciones sobre el litio en sistemas de refrigeración.

Tabla 8. Observaciones litio en sistemas de refrigeración.

AUTOR (ES)	AÑO	OBSERVACIONES		
Izquierdo, M.	2014	"La disolución bromuro de litio- agua es fácil de obtener y tiene una vida útil más larga que otros refrigerantes actualmente en el mercado. Además, suele trabajar a menor presión que la atmosférica, de forma que si hay una rotura en el sistema, la disolución no saldría hacia el exterior"		
Lapuerta, M.	2012	"La combinación de refrigerante y absorbente más usual en equipos de refrigeración por absorción en los que la producción de frío tiene lugar en el rango de temperaturas sobre cero es la de agua y bromuro de litio (LiBr)."		
González, A.	2000	"El aire que se desea secar es lanzado o es obligado a ponerse en contacto directo con la solución de LiBr y LiCl, que cae en forma de lluvia o en contacto con una superficie inclinada donde escurren estas soluciones."		
Ministerio de Minería de Chile	s/f	"El bromuro de litio LiBr y el cloruro de litio LiCl en forma de salmueras, se usan en sistemas industriales de acondicionamiento y deshumidificación de aire, aprovechando que ambos compuestos tienen propiedades altamente higroscópicas que le permiten absorber la humedad del aire."		

2.2.7. Uso en la fabricación de caucho sintético

En la fabricación de caucho sintético se ocupa el butil-litio como catalizador de la polimerización.

La tabla 9 expone algunas observaciones del litio en la fabricación de caucho sintético.

Tabla 9. Observaciones litio en fabricación de caucho sintético.

AUTOR (ES)	AÑO	OBSERVACIONES
González, A.	2000	"Entre estos cauchos o elastómeros sintéticos que se obtienen por la polimerización de uno o más compuestos (monómeros) destacan aquellos cuya reacción de formación es catalizada por compuestos órgano-litio. De estos compuestos el más importante es el butil-litio que se fabrica en grandes cantidades."
Primo, E.	1993	"Se obtiene por la polimerización del isopreno con catalizadores Ziegper y con butil-litio o litio finamente disperso, que lo forma"
Ministerio de Minería de Chile	s/f	"Se usan compuestos órgano-litio (butillitio) como catalizadores de polimerización. Este compuesto es un catalizador específico en la polimerización iónica del isopreno, estireno y butadieno para la obtención de cauchos especiales empleados en la manufactura de neumáticos de alta duración."
Garcés, I.	s/f	"En la fabricación de elastómeros sintéticos intervienen compuestos órgano-Litio, como catalizadores de polimerización de plásticos, como el polietileno. El litio es utilizado en esta aplicación en forma de Butil - Litio. Este compuesto órgano - metálico es un catalizador específico en la polimerización iónica del isopreno, estireno y butadieno, para la obtención de cauchos espaciales empleados en la manufactura de neumáticos de alta duración, y con gran resistencia a la abrasión. El N-butil-litio reacciona con el estireno y butadieno, formando una goma sintética que no requiere vulcanización."

2.2.8. Potencial uso futuro: reactores de fusión nuclear

El año 1979 el litio se considera de carácter estratégico por ser un material de "interés nuclear". Si bien aún no existe la fusión nuclear controlada, existen dos grandes proyectos internacionales que avanzan en aquella dirección, el proyecto ITER ubicado en Francia y NIF en Estados Unidos.

El concepto teórico es que los neutrones generados a partir de la reacción de fusión de deuterio y tritio son absorbidos por un manto cerámico que contiene litio. El litio se transforma entonces en helio y tritio que, a su vez, realimenta al reactor (COCHILCO, 2013). La tabla 11 expone algunas observaciones sobre el uso del litio en reactores nucleares.

De acuerdo a los usos mencionados, la tabla 10 muestra la evolución a lo largo de los años del uso del litio, además de entregar una proyección para el año 2018.

Tabla 10. Evolución y proyección 2018 de usos del litio.

SECTOR	1985	2006	2014	2018 (*)
Baterías y pilas	1.5%	18%	40%	51%
Cerámicas / Vidrios	38%	21%	15%	15%
Grasas lubricantes	17%	16%	11%	10%
Químicos y metalurgia	7.5%	9%	6%	5%
Polímeros	2.5%	4%	3%	3%
Aire acondicionado	3%	7%	4%	2%
Industria del aluminio	24%	5%	3%	2%
Farmacéuticos	5%	6%	3%	2%
Otros	1.5%	14%	15%	10%

Fuente: CORFO/Memorias Anuales de SQM, Bloomberg Businessweek, citado por Leonidas Osses, presidente de la Comisión de Litio del Instituto de Ingenieros de Mina de Chile (2018).

Tabla 11. Observaciones litio en reactores de fusión nuclear.

AUTOR(ES)	AÑO	OBSERVACIONES
World Nuclear Association	2017	"El litio-7 tiene dos usos importantes en la energía nuclear de hoy y mañana debido a su transparencia relativa a los neutrones. Como hidróxido es necesario en pequeñas cantidades para una operación segura en los sistemas de enfriamiento de reactor de agua presurizada (PWR) como estabilizador de pH, para reducir la corrosión en el circuito primario. Como fluoruro, también se espera que tenga una demanda mucho mayor en reactores de sales fundidas (MSR). "
Comisión Nacional del Litio (Chile)	2014	"La CChEN vela por el interés nuclear del litio en una perspectiva de largo plazo, autorizando en forma restringida a cada productor la cantidad de litio equivalente a comercializar y controlando que los destinos no sea productores del isótopo ⁶ Li, de interés principal en la generación de tritio."
Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO)	2013	"Respecto al interés nuclear, el litio ha sido considerado como un material fundamental para el desarrollo de los reactores de fusión nuclear, cuyo futuro aun está incierto y en plena etapa de investigación y desarrollo. Todavía no hay certeza si realmente es una fuente viable de energía para el consumo masivo y para cuándo se podría esperar su uso comercial. Sin embargo, se estima que recién en la segunda mitad de este siglo se iniciaría la construcción de los primeros reactores comerciales lo que podría eventualmente causar una estrechez temporal de la oferta de litio."
González, A.	2000	"En el reactor de fusión, el núcleo de helio es confinado en el campo magnético mientras que el neutrón escapa del campo magnético y si el reactor tiene una envoltura de Li como moderador de neutrones, los neutrones que escapan penetran en esta envoltura. Mediante choques inelásticos de estos neutrones con el material (Li) de la envoltura, la energía de éstos se transforma en calor, el que se transfiere a un refrigerante para su conversión posterior en electricidad."
Lawrence Livermore National Laboratory	s/f	"Una planta de energía de fusión, por otro lado, generará energía al fusionar átomos de deuterio y tritio, dos isótopos de hidrógeno, el elemento más liviano. El deuterio se extrae del abundante agua de mar y el tritio se produce por la transmutación del litio, un elemento común en la corteza terrestre y los océanos."

Cabe destacar en la tabla número 10 que, si bien algunos de estos usos presentan una caída en cuanto a porcentajes dentro del total, eso no quiere decir necesariamente que se reduzca la cantidad de litio necesario para satisfacer dichos usos. Si se tiene en cuenta que la producción de litio va en alza a través de los años, puede inferirse que la cantidad de litio a utilizar sigue siendo la misma en cantidad, más el porcentaje disminuye debido a que gran parte, sino la totalidad del aumento de producción, está destinada a la industria de las baterías de litio, la que ha tenido un aumento considerable dentro de los últimos años.

2.3. Recursos y reservas mundiales de litio

El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (2017) ha estimado un total reservas de 14.469.000 toneladas de litio, dentro de un universo de recursos de 47.000.000 de toneladas. Chile ocupa el tercer lugar en cantidad de recursos de litio, con un total del 16%, ubicándose por detrás de Bolivia y Argentina que poseen un 19% del total del planeta. Sin embargo, al hablar de reservas de litio, Chile encabeza el ranking con un 52% de total, seguido de Argentina con un 14% y Australia con un 11% (COCHILCO, 2017).

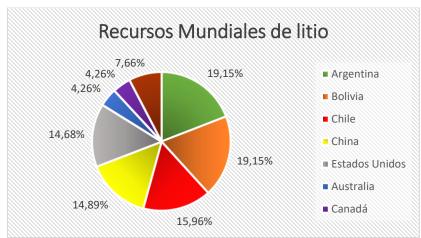
Tabla 12. Recursos mundiales de litio.

Puesto	País	Reservas (ton)	Porcentaje total	
1	Argentina	9,000,000	19.15%	
2	Bolivia	9,000,000	19.15%	
3	Chile	7,500,000	15.96%	
4	China	7,000,000	14.89%	
5	Estados Unidos	6,900,000	14.68%	
6	Australia	2,000,000	4.26%	
7	Canadá	2,000,000	4.26%	
8	Otros (*)	3,600,000	7.66%	
	TOTAL	47,000,000	100.00%	

^(*) Corresponde a la suma de los recursos del Congo, Rusia, Serbia, Brasil, México, Austria y Zimbabue.

Fuente: Confección propia según datos USGS (2017).

Figura 1.Distribución de los recursos mundiales de litio



Fuente: Elaboración propia según datos USGS (2017).

Tabla 13. Reservas mundiales de litio.

Puesto	País	Reservas (ton)	Pocentaje total
1	Chile	7,500,000	51.83%
2	China	3,200,000	22.12%
3	Argentina	2,000,000	13.82%
4	Australia	1,600,000	11.06%
5	Portugal	60,000	0.41%
6	Brasil	48,000	0.33%
7	Estados Unido:	38,000	0.26%
8	Zimbabue	23,000	0.16%
	TOTAL	14,469,000	100.00%

Fuente: Confección propia según datos USGS (2017).

Figura 2.Distribución de las reservas mundiales de litio



Fuente: Elaboración propia según datos USGS (2017).

Los recursos mineros según Codelco (2016) "son el resultado del proceso de exploración y son estimados usando modelos geo científicos. Cuando estos recursos geológicos presentan un interés económico con una perspectiva razonable de una eventual extracción, se denominan recursos minerales". Por otra parte, y según la misma fuente, las reservas mineras "representan el subconjunto del recurso mineral medido e indicado y que es extraíble de acuerdo a un plan minero sustentable técnica y económicamente, inserto en un escenario productivo".

De acuerdo a lo anterior mencionado y aplicándolo al escenario del litio, la diferencia entre recursos y reservas está marcada por diversos factores como el clima, la ubicación geográfica, la concentración de litio, la extensión del salar, entre otros. En la tabla 14 se describen las variables.

Tabla 14. Factores claves en la viabilidad de un salar.

Variable	Efecto
Concentración de litio	Decide sobre la cantidad de sales recuperables de litio.
Superficie del salar	La extensión de un salar determina la cantidad de salmueras disponibles.
Concentración de potasio	El potasio es un co-producto de la extracción de litio y aumenta el margen de ganancias, bajando los costos operacionales.
Relación entre magnesio y litio	Una mayor concentración de magnesio aumenta el consumo de cal para precipitar Mg y/o al requerirse una mayor superficie de evaporación solar para concentrar las sales de magnesio y separarlas por cristalización, encareciendo la recuperación de litio.
Clima	Se requiere un clima árido para el uso de la evaporación solar como método extractico; es decir, la tasa de precipitación debe ser muy inferior y la tasa de evaporación mayor.

Fuente: COCHILCO (2013).

En base a la tabla 15, se pueden comparar los distintos salares alrededor del mundo organizados de mayor a menor contenido de litio. Estos datos permiten entender el porqué del éxito en las operaciones de estos salares, o bien inferir parte de las razones por las que en algunos salares no se han podido desarrollar un proyecto de extracción de litio a partir de las salmueras allí presentes.

Tabla 15. Comparación de factores principales salares del mundo.

	Salar	País	Li (ppm)	K (ppm)	Mg/Li	Evaporación (mm/a)	Superficie (km2)	Altura (msnm)
1	Atacama	Chile	1.500	18.500	6,4	3.700	3.000	2.300
2	Pastos Grandes	Bolivia	1.033	7.766	2,2	1.500	100	4.200
3	La Isla	Chile	860	3.170	5,1	1.000	152	3.950
4	Maricunga	Chile	800	7.480	6,6	1.200	145	3.760
5	Salinas Grandes	Argentina	795	9.547	2,7	2.600	212	3.450
6	Olaroz	Argentina	690	5.730	2,4	2.600	120	3.900
7	Hombre Muerto	Argentina	690	6.100	1,4	2.775	600	4.300
8	Zhabuye	China	680	s/a	0,001	2.300	243	4.420
9	Sal de Vida	Argentina	660	7.370	2,2	s/a	s/a	4.025
10	Diablillos	Argentina	556	6.206	3,7	s/a	40	3.760
11	Pedernales	Chile	400	4.200	8,7	1.200	335	3.370
12	Diangxiongcuo	China	400	s/a	0,2	2.300	56	4.475
13	Caucharí	Argentina	380	3.700	2,8	2.600	350	3.950
14	Uyuni	Bolivia	350	7.200	19	1.500	12.000	3.650
15	Rincón	Argentina	330	6.200	8,5	2.600	260	3.700
16	Coipasa	Bolivia	319	10.600	45,7	1.500	2.218	3.650
17	Xitai	China	310	s/a	65	3.560	s/a	2.790
18	Dongtai	China	300	s/a	40-60	3.560	s/a	2.790
19	SilverPeak	EEUU	230	5.300	1,5	900	80	1.300

Nota: Sombreado celeste destaca los salares en Chile.

Fuente: COCHILCO (2013) en base a Garret (2004), Gruber, P.W.; Medina, P.A.; Keoleian, G.A.; Kesler, S.E.; Everson, M.P. y Wallington, T.J. (2011), Mohr, S.H.; Mudd, G.M. y Giurco, D. (2012), Riesacher, F.; Alonso, H. y Salazar, C. (1999), Roskill (2013), Yaksic&Tilton (2009) e información de empresas mineras.

Actualmente la producción de Chile se centra netamente en el Salar de Atacama el cual, de acuerdo a la tabla 15, presenta las mejores condiciones, tanto geológicas, como climática y geográficas para la extracción de salmuera y producción de sales. Sus 3000 kilómetros cuadrados de extensión lo hacen uno de los salares más grandes del mundo con contenido de litio. Además, se presenta una mayor concentración de litio y potasio en el sector, lo que permite la obtención de salmueras ricas en litio, además de la producción paralela de sales de potasio. También, la cantidad de magnesio en comparación a la de litio representa una relación abordable a la hora de obtener el producto de interés, sin encarecer excesivamente el proceso. Por otra parte, el clima presente en el salar; considerando la radiación solar, la humedad del aire, las corrientes de viento y la temperatura, propician una buena tasa de evaporación, la que, junto a la baja precipitación, de 27,8 mm. anual presente en la zona, hacen del lugar el

más favorables a nivel mundial para definir la ruta de obtención mediante evaporación solar. Finalmente, su ubicación geográfica termina por hacer del salar de Atacama el mejor lugar para la extracción de litio ya que se encuentra ubicado relativamente a baja altura y a sólo 270 km. del puerto de Antofagasta, haciéndolo de fácil acceso.

Las condiciones mencionadas anteriormente permiten que el costo de producción de carbonato de litio en el Salar de Atacama presente costos operacionales más bajos en comparación a otros salares del mundo, aumentando el margen de ganancias.

Cabe destacar a los demás salares presentes en Chile, los que, si bien no tienen las mismas características que el salar de Atacama, poseen condiciones que ameritan estudios más a fondo para evaluar la factibilidad de extracción de litio desde sus salmueras.

2.4. Extracción de litio

Actualmente el litio se puede extraer desde dos fuentes, las rocas pegmatíticas o las salmueras ricas en litio. Cada fuente del mineral es tratada de manera diferente para lograr una concentración que permita una correcta refinación y posterior extracción del producto de interés, de acuerdo al uso requerido.

2.4.1. Extracción de litio a partir de yacimientos pegmatíticos

La extracción de litio mineral se realiza mediante minería a rajo abierto y sus principales exponentes se encuentran en Estados Unidos, Australia y Canadá. El mineral contiene aproximadamente un 1,5% de óxido de litio (Li_20) y debe ser concentrado en plantas de flotación para luego ser enviado a la planta química.

2.4.1.1. Extracción de mineral de roca

Para describir el proceso de extracción del mineral, desde mina, hasta la planta de tratamiento químico, se describe el proceso utilizado por Lithium Corporation of America, ubicada en Cherryville, a veinte kilómetros de Gastonia, Carolina del Norte.

El proceso comienza con la perforación de la roca, para posteriormente hacer instalación de los explosivos que, con la energía que liberan al ser activados, generan bolones de roca que serán desprendidos del yacimiento. Luego de la tronadura primaria, una grúa deja caer una bola de acero desde la altura necesaria para reducir el tamaño de los bolones generados. Luego de cargar el material, éste es trasladado en camiones hasta el chancador primario, del tipo mandíbula, para reducir el tamaño del material hasta 6"-7" (15 a 18 cm de diámetro). Posteriormente, el material es enviado a un chancador secundario y finalmente al molino de bolas. El tamaño final del material particulado es del 95% bajo la malla 65 y de 5% sobre la malla 65.

El material bajo la malla 65 es enviado a las celdas de flotación para separar el espodumeno del cuarzo, feldespato y mica.

El concentrado de espodumeno es filtrado en un filtro de cinta horizontal y el producto con aproximadamente 6% de Li_2O es enviado a la planta química mediante camiones (González, A., 2000).

2.4.1.2. Planta Química

Para generar carbonato de litio a partir de yacimientos pegmatíticos, se debe transformar el producto del concentrado de litio, alfa espodumeno, a beta espodumeno que es más reactivo. Para ello, el alfa espodumeno se calienta a 1075-1100 °C en un horno rotatorio. Luego de someterlo a dichas temperaturas,

el mineral transformado a beta espodumeno se muele mediante molino de bolas y se enfría para las siguientes etapas.

El proceso se ha dividido en cinco etapas; preparación con ácido sulfúrico (H_2SO_4) , lixiviación, purificación, concentración y precipitación.

Los procesos químicamente son:

1.-Tratamiento con H₂SO₄: El beta espodumeno, después de la molienda, se transfiere a un horno (acid-roasting kiln) se agrega H₂SO₄ y se calienta a 250°C.

$$Li_2O_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 + H_2SO_4 \rightarrow Li_2SO_4 + H_2O + Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$$

- 2.-Lixiviación: La mezcla de mineral residual ${\rm Li_2SO_4}$ y exceso de ácido va a un estanque de lixiviación donde se agrega agua y carbonato de calcio para neutralizar el exceso de ácido. Se filtra en filtros rotatorios al vacío. En este proceso se recupera ${\rm Li_2SO_4}$ con 7 $^{gr}/_l$ de Li. En la parte sólida, queda: ${\rm CaSO_4}$; ${\rm Al_2O_3}$; ${\rm 4SiO_2}$; y ${\rm Mg(OH)_2}$.
- 3.-Purificacion y Concentración: La solución de ${\rm Li_2SO_4}$ se purifica por adición de ${\rm Ca(OH)_2}$ y ${\rm Na_2CO_3}$ y en estanques con agitación donde precipitan impurezas de Magnesio y Calcio como ${\rm Mg(OH)_2y~CaCO_3}$. Se filtra y la solución diluida de ${\rm Li_2SO_4}$ se concentra en evaporadores al vacío de múltiple efecto.
- 4.-Precipitacion del carbonato de litio: La solución concentrada de $\rm Li_2SO_4$ se trata en estanques a 80-90 °C con $\rm Na_2CO_3$.

$$Li_2SO_4 + Na_2CO_3 \rightarrow Li_2CO_3 + Na_2SO_4$$

El precipitado de Li_2CO_3 se separa por centrifugación y de las aguas madres se recupera el Na_2SO_4 . (González, A. ,2000, p. 188-189).

Al representar dicho proceso de manera gráfica, se obtiene lo siguiente:

Tratamiento con H_2SO_4 Lixiviación Mineral residual Concentrado de litio + Exceso de ácido Perforación $LiSO_4 + CaSO_4 + Al_2O_3$ 2.5% - 3.2% Li • Tronadura 250°C $+4SiO_2 + Mg(OH)_2$ • Carguío • Transporte Chancado Molienda CaSO₄ + Al₂O₃ + 4SiO₂ + Mg(OH)₂ H_2SO_4 Flotación diferencial $H_2O + CaCO_3$ **ESTANQUE DE** FILTRO ROTATORIO **HORNO** LIXIVIACIÓN AL VACÍO LiSO₄ Separación Purificación y Precipitación $LiSO_{4}[7 \text{ gr}/_{1}]$ $Na_2CO_3 + Ca(OH)_2$ Concentración LiSO₄ LiSO₄ $LiCO_3$ [mín. 99,1% Li] Na₄CO₃ $CaCO_3 + Mg(OH)_2$ CENTRÍFUGA EVAPORADOR AL VACÍO **ESTANQUE DE ESTANQUE** AGITACIÓN MATERIAL QUE PASA DE UNA ETAPA A **MATERIAL QUE SE AGREGA AL PROCESO**

Figura 3. Proceso de extracción de carbonato de litio de mineral de roca

Fuente: Elaboración propia según datos de González (2000).

2.4.2. Extracción a partir de salmueras de litio

Otra de las fuentes importantes de extracción de litio son las salmueras, las que tienen una especial importancia para Sudamérica ya que el conocido "triángulo del litio" está compuesto por zonas ricas en salmueras con altas concentraciones de este elemento. Este concepto de triángulo del litio, graficado en la figura 4, abarca parte de Argentina, Bolivia y Chile y contiene las reservas más grandes de litio a nivel mundial.

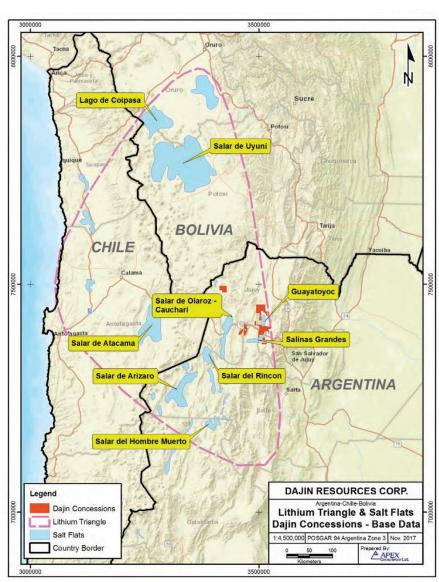


Figura 4. Triángulo del litio

Fuente: Resource World Magazine (2018).

2.4.2.1. Bombeo y evaporación

El proceso específico aplicado en Chile comienza con la extracción de la salmuera desde una profundidad aproximada de 30 metros hacia la superficie por medio de bombas. Las salmueras con aproximadamente 0,23% de litio son enviadas a pozos de evaporación solar, donde tras varias etapas, se llega a una concentración de aprox. 5,8% de litio. Esta operación demora aproximadamente un año (González, 2000).

La extracción de litio mediante evaporación solar tiene una operación bastante simple y de bajo costo, pero también, tiene muchos requerimientos técnicos y puede presentar muchos problemas.

Para una correcta operación necesita de grandes extensiones de terrenos planos para la construcción de las pozas, además de que existan las condiciones necesarias para evaporar el agua de las pozas. La tasa de evaporación está controlada por la radiación solar, la humedad del aire, el viento y la temperatura presente, por lo tanto, estas variables influyen en el tamaño de las pozas, en la concentración final de la salmuera, en el costo de las pozas y su operación y en el tratamiento de la salmuera final.

Para tener una mejor relación de costo-efectividad, las pozas deben ser divididas en segmentos para maximizar la tasa de evaporación (la tasa decrece a medida que aumenta la concentración en la salmuera), así que, de manera ideal, en cada poza se cristaliza una sal diferente que deben ser retiradas de manera periódica sin perturbar mayormente el sistema completo, es decir, sin afectar mayormente el proceso de precipitación. Otros aspectos importantes al diseñar las pozas de evaporación son considerar un flujo gravitacional de una poza a otra para optimizar el gasto energético; proteger los bordes de las pozas contra la erosión causada por las olas de la salmuera; y lo más importante, crear un sistema de evaporación solar libre de fugas.

Las pozas se construyen sobre el salar con una capa de grava fina y arcillas, para luego cubrirlas con una membrana impermeable de PVC de 0,5 mm. de espesor.

Luego, sobre todo esto, se instala una capa especial que protege de las maquinarias de laboreo y de la acción de los rayos ultravioleta (Garret, 2004).

Durante el proceso de evaporación, precipita en primera instancia Halita ($NaCl + CaSO_4 * 2H_2O$), posteriormente Silvinita (NaCl y KCl) que es enviada a la planta de cloruro de potasio (KCl), luego precipita Carnalita ($KCl * MgCl_2 * 6H_2O$) y finalmente Bischofita ($MgCl_2 * 6H_2O$). Además, puede precipitar Carnalita de Litio ($LiCl * MgCl_2 * 6H_2O$), la que es recuperada mediante un drenaje, repulpeo y posterior lavado con solución saturada de $MgCl_2$. (González, A., 2000).

2.4.2.2. Planta Química

El producto, proveniente de las pozas de evaporación con aproximadamente 5,8% de litio es enviado a la planta química "La Negra" en el caso de ALBEMARLE y a su instalación ubicada en el Salar del Carmen en caso de SQM, donde se elimina el Mg para obtener una salmuera con aproximadamente 6% de litio. Para llegar al producto final se adiciona Na_2CO_3 en caliente, produciendo la precipitación de Li_2CO_3 , que es filtrado y secado en hornos rotatorios para obtener Li_2CO_3 grado batería, con una pureza de 99,5% (Albemarle, 2014), siendo el mínimo exigido por el mercado de 99,1%. (Ministerio de Economía y Finanzas Públicas de Argentina, 2011).

Paralelamente, la industria del litio metálico requiere como materia prima Li_2CO_3 con bajo contenido de Boro. Es por esto que antes de enviarlo a la planta química, se aplica un proceso que rebaja el contenido de boro hasta 10 ppm. El proceso consiste en purificar la salmuera removiendo el boro para una posterior fabricación de ácido bórico.

Gráficamente, el proceso de evaporación se encuentra representado en la figura número 5.

EVAPORACIÓN H_2O 1 1 1 介 Alimentación Salmuera salmuera natural concentrada 0,2% Li **5,8**% Li Poza de Poza de Poza de Poza de Poza de evaporación evaporació<u>n</u> evaporación evaporación evaporación **PRECIPITACIÓN HALITA SILVINITA CARNALITA BISCHOFITA CARNALITA DE LITIO** $NaCl + CaSO_4 * 2H_2O$ NaCl y KCl $KCl * MgCl_2 * 6H_2O$ $MgCl_2*6H_2O$ $LiCl * MgCl_2 * 6H_2O$ Planta de KCl

Figura 5. Proceso de evaporación solar

Fuente: Elaboración propia según datos de González (2000) y Osses (2018).

CAPÍTULO 3: MERCADO MUNDIAL DEL LITIO

Este capítulo detalla los principales productores de carbonato de litio a nivel mundial, describe parte de la historia de las dos empresas que actualmente producen carbonato de litio en Chile, además de presentar las exportaciones de otros compuestos derivados del litio y los más importantes compradores. Por último, se presentan los ingresos que genera el litio a la economía nacional.

3.1. Producción mundial de litio

Actualmente la producción de litio a nivel mundial se basa en la extracción por las dos rutas anteriormente mencionadas. Argentina, Bolivia, Chile, China y Estados Unidos están realizando desarrollos para la extracción de litio desde salmueras, mientras que Australia, Austria, Canadá, China, España, Finlandia, Mali, Portugal y República Checa se encuentran elaborando técnicas de extracción rentable del mineral a partir del espodumeno (USGS, 2018).

El mercado mundial, tal como lo indica la tabla 16, está liderado principalmente por cuatro actores: Australia, Chile, Argentina y China.

Tabla 16. Producción mundial de litio (toneladas)

	2016	2017
AUSTRALIA	14000	18700
CHILE	14300	14100
ARGENTINA	5800	5500
CHINA	2300	3000
ZIMBABUE	1000	1000
PORTUGAL	400	400
BRASIL	200	200

NOTA: Representa la cantidad de litio presente en la producción de compuestos derivados del elemento.

Fuente: USGS (2018).

Como se aprecia, Australia aumenta su producción notablemente del año 2016 al 2017, pasando de ocupar el segundo lugar, a ser el líder de la producción mundial de litio. Por su parte, Chile, quien fuese el mayor productor mundial hasta el año 2016, presenta una leve baja, al igual que Argentina. Finalmente, China muestra un aumento importante en su producción, pero se mantiene alejado de los tres principales productores.

De esta manera, los datos anteriormente citados ayudan a representar la distribución mundial de la producción mundial de litio en el año 2017.



Figura 6. Distribución de la producción mundial de litio en 2017

(*) Dentro de los datos no se considera la producción de Estados Unidos, valor que puede influir en el porcentaje final de participación de los demás países.

Fuente: Elaboración propia según datos USGS (2018).

3.2. Producción de litio en Chile

A partir del año 1979, mediante el decreto de ley N° 2.886, se reserva el litio para el Estado de Chile con dos excepciones: no se extendía a pertenencias ya existentes y que contaran con un acta de mensura escrita; o que estuviesen en trámite para el año de publicación del decreto de ley. El año 1982 se publica la ley orgánica N° 18.097 sobre concesiones mineras, seguida de la ley N° 18.248, correspondiente al Código de Minería del año 1983, las cuales mantienen la reserva del litio a favor del Estado de Chile y se ratifica que el litio no es susceptible a concesión minera, a excepción de las que ya estuviesen constituidas con anterioridad a la fecha de publicación del decreto de ley N° 2.886.

Al momento de entrar en vigencia el decreto de ley N° 2.886 CORFO tiene constituidas un total de 59.820 pertenencias mineras en el Salar de Atacama.

3.2.1. Productores de litio en Chile

La producción de litio en Chile se realiza por dos empresas privadas: SQM y Albemarle, las que por medio de un contrato de arriendo y un contrato de proyecto con la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) pueden extraer litio del Salar de Atacama.

3.2.1.1. SQM

La Sociedad Química y Minera de Chile es creada en el año 1968 con la finalidad de reorganizar la industria del salitre, siendo en un 37,5% propiedad de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) y teniendo como objetivo la reapertura de yacimiento de salitre y yodo. En 1971 el Estado de Chile, por medio de CORFO, adquiere el 100% de la Sociedad Química y Minera de Chile, nacionalizando la producción del salitre. En 1983 comienza el inicio de la

privatización de la empresa, proceso que concluye en el año 1988. En el año 1986 la empresa comienza a producir Nitrato de Potasio con un proceso diseñado por ellos mismos. El año 1983 comienza el contrato de arriendo de SQM con CORFO, entregándole la autorización de explotación del Salar de Atacama y dando paso al proyecto de producción de litio y potasio. El mismo año, SQM hace ingreso al mercado internacional. En 1985 comienza la producción de cloruro de potasio en el Salar de Atacama, luego de obtener la primera aprobación ambiental. En 1997 Comienza la producción de carbonato de litio en el Salar del Carmen y de yodo en la planta de Nueva Victoria. En 1998 se pone en funcionamiento las plantas de sulfato de potasio y ácido bórico. El año 2000 se amplía la producción de cloruro de potasio en el Salar de Atacama y se construye una nueva planta de nitrato de potasio, ubicada en Coya Sur. El año 2005 inicia la producción de hidróxido de litio en el Salar del Carmen. En 2008 se amplía la capacidad de producción de carbonato de litio de 32.000 a 40.000 toneladas anuales, extrayendo 1700 litros por segundo de salmuera. El año 2011 comienza la producción de una nueva planta de nitrato de potasio, ubicada en Coya Sur. En 2016 SQM se expande a Argentina asociándose con la empresa canadiense LAC para desarrollar un proyecto de extracción de litio del Salar de Caucharí. En 2017 y con la asociación con Kidman Resources, SQM adquiere derechos en el proyecto de litio Mt. Holland, en Western, Australia. El 2018 se modifica el contrato de arrendamiento y el contrato de proyecto de SQM con CORFO, otorgándole el permiso a SQM para aumento de la cuota de producción y comercialización de productos de litio y derivados hasta los 2,2 millones de ton. de LCE (carbonato de litio equivalente) al año 2030 (SQM, 2018).

Figura 7. Logo SQM



Fuente: Página web SQM.

3.2.1.2. ALBEMARLE

Los orígenes de las dependencias de la firma estadounidense en Chile, datan del año 1975 cuando la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) realiza un convenio con Foote Minerals para estudiar la factibilidad de extraer litio del Salar de Atacama. Posteriormente, en el año 1980, se firma un convenio básico para desarrollar un proyecto de litio en el Salar de Atacama y se crea la Sociedad Chilena de Litio, teniendo un 45% de participación de CORFO y un 55% de Foote Minerals. En 1981 se construye la planta en el Salar de Atacama para en 1984 comenzar con las operaciones comerciales y la producción de carbonato de litio. En el año 1987, CORFO vende su 45% a Foote Minerals, privatizando en un 100% a la Sociedad Chilena de Litio. El año 1988 comienza la producción de cloruro de potasio. En 1997 comienza el funcionamiento de la planta de cloruro de litio. El año 1998 hace ingreso a la sociedad de Foote Minerals la compañía alemana Chemetall, que en el año 2004 es comprada por Rockwood Holding Inc. El año 2012 la razón social de la Sociedad Chilena de Litio cambia a Rockwood Litio Limitada. El año 2015 Albemarle Corporation compra Rockwood Holding Inc. con miras a crear una reconocida compañía de productos químicos especializados, con posiciones líderes en cuatro importantes negocios: litio, catalizadores, bromo y tratamiento de superficies. En el año 2016 logra expandir su cuota de extracción de salmuera a 442 litros por segundo (Comisión especial investigadora de la cámara de diputados, 2016). En 2017 consigue elevar su cuota en el Salar de Atacama hasta 82.000 toneladas anuales de carbonato de litio equivalente. A principios del 2018, la cuota de producción de litio de salmuera se aumenta a 144.000 toneladas anuales de carbonato de litio equivalente (Albemarle, 2018).

Figura 8. Logo ALBEMARLE



Fuente: Página web ARBEMARLE.

3.2.2. Productos de litio en Chile

Chile tiene cuatro productos comerciales en base a litio: el carbonato de litio, el cloruro de litio, el hidróxido de litio y las salmueras de litio. En la figura 9 se aprecia el comportamiento de la producción de litio en Chile, donde las disminuciones pueden deberse a las crisis económicas del año 2009 como la ocurrida en Europa durante el 2013-2014. Como observación interesante, se aprecia que la producción de litio, si bien tiene altos y bajos, siempre tiende al aumento.

Producción de litio en Chile 2006-2016 78.182 80.000 71.594 69.597 70.000 62.253 59.637 56 881 56 375 Foneladas productos de litio 60.000 52.851 50.000 40.000 30 538 30.000 20.000 10.000 2012 2013 2014 2015 2016 2006 2007 2008 2009 2010 2011

Figura 9. Producción total de productos de litio 2006-2016 (ton)

Fuente: Elaboración propia según datos COCHILCO (2017).

En la siguiente gráfica se detalla la producción de Chile según el tipo de compuesto entre el año 2009 y el año 2016:



Figura 10. Producción chilena por compuesto 2012-2016

Fuente: Elaboración propia según datos COCHILCO (2017).

Claramente gran parte de la producción chilena de litio de los últimos años corresponde a carbonato de litio, de hecho, es el único compuesto donde las exportaciones durante los años poseen una conducta claramente similar al de la producción total, por ende, es quien marca la tendencia del comportamiento. No obstante, si bien la producción se ha visto variable dentro de los años, el carbonato de litio tiene una clara tendencia al aumento dentro de las producciones globales del país, tal como muestra la tabla 17.

Tabla 17. Porcentaje de carbonato de litio dentro de la producción global de Chile.

AÑO	PRODUCTOS DE LITIO (TONS.)	CARBONATO DE LITIO (TONS.)	% DE CARBONATO DE LITIO EN EL TOTAL
2009	30.538	25.154	82.4%
2010	52.851	44.025	83.3%
2011	69.597	59.933	86.1%
2012	71.594	62.002	86.6%
2013	60.646	52.358	86.3%
2014	62.253	55.074	88.5%
2015	56.375	50.418	89.4%
2016	78.182	70.831	90.6%

Fuente: Elaboración propia según datos COCHILCO (2017).

3.3. Principales compradores del litio chileno

De acuerdo a los datos de la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), históricamente los países que se destacan en la adquisición de carbonato de litio (principal producto de exportación de Chile en base a litio) son: Corea del Sur, Japón, China, Bélgica, Estados Unidos y Alemania. Por otra parte, los principales compradores de salmuera de litio en el año 2016 son China, Argentina y Perú. En el caso del hidróxido de litio, destaca la participación de Estados Unidos, Corea del Sur, Bélgica y Canadá, mientras que, en el año 2016, el único comprador del cloruro de litio chileno fue Alemania.

El año 2016 se exporta un total de 65.163 toneladas de carbonato de litio, 33.299 de salmueras de litio, 5.598 de hidróxido de litio y 1.577 toneladas de cloruro de litio (COCHILCO, 2017). El detalle se presenta en las figuras 11, 13 y 14.

Exportaciones (miles de toneladas) carbonato de litio según país de destino (2016)

3,4
3,9
5%
17,5
27%
10,2
16%
13,6
21%

**COREA DEL SUR ** JAPÓN ** CHINA ** BÉLGICA ** ESTADOS UNIDOS ** ALEMANIA ** Otros

Figura 11. Exportaciones de carbonato de litio chileno según país de destino (2016)

Fuente: Elaboración propia según datos COCHILCO (2017).

Como muestra la gráfica anterior, el carbonato de litio producido en Chile se va principalmente a países del continente asiático, los cuales de acuerdo a la figura 12, tienen una clara tendencia al aumento en la inversión para adquirir el mineral de litio producido en Chile.

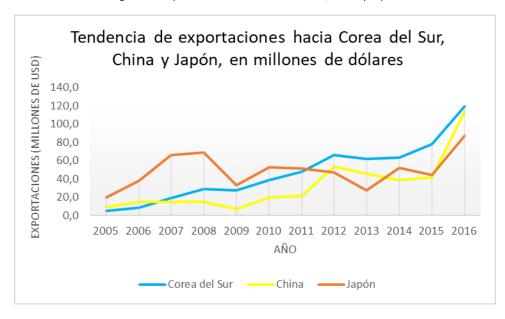


Figura 12. Exportaciones hacia Corea del Sur, China y Japón

Fuente: Elaboración propia según datos COCHILCO (2017).

Exportaciones (ton) de salmuera de litio según país de destino (2016).

5,208
0%
2,862
8%
25,230
76%
CHINA ARGENTINA PERÚ OTROS

Figura 13. Exportaciones de salmuera de litio según país de destino (2016)

Fuente: Elaboración propia según datos COCHILCO (2017).

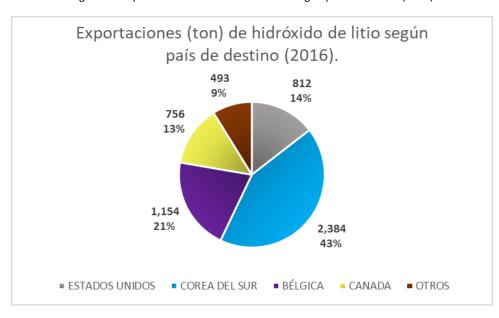


Figura 14. Exportaciones de hidróxido de litio según país de destino (2016)

Fuente: Elaboración propia según datos COCHILCO (2017).

Finalmente, en el caso de cloruro de litio, Alemania fue el único comprador en el año 2016 con un total de 1.577 toneladas (COCHILCO, 2017).

3.3.1. Ingresos por exportaciones de productos de litio

En cuanto a la distribución de exportaciones por monto total, en la figura 15 se presenta la evolución del total de las ventas de productos de litio desde el año 2006 hasta el año 2016.

Montos exportados por productos de litio en milloness de USD (2006-2016) 700,0 589,5 600,0 MILLONES DE USD 500,0 400,0 305,6 283,5 293,2 302,8 300,0 216,0 200,0 100,0 2008 2011 2007 2009 2010 2012 AÑO

Figura 15. Montos exportados por productos de litio (2016)

Fuente: Elaboración propia según datos COCHILCO (2017).

La figura 14 muestra una clara tendencia al alza en cuanto a los ingresos que el litio y sus derivados generan a Chile. Si bien esto es consecuencia del aumento de las exportaciones de productos de litio, también tiene directa relación con el aumento en el precio del elemento y sus minerales asociados, tal como expone la figura 16.



Figura 16. Exportaciones en miles de USD según productos de litio (2012-2016)

Fuente: Elaboración propia según datos COCHILCO (2017).

La tabla 18 muestra la evolución de las exportaciones totales de carbonato de litio entre los años 2005 y 2016, además de los miles de dólares exportados en cada año por la venta del producto. Con esos datos, se hace la relación matemática para obtener el promedio de valores FOB (hasta puerto chileno) a través de los años 2005 al 2016.

Tabla 18. Evolución valor FOB carbonato de litio (2005-2016).

AÑO	EXPORTACIONES (TON)	EXPORTACIONES (MILES DE USD)	VALOR FOB (USD/TON)
2005	41831.54	90371.2	2160.4
2006	38680.50	120975.8	3127.6
2007	41125.26	187399.5	4556.8
2008	42585.72	223364.1	5245.0
2009	22443.20	114801.5	5115.2
2010	40895.76	174315.5	4262.4
2011	48247.84	204160.6	4231.5
2012	55899.29	247019.6	4419.0
2013	47593.94	225917.1	4746.8
2014	49467.30	228634.1	4621.9
2015	49611.18	245128.8	4941.0
2016	65163.17	457223.9	7016.6

Fuente: Elaboración propia según datos COCHILCO (2017).

Al graficar las exportaciones, en conjunto con el valor FOB del carbonato de litio (figura 17), se visualiza cómo las exportaciones chilenas no dependen del valor FOB del carbonato de litio. Además, se observa cómo el carbonato de litio tiene una tendencia a aumentar su valor a través del tiempo, especialmente durante los últimos 3 años.

Vale destacar el gran aumento de valor que ha tenido el producto, ya que, de acuerdo a la tabla 18 el valor FOB del carbonato de litio ha aumentado en más de 3 veces en sólo 11 años y, además, el año 2016 ha aumentado en un 42% en relación al valor que tenía en el año 2015.

Exportaciones chilenas de carbonato de litio equivalente - USD/ton (2005-2016)**DÓLARES POR TONELADA TONELADAS EXPORTADAS** 70000 8000 60000 6000 50000 40000 4000 30000 20000 2000 10000 0 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 AÑO Exportaciones Valor FOB

Figura 17. Exportaciones de carbonato de litio v/s valor FOB

Fuente: Elaboración propia según datos COCHILCO (2017).

De igual manera y de acuerdo a los datos presentados por COCHILCO (2017), la distribución por monto total de exportación de carbonato de litio según país de destino se encuentra en la figura 18.

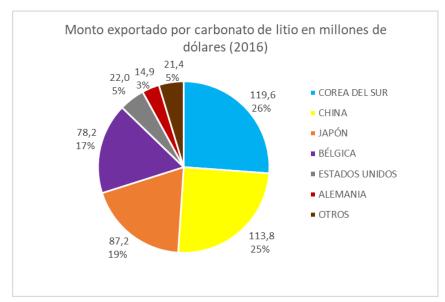


Figura 18. Distribución por monto total de carbonato de litio exportado según país de destino (2016)

Elaboración propia según datos COCHILCO (2017).

Mediante los datos de toneladas de carbonato de litio exportadas en el año 2016 y montos exportados en miles de dólares en el año 2016 correspondientes a dicho producto, se puede realizar una estimación del precio de venta de tonelada de carbonato de litio a los más importantes compradores:

Tabla 19. Estimación precio de venta por tonelada exportada de carbonato de litio a cada país en 2016.

	TONELADAS DE CARBONATO DE LITIO	MILLONES DE USD	PRECIO FOB CARBONATO DE LITIO (USD/TON)
COREA DEL SUR	17.476,2	119,6	6844,3
CHINA	13.610,4	113,8	8359,2
JAPÓN	13.303,4	87,2	6552,5
BÉLGICA	10.192,4	78,2	7676,5
ESTADOS UNIDOS	3.916,3	22,0	5629,1
ALEMANIA	3.381,5	14,9	4421,0

Fuente: Elaboración propia según datos COCHILCO (2017).

Al analizar la tabla 19, llama la atención la relación entre la cantidad de carbonato de litio exportado y los miles de dólares obtenidos de dicho intercambio comercial, ya que los países que más compran el carbonato de litio chileno, no son precisamente quiénes pagan un menor precio unitario por él. China, que es el segundo comprador de carbonato de litio, el año 2016 pagó un 89% más que Alemania, que sólo adquiere alrededor de una cuarta parte de lo que adquiere el país asiático.

El aumento en la producción de litio por parte de Chile, sumado al alza en el precio del elemento y sus minerales asociados, en conjunto con la creciente demanda, ha llevado a este mineral a ser cada vez más protagonista dentro de la economía nacional, llegando a representar el 1,2% de los ingresos del país en el año 2017, superando a las exportaciones de productos no mineros como las paltas y siguiendo de cerca al total producido por las exportaciones de carne, tal como muestra la figura 19.

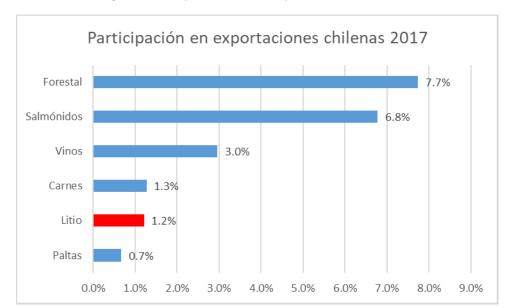


Figura 19. Participación del litio en exportaciones de Chile 2017

Fuente: Elaboración propia según datos del Anuario de las Exportaciones chilenas 2018 – DIRECON (2018).

CAPÍTULO 4: MODELO Y ESTIMACIÓN

Este capítulo describe el modelo a utilizar, junto con el soporte teórico entregado por publicaciones de autores especializados en la materia. Posteriormente se genera la ecuación matemática para modelar las exportaciones de carbonato de litio, se dan las razones para incluir cada una de las variables, se documentan los resultados obtenidos y se presentan conclusiones a partir de la interpretación de éstos.

4.1. Especificaciones del modelo gravitacional

En esta investigación se utiliza un modelo gravitacional ampliado, mediante datos de panel estáticos con efectos fijos, aleatorios y dinámicos (Arellano-Bond y Arellano-Blundell), a fin de analizar las variables que afectan en la exportación de carbonato de litio entre los años 2005 y 2016. Este modelo hace alusión al modelo de gravitación universal de Isaac Newton que relaciona la atracción entre dos cuerpos en función de sus masas y de la distancia que los separa, donde la atracción es proporcional a las masas de los cuerpos e inversamente proporcional a la distancia que los separa. En su versión económica, las masas son reemplazadas por el tamaño de la economía de cada país, o el producto interno bruto (PIB), mientras que la distancia de separación es un estimativo de los costos de transporte. El carácter de "ampliado" está dado debido a que además del PIB y la distancia, se agregan más variables que pueden influir a la hora de exportar carbonato de litio.

Los primeros autores que utilizan el modelo gravitacional para analizar el comercio internacional fueron Tinbergen (1962), Pöyhönen (1963) y Linnemann (1966). En los estudios de Anderson (1979), Bergstrand (1985) y Helpman y Krugman (1985), se derivan ecuaciones gravitacionales de modelos de comercio internacional fundados en la diferenciación del producto y en el rendimiento a escala creciente, y se brindó un sustento teórico riguroso. Mátyás (1997), Cheng

y Wall (1999), Bayoumi y Eichengreen (1998), Breuss y Egger (1999), y Egger (2000) proporcionan especificaciones econométricas. En las últimas décadas, el modelo gravitacional es uno de los modelos que más se ha utilizado para analizar los flujos del comercio internacional, la migración o la inversión extranjera, debido a sus propiedades, a su soporte teórico y empírico, y a su flexibilidad y adaptación a diferentes realidades regionales o a la de un país en particular.

En la tabla 20 se aprecian algunos autores, de distintas regiones del mundo, que han basado sus trabajos en este modelo.

Tabla 20. Autores con trabajos basados en el modelo gravitacional.

REGIÓN	AUTOR(ES)	AÑO
ÁFRICA	Angulo, Atwi, Ben Youssef, Dhehibi, Gil, Mtimet, Sai	2011
	Jordaan, Hinaunye	2011
	El-Sayed	2012
ASIA	Diallo, Yinzhonghua, Morris, Kolin	2017
	Johnston, Morgan, Wang	2015
	Tay	2014
EUROPA	Lombardi, Dal Bianco, Freda, Caracciolo, Cembalo	2016
	Serrano y Pinilla	2010
	Carrère	2004
NORTEAMÉRICA	Tansey y Touray	2016
	Kepaptsoglou, Karlaftis, Tsamboulas	2010
	Stay, Kulkarni	2015
SUDAMÉRICA	Fuenzalida-O'Shee, Valenzuela-Klagges, Corvalán-	2018
	Quiroz	
	Ulloa	2017
	Rodríguez y Dávalos	2017

Fuente: Elaboración propia según fuentes bibliográficas.

La forma más simple de una ecuación basada en el modelo gravitacional, que busca determinar el intercambio comercial (E) entre dos países (i, j), está dada por la ecuación 1:

$$E_{ij} = \alpha_0 Y_i^{\alpha_1} Y_j^{\alpha_2} D_{ij}^{\alpha_3} \tag{1}$$

donde Y_i representa el PIB del país exportador, Y_j representa el PIB del importador y D_{ij} es la distancia entre ambos países. De acuerdo a la teoría, el PIB es directamente proporcional al intercambio comercial entre países, mientras que, respecto a la distancia, es inversamente proporcional. Los índices α_0 , α_1 , α_2 y α_3 son parámetros a definir.

Sin embargo, la analogía no permite asegurar que la ecuación 1 se adapte completamente a un conjunto arbitrario de observaciones. Para modelar la desviación de la teoría, y utilizando estudios empíricos, se crea una versión estocástica de la ecuación, dando paso a la ecuación 2.

$$E_{ij} = \alpha_0 Y_i^{\alpha_1} Y_j^{\alpha_2} D_{ij}^{\alpha_3} \eta_{ij} \tag{2}$$

donde η_{ij} representa el factor de error.

Con la finalidad de eliminar la heterocedasticidad (término definido en la página 57 de este trabajo) presente en la muestra y de acuerdo a literatura econométrica, se procede a linealizar la ecuación 2 y estimar los parámetros de interés por mínimos cuadrados, obteniendo la ecuación 3:

$$E_{ij} = \ln \alpha_0 + \alpha_1 \ln Y_i + \alpha_2 \ln Y_j + \alpha_3 \ln D_{ij} + \ln \eta_{ij}$$
 (3)

Un problema a la hora de realizar la analogía de la ley de gravedad newtoniana con el comercio bilateral es que la fuerza gravitatoria puede ser muy pequeña, pero nunca cero, mientras que, en el comercio bilateral, el intercambio puede ser literalmente igual a cero. Además, se debe tener en cuenta que muchos de los pares de países con entradas de datos cero, es debido a que sus niveles de comercio son demasiado pequeños para documentarlos.

Para una correcta estimación con países que registren exportaciones igual a cero, se proponen cuatro posibles medidas (Frankel, J., 1997):

La primera es simplemente omitir las observaciones cero. Esta estrategia es una de las más usadas. Sin embargo, surge un problema inevitable al seleccionar la muestra ya que, dejando fuera a los países con intercambio más pequeño, el resultado puede presentar un sesgo importante.

La segunda medida consiste en reemplazar dichos ceros por unidades arbitrarias mínimas, por ejemplo "1". Esta estrategia permite que los softwares realicen la regresión por mínimos cuadrados lineales (OLS. Esta estrategia es aplicable sólo con este fin, aunque no está exenta de errores ya que la regresión OLS otorga mayor peso a los valores extremos, sean grandes o pequeños. Esto se relaciona directamente con un problema de heterocedasticidad.

La tercera estrategia es ocupar el estimador de Tobit, el que estudia cada parámetro de manera individual para determinar si este es distinto de cero y luego averiguar cuáles son los coeficientes que condicionan que esta observación sea o no cero.

La cuarta estrategia expresar la variable dependiente es como $(intercambio_comercial_{ij} + 1)$. De esta manera, si el intercambio es grande, la dependiente es aproximadamente la variable igual а habitual. $ln(intercambio_comercial_{ij} + 1)$, de modo que los coeficientes pueden interpretarse como elasticidad de manera habitual. Por otra parte, si la variable dependiente es pequeña, su variación es mínima. No obstante, esta solución puede llevar a complicaciones econométricas vulgares.

Se debe considerar que todos estos procedimientos pueden conducir a estimadores inconsistentes. El impacto de estas inconsistencias depende de las características de cada muestra y del modelo a utilizar, pero no existe razón para creer que serán insignificantes (Santos y Tenreyro, 2006).

A continuación, en la tabla 21, se presentan autores que aplican las estrategias mencionadas anteriormente en sus investigaciones:

Tabla 21. Bibliografía estrategias para abordar observaciones cero.

Estrategia	Autor/es	Años
Omitir observaciones cero.	Brada, Mendez	1985
	Bikker	1987
Reemplazar observaciones cero por unidades	Linnemann	1966
arbitrarias mínimas.	Wang, Winter	1992
Estimador de Tobit.	Biessen	1991
	Havrylyshyn, Pritchett	1991
(Intercambio_comercia + 1)	Eichengreen, Irwin	1995
	Eichengreen, Irwin	1996

Fuente: Elaboración propia según fuentes bibliográficas

4.2. Metodología

Este trabajo incluye a los 14 países más importantes en la exportación del carbonato de litio chileno, éstos países son: China, Corea del Sur, India, Japón, Tailandia y Taiwán (para este trabajo se ha estudiado de manera separada a China debido a su compleja relación política), correspondiente a Asia; Alemania, Bélgica, España e Italia de Europa; Canadá y Estados Unidos de América del Norte; México de Centroamérica; Argentina de América del Sur. Para seleccionar estos países se consideran los que dentro del periodo de estudio no tengan más de cinco observaciones 0 en cuanto a importación de carbonato de litio por parte de Chile. Las exportaciones hacia estos países representan el 99% de las exportaciones de carbonato de litio dentro del periodo de estudio (2005-2016).

El estudio se basa en el modelo gravitacional ampliado con datos de panel bajo efectos fijos, aleatorios y dinámicos con el fin de identificar las variables influyentes en la exportación de carbonato de litio entre los años 2005 y 2016.

En este trabajo, el modelo lineal gravitacional ampliado está dado por la siguiente ecuación expresada en logaritmos naturales:

$$ln(E_{ijt}) = \beta_0 + \alpha_1 ln \, \gamma_{it} + \alpha_2 ln \, \gamma_{jt} + \delta_1 ln \, \varepsilon_{ij} + \eta_1 ln \, \theta_{jt} + \lambda_1 ln \, \mu_{it}$$

$$+ \lambda_2 ln \, \mu_{jt} + \rho_1 ln \, \tau_{it} + \rho_2 ln \, \tau_{jt} + \sigma_1 ln \phi_{it} + \sigma_2 ln \phi_{jt}$$

$$+ \zeta_1 \ln \nu_{it} + \zeta_2 \ln \nu_{jt} + \vartheta ln \varepsilon_{it} + \sum_k \phi_k P_{ij} + \omega_{ijt}$$

$$(4)$$

Donde:

 β_0 es la constante a definir, la que tiene impacto en el modelamiento de todos los años en estudio;

i, j y t representan el país exportador, el país importador y el año, respectivamente;

 E_{ij} representa el flujo de exportación del país i al país j;

 $\gamma_{i,j}$ es el producto interno bruto del país i y j, respectivamente. Dato obtenido del banco mundial;

 ε_{ij} es la distancia total entre el país i y el país j en kilómetros. Datos obtenidos de Sea Rates y Google Maps;

 θ_j representa el precio de venta al país j. Cifras calculadas con datos de COCHILCO;

 $\mu_{i,j}$ es el precio por exportar (*i*) / importar (*j*) un contenedor de 20 pies en dólares estadounidenses. Dato obtenido del banco mundial;

 $\tau_{i,j}$ representa la relación entre el factor de conversión de la paridad del poder adquisitivo del país i, j, y el tipo de cambio de mercado. Dato obtenido del banco mundial;

 $\varphi_{i,j}$ es el índice de percepción de la corrupción del país i, j. Datos proporcionados por Transparency International;

 $v_{i,j}$ representa el índice de democracia del país exportador e importador, respectivamente. Datos obtenidos de The Economist;

 ϵ_{it} representa las exportaciones de productos de alta tecnología del país exportador, Chile, en el año t. Datos proporcionados por el banco mundial;

 ω_{ijt} representa el error de estimación, en otras palabras, la diferencia entre las exportaciones modeladas y las reales.

Además, la ecuación (4) incluye variables ficticias representadas por $(\sum_k \phi_h P_{ij})$, las que toman un valor de 1 en caso de que apliquen para dicho parámetro y 0 en caso de que no lo hagan. Estas variables son las siguientes:

idioma : Idioma en común entre los países i, j;

UE : Países que conforman la unión europea. Los presentes en este

trabajo son: Alemania, Bélgica, España e Italia.

nafta : Países pertenecientes al tratado de libre comercio de América

del Norte: EE.UU., Canadá y México.

argentina: Intercambio comercial entre Argentina y Chile.

free_com : Países con los que Chile tiene tratados de libre comercio y que

no pertenecen a ninguna de las categorías anteriores: China,

Corea del Sur y Tailandia.

t1 : Variable temporal que representa los años 2005-2006.

t2 : Variable temporal que representa los años 2007-2008.

t3 : Variable temporal que representa el año 2009 (crisis

económica).

t4 : Variable temporal que representa el año 2010.

t5 : Variable temporal que representa los años 2011-2012.

t6 : Variable temporal que representa los años 2013-2014.

t7 : Variable temporal que representa los años 2015-2016.

La distancia considerada para los modelos corresponde a la suma de 0,94 km. correspondientes a la distancia entre la plaza de Antofagasta y el puerto de la misma ciudad, más la distancia marítima entre países y la distancia entre el puerto de destino y la capital del país de destino. El detalle se presenta a continuación, en la tabla 22.

El precio de venta de carbonato de litio a cada país de destino varía de acuerdo a los años de estudio. Los datos utilizados se han obtenido al dividir los montos

de carbonato de litio exportados en dólares según cada país, por la cantidad de carbonato de litio exportado en toneladas, de esa manera, se obtiene el valor cobrado por cada tonelada de carbonato de litio según el país comprador y el año de estudio.

Tabla 22. Detalle distancia entre puertos.

País de destino	Distancia a puerto de Antofagasta	Distancia entre puertos (km.)	Distancia puerto de destino a capital (km.)	Distancia total (km.)	Nombre Puerto de destino
Corea del Sur	0.94	18140.53	169.03	18310.5	Kwangyang
Japón	0.94	17018.54	174.69	17194.17	Shimizu
China	0.94	19182.1	1713.87	20896.91	Xingang
Bélgica	0.94	13065.7	87.2	13153.84	Antwerpen
Estados Unidos	0.94	7042.2	934.15	7977.29	Houston
Alemania	0.94	13507.05	324.24	13832.23	Bremen
España	0.94	12932.97	376.53	13310.44	Valencia
Italia	0.94	14043.21	213.25	14257.4	Napoli
México	0.94	7005.61	785.49	7792.04	Altamira
Taiwán	0.94	19077.82	124.36	19203.12	Taichung
India	0.94	19040.66	809.25	19850.85	Nhava Sheva
Canadá	0.94	13538.91	900.52	14440.37	Winnipeg
Tailandia	0.94	20695.55	288.97	20985.46	Bangkok
Argentina	0.94	5738.81	590.65	6330.4	Puerto Madryn

Fuente: Elaboración propia según datos Google Maps y SeaRates (2018).

El precio por importar/exportar contenedor, corresponde al valor que debe pagar cada país para hacer ingreso o autorizar la salida de un contenedor de 20 pies del territorio nacional. Es por esto que los valores de exportar contenedor son los mismos para todos los países en un mismo año, ya que el exportador en este caso es el mismo país, Chile. En el caso del precio de importar contenedor, el precio varía según cada país y según cada año de importación.

El factor de conversión de la paridad de poder adquisitivo de un país y el tipo de cambio de mercado se ha agregado debido a que representa la cantidad de unidades de una moneda nacional que se requieren para adquirir la misma cantidad de bienes y servicios en el mercado nacional que se podrían adquirir

con dólares de los Estados Unidos en ese país (COCHILCO, 2017). Por ende, iguala las economías de los pares de países en estudio a una misma unidad.

El índice de percepción de la corrupción mide, en una escala de 0 (muy corrupto) a 100 (ausencia de corrupción), el grado de percepción de la corrupción presente en el sector público (Transparency International, 2018). Esta variable se incluye en el estudio con la finalidad de averiguar si la corrupción en el país exportador, en el país importador o en ambos, influye de alguna manera en el intercambio comercial de carbonato de litio.

Otro parámetro dentro de la ecuación es el índice de democracia. Este indicador mide la calidad democrática de cada país en una escala del 0 al 10, siendo los valores más altos los que poseen mejor democracia. El valor final se obtiene del promedio de cinco categorías: proceso electoral y pluralismo; participación política; cultura política; libertades civiles y derecho humanos básicos; calidad del funcionamiento del gobierno (Business Insider, 2018).

La exportación de productos de alta tecnología se refiere a la exportación de productos realizados con altos estándares de investigación y desarrollo, tales como productos de la industria aéreo espacial, informática, farmacéutica, de instrumentos científicos y maquinaria eléctrica. Esta variable ha sido estudiada sólo en el caso del país exportador, Chile, ya que la inexistencia del dato para la República de China, Taiwán, no permite aplicarla para los países importadores.

La ecuación (4) se adapta para hacer la estimación con datos de panel de efectos fijos y con ello se obtiene la ecuación (5), en la que se excluyen todas las variables fijas que se mantienen a través del período en estudio. Esta estimación permite observar intersecciones de todos los pares de socios comerciales, descartando una constante en común:

$$ln(E_{ijt}) = \beta_{ijt} + \alpha_1 ln \, \gamma_{it} + \alpha_2 ln \, \gamma_{jt} + \eta_1 ln \, \theta_{jt} + \lambda_1 ln \, \mu_{it} + \lambda_2 ln \, \mu_{jt}$$

$$+ \rho_1 ln \, \tau_{it} + \rho_2 ln \, \tau_{jt} + \sigma_1 ln \phi_{it} + \sigma_2 ln \phi_{jt} + \zeta_1 \ln \nu_{it}$$

$$+ \zeta_2 \ln \nu_{it} + \vartheta ln \epsilon_{it} + \omega_{ijt}$$
(5)

De acuerdo a lo expuesto por Arrellano y Bover (1990), además de la característica de la economía chilena de verse afectada por el comportamiento exportador del año anterior según lo descrito por Darcy Fuenzalida, Bárbara Valenzuela y Alejandro Corvalán (2018), se recomienda la utilización de datos de panel con efectos dinámicos. Para ello, se adapta la ecuación 4 con la finalidad de obtener una ecuación que permita realizar una estimación con datos de panel dinámicos, expresada en la ecuación 6.

$$ln(E_{ijt}) = \beta_0 + \beta_1 ln (E_{ijt-1}) + \beta_1 ln (E_{ijt-2}) + \alpha_1 ln \gamma_{it} + \alpha_2 ln \gamma_{jt} +$$

$$\delta_1 ln \varepsilon_{ij} + \eta_1 ln \theta_{jt} + \lambda_1 ln \mu_{it} + \lambda_2 ln \mu_{jt} + \rho_1 ln \tau_{it} + \rho_2 ln \tau_{jt} +$$

$$\delta_1 ln \varphi_{it} + \sigma_2 ln \varphi_{jt} + \zeta_1 ln \nu_{it} + \zeta_2 ln \nu_{jt} + \vartheta ln \varepsilon_{it} + \sum_k \phi_k P_{ij} + \omega_{ijt}$$
(6)

Donde (E_{ijt-1}) es el primer retardo de la variable dependiente y (E_{ijt-2}) es el segundo retardo de la misma. Esta ecuación se estima mediante las técnicas Arellano-Bond y Arellano-Blundell.

4.3. Resultados de modelamiento

En este apartado se analizan los resultados del modelo descrito con anterioridad, sin embargo y como lo indica la econometría, se verifica la multicolinealidad y heterocedasticidad.

4.3.1. Multicolinealidad

La multicolinealidad en regresión es una condición que ocurre cuando algunas variables predictoras incluidas en el modelo están correlacionadas con otras variables predictoras. La multicolinealidad severa es problemática, porque puede incrementar la varianza de los coeficientes de regresión, haciéndolos inestables (Minitab).

Para descartar que exista multicolinealidad se verifica en primera instancia la matriz de correlación de las variables independientes cuantitativas.

Figura 20. Matriz de correlación de variables cuantitativas independientes

	pib_exp	pib_imp	dist	precio~p	exp_cont	imp_cont	cambi~xp	cambi~mp	corru~xp	corru~mp	democ~xp	democ~mp	tec_exp
pib exp	1.0000												
pib_imp	0.0401	1.0000											
dist	-0.0000	0.2973	1.0000										
precio_exp	0.5226	0.0872	0.1199	1.0000									
exp_cont	0.9183	0.0353	-0.0000	0.4333	1.0000								
imp_cont	0.2256	-0.2490	-0.7037	0.0152	0.2003	1.0000							
cambio_exp	0.2147	0.0065	0.0000	0.0490	0.3985	-0.0303	1.0000						
cambio_imp	-0.0310	0.0718	-0.3232	-0.2417	-0.0063	0.2267	0.1146	1.0000					
corrupcio~xp	-0.2338	-0.0117	0.0000	-0.5954	-0.1314	-0.0575	0.3062	0.0460	1.0000				
corrupcio~mp	0.0179	0.0539	-0.0712	-0.1978	0.0177	-0.0191	-0.0124	0.8000	-0.0021	1.0000			
democraci~xp	-0.2760	-0.0106	0.0000	-0.0982	-0.3977	0.0283	-0.7334	-0.0703	-0.0334	0.0087	1.0000		
democraci~mp	-0.0248	0.1286	-0.2383	-0.0953	-0.0226	0.2623	0.0037	0.5861	-0.0032	0.6598	0.0120	1.0000	
tec_exp	0.5320	0.0205	0.0000	0.4271	0.4305	0.1277	0.1229	0.0127	-0.0673	0.0120	0.2835	0.0074	1.0000

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

En la figura 20 se observa que la relación de las variables cuantitativas independientes, costo de exportación (exp_cont) y PIB del exportador (pib_exp), presentan correlación positiva alta (0,9183).

Posteriormente, se realiza una regresión lineal mediante corte transversal con el propósito de realizar el test de VIF y descartar la existencia de multicolinealidad. Cotrading (2017), grupo de análisis gestión de mercados, define el test de VIF como un indicador del grado en el que la varianza del estimador se eleva por la colinealidad entre variables. En la figura 21 se observan los resultados del test de VIF, confirmando lo observado en la figura de matriz de correlación al haber una de las variables con el indicador sobre 10.

Figura 21. Test de VIF de variables cuantitativas independientes

Variable	VIF	1/VIF
pib_exp	12.84	0.077887
exp_cont	9.79	0.102135
democraci~xp	6.62	0.151158
cambio_exp	6.18	0.161923
corrupcio~mp	5.26	0.190008
cambio_imp	4.36	0.229327
tec_exp	4.31	0.231967
imp_cont	2.83	0.353752
precio_exp	2.81	0.356363
dist	2.35	0.425698
democraci~mp	2.35	0.425947
corrupcio~xp	2.22	0.449743
pib_imp	1.29	0.773783
Mean VIF	4.86	

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

El PIB del exportador presenta in VIF 12,84 y la segunda variable, precio de exportación de contenedor, presenta un VIF de 9,79. Dado estos resultados, se concluye que estas dos variables presentan multicolinealidad. Dado que en el trabajo se utiliza el modelo gravitacional en que la variable PIB del exportador es una variable fundamental, se opta por excluir la variable de costo de exportación de contenedor.

La figura 22 y 23 muestran la matriz de correlación y el test de VIF, respectivamente, sin la variable de costo de exportación de contenedor. Estos resultados permiten observar que, al excluir la variable del costo de exportación de contenedor, baja la multicolinealidad. Por lo tanto, se excluye la variable para la estimación del modelo.

Figura 22. Matriz de correlación variables independientes sin costo de exportar contenedor

	pib_exp	pib_imp	dist	precio~p	imp_cont	cambi~xp	cambi~mp	corru~xp	corru~mp	democ~xp	democ~mp	tec_exp
pib_exp	1.0000											
pib_imp	0.0401	1.0000										
dist	-0.0000	0.2973	1.0000									
precio_exp	0.5226	0.0872	0.1199	1.0000								
imp_cont	0.2256	-0.2490	-0.7037	0.0152	1.0000							
cambio_exp	0.2147	0.0065	0.0000	0.0490	-0.0303	1.0000						
cambio_imp	-0.0310	0.0718	-0.3232	-0.2417	0.2267	0.1146	1.0000					
corrupcio~xp	-0.2338	-0.0117	0.0000	-0.5954	-0.0575	0.3062	0.0460	1.0000				
corrupcio~mp	0.0179	0.0539	-0.0712	-0.1978	-0.0191	-0.0124	0.8000	-0.0021	1.0000			
democraci~xp	-0.2760	-0.0106	0.0000	-0.0982	0.0283	-0.7334	-0.0703	-0.0334	0.0087	1.0000		
democraci~mp	-0.0248	0.1286	-0.2383	-0.0953	0.2623	0.0037	0.5861	-0.0032	0.6598	0.0120	1.0000	
tec_exp	0.5320	0.0205	0.0000	0.4271	0.1277	0.1229	0.0127	-0.0673	0.0120	0.2835	0.0074	1.0000

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

Figura 23. Test de VIF de variables cuantitativas independientes sin precio de exportación de contenedor

Variable	VIF	1/VIF
democraci~xp	6.25	0.159966
corrupcio~mp	5.26	0.190230
cambio_exp	4.89	0.204630
cambio_imp	4.36	0.229571
tec_exp	3.95	0.253479
pib_exp	3.12	0.320178
imp_cont	2.82	0.354169
precio_exp	2.80	0.357008
dist	2.35	0.425776
democraci~mp	2.35	0.426124
corrupcio~xp	2.22	0.451258
pib_imp	1.29	0.773918
Mean VIF	3.47	

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

4.3.2. Heterocedasticidad

La heterocedasticidad se presenta cuando la varianza del error es distinta para cada valor de "x" y provoca estimadores insesgados. Una forma eficiente de reducir la heterocedasticidad es linealizar la ecuación mediante la aplicación de logaritmo natural, de esta manera los errores se distribuyen de manera normal sin importar el tamaño de la muestra.

Para verificar la heterocedasticidad se realiza la estimación mediante corte transversal y luego se aplica el test de White. Este test tiene como finalidad determinar si la evolución de las variables explicativas y de sus varianzas y covarianzas son significativas para determinar el valor de la varianza muestral de los errores (De Arce y Mahía, 2009). En la figura 24 se observa que Prob>chi2=0.0002, validando la hipótesis nula de homocedasticidad, es decir, se excluye la presencia de heterocedasticidad.

Figura 24. Test de White

White's test for Ho: homoskedasticity

against Ha: unrestricted heteroskedasticity

chi2(81) = 135.00 Prob > chi2 = 0.0002

Cameron & Trivedi's decomposition of IM-test

Source	chi2	df	р
Heteroskedasticity Skewness Kurtosis	135.00 44.44 1.66	81 12 1	0.0002 0.0000 0.1979
Total	181.10	94	0.0000

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

4.3.3. Revisión aspectos generales

De acuerdo a Santos y Tenreyro (2006), al no existir heterocedasticidad en los datos y regresión, se puede aplicar logaritmo natural a los modelos gravitacionales para reducir residuos de la estimación. En este apartado, se realizan dos regresiones lineales mediante corte transversal. Una de ellas con las variables cuantitativas con logaritmo natural y la otra sin logaritmo natural con el propósito de chequear si los residuos disminuyen al aplicar logaritmo natural.

Figura 25. Regresión sin logaritmo natural

Source	SS	df	MS	Number	of obs	=	168
				F(23,	144)	=	23.00
Model	2.1707e+09	23	94378082	Prob > F		=	0.0000
Residual	590904502	144 41	.03503.48	R-squa	red	=	0.7860
				Adj R-	squared	=	0.7519
Total	2.7616e+09	167 16	536529.3	Root M	ISE	=	2025.7
ехр	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95%	Conf.	Interval
pib_exp	55.6668	267.7263	0.21	0.836	-473.5	143	584.847
pib_imp	6.869225	1.120165	6.13	0.000	4.655	135	9.08331
dist	8611457	.1468502	-5.86	0.000	-1.151	406	5708852
precio_exp	1532003	.2456832	-0.62	0.534	6388	116	.33241
imp_cont	0437633	.7643509	-0.06	0.954	-1.55	456	1.46703
cambio_exp	-23244.31	297718.6	-0.08	0.938	-61170	7.5	565218.8
cambio_imp	1989.029	1487.713	1.34	0.183	-951.5	482	4929.60
corrupcion_exp	-765.7114	9323.712	-0.08	0.935	-19194	.73	17663.3
corrupcion_imp	102.398	21.03934	4.87	0.000	60.8	122	143.983
democracia_exp	29417.77	693515.5	0.04	0.966	-1341	368	140020
democracia_imp	-1604.36	282.0182	-5.69	0.000	-2161	.79	-1046.93
tec_exp	-3.45e-06	.0000346	-0.10	0.921	0000	719	.00006
idioma	-2925.282	679.4607	-4.31	0.000	-4268.	287	-1582.27
argentina	-8669.777	2257.943	-3.84	0.000	-13132	.77	-4206.78
ue	-3668.754	1253.003	-2.93	0.004	-6145.	409	-1192.09
free_com	-670.0213	1066.266	-0.63	0.531	-2777.	575	1437.53
nafta	-7777.27	1783.777	-4.36	0.000	-11303	.04	-4251.50
t1	1243.67	24692.59	0.05	0.960	-47563	.08	50050.4
t2	0	(omitted)					
t3	2202.117	135570.4	0.02	0.987	-265	763	270167.
t4	8829.309	202317.5	0.04	0.965	-39106	6.5	408725.
t5	13030.09	297777.2	0.04	0.965	-57554	8.8	60160
t6	4105.591	103210.5	0.04	0.968	-19989	7.7	208108.8
t7	-856.542	40589.3	-0.02	0.983	-81084	.34	79371.2
_cons	-143988	4628934	-0.03	0.975	-9293	423	900544

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

Si observamos la figura 25, los resultados de la estimación sin logaritmo natural, se observa que el Root MSE, indicador de diferencia entre lo estimado y el valor real, es alto (2025,7). Comparativamente, se observa que, al aplicar logaritmo natural a las variables cuantitativas, tanto dependientes como independientes, el Root MSE baja considerablemente (1,0112), tal como lo muestra la figura 26. Es por esto que se sugiere continuar con los datos bajo logaritmo natural.

Figura 26. Regresión con logaritmo natural

Source	ss		df	MS		Number of F(12, 153		166 35.76
Model	438.811275		12	36.5	676063	Prob > F	, –	0.0000
Residual			153 1.02249088		R-squared =		0.7372	
Residual 156.441104		50.441104	100 1.02213000		Adj R-squared =		0.7166	
Total 595.25238		EGE 25220	165	3.60759018		Root MSE	=	1.0112
		393.23236	165 3.60/59016		KOOU FISE		1.0112	
lnexp		Coef.	Std.	Err.	t	P> t	[95% Cont	f. Interval]
lnpib_exp		.001651	1.178	8827	0.00	0.999	-2.327229	2.330531
lnpib_imp		.3569116	.0356	5413	10.01	0.000	.286499	. 4273242
lndist		.088449	. 270	1936	0.33	0.745	4468096	. 6237075
lnprecio_exp		-1.038342	. 4400375		-2.36	0.020	-1.907675	1690076
lnimp_cont		.1574179	.2633596		0.60	0.551	3628727	. 6777085
lncambio_exp		-2.602963	2.345	851	-1.11	0.269	-7.237404	2.031478
lncambio_imp		2.473052	.3760	0881	6.58	0.000	1.730056	3.216048
lncorrupcion_exp		-2.601354	3.611	1304	-0.72	0.472	-9.735811	4.533103
lncorrupcion_imp		1.467216	.5280	533	2.78	0.006	. 423999	2.510433
lndemocracia_exp		-8.589417	11.77	7942	-0.73	0.467	-31.86073	14.6819
lndemocracia_imp		-3.187769	. 4573	3467	-6.97	0.000	-4.091299	-2.284239
lntec exp		1.384684	1.001857		1.38	0.169	5945758	3.363943
_cons		13.88577	19.61	1998	0.71	0.480	-24.87528	52.64682
_		I						

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

4.3.4. Estimación mediante datos de panel

En la figura 27, se muestra la primera estimación, realizada con datos de panel con efectos fijos. Se observa que la variable distancia (Indist) es omitida ya que es un valor que no varía a través del tiempo y por lo tanto es incluido su efecto en la constante.

Figura 27. Estimación datos de panel con efectos fijo

note: Indist omitt	ted because o	f collineari	ty			
Fixed-effects (within) regression			Nur	mber of o	bs =	166
Group variable: id	dem		Nur	mber of g	roups =	14
R-sq:			Obs	s per gro	up:	
within $= 0.3$	3428				min =	10
between = 0.1	1280				avg =	11.9
overall = 0.1	1257				max =	12
				11,141)	=	6.68
corr(u_i, Xb) = -	-0.9287		Pro	ob > F	=	0.0000
lnexp	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf	. Interval]
lnpib exp	-1.274552	. 6639398	-1.92	0.057	-2.587116	.0380115
lnpib imp	2.056801	.5734297	3.59	0.000	.9231698	3.190432
lndist	0	(omitted)				
lnprecio_exp	-1.05852	.272646	-3.88	0.000	-1.597522	5195175
lnimp_cont	.3794971	.2209283	1.72	0.088	057263	.8162573
lncambio_exp	-1.058705	1.146013	-0.92	0.357	-3.324295	1.206885
lncambio_imp	9844884	.4440395	-2.22	0.028	-1.862324	1066527
lncorrupcion_exp	-1.628376	1.955736	-0.83	0.406	-5.494731	2.23798
lncorrupcion_imp	1815715	.8042574	-0.23	0.822	-1.771533	1.40839
lndemocracia_exp	-12.41734	5.675692	-2.19	0.030	-23.6378	-1.196891
<pre>lndemocracia_imp</pre>	2.811397	1.143573	2.46	0.015	.5506319	5.072163
lntec_exp	1.73807	.4929817	3.53	0.001	.7634792	2.712661
_cons	6.622615	10.42621	0.64	0.526	-13.98928	27.23451
sigma u	4.778779					
sigma e	.47025457					
rho	.99040938	(fraction	of varia	nce due t	oui)	
		,			,	

F test that all $u_i=0$: F(13, 141) = 43.61

Prob > F = 0.0000

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

En la figura 28 se observa la primera estimación mediante datos de panel con efectos aleatorios.

Para analizar la consistencia de estos dos modelos, se realiza el test de Hausman.

El test de Hausman determina si las diferencias son sistemáticas y significativas entre dos estimaciones. Se emplea fundamentalmente para dos cosas: saber si un estimador es consistente o saber si una variable es o no relevante (Montero, 2005). El test es presentado en la figura 29.

Figura 28. Estimación datos de panel con efectos aleatorios

Random-effects GLS	S regression		Nur	mber of o	bs =	166
Group variable: io	dem		Nur	mber of g	roups =	14
R-sq:			Obs	s per gro	up:	
within $= 0.2$	2891				min =	10
between = 0.2	2815				avg =	11.9
overall = 0.2	2798				max =	12
			Wa.	ld chi2(1	2) =	61.56
corr(u_i, X) = 0	O (assumed)		Pro	ob > chi2	=	0.0000
lnexp	Coef.	Std. Err.	Z	P> z	[95% Co	nf. Interva
lnpib_exp	6525832	. 6600767	-0.99	0.323	-1.9463	1 .64114
lnpib_imp	. 453793	.1492567	3.04	0.002	.161255	2 .74633
lndist	.0291716	.9731269	0.03	0.976	-1.87812	2 1.9364
lnprecio exp	-1.157624	.2881281	-4.02	0.000	-1.72234	459290

lnexp	Coef.	Std. Err.	Z	P> z	[95% Conf.	. Interval]
lnpib_exp	6525832	. 6600767	-0.99	0.323	-1.94631	. 6411433
lnpib_imp	. 453793	.1492567	3.04	0.002	.1612552	.7463307
lndist	.0291716	.9731269	0.03	0.976	-1.878122	1.936465
lnprecio_exp	-1.157624	.2881281	-4.02	0.000	-1.722344	5929029
lnimp_cont	.5988841	.2044098	2.93	0.003	.1982483	. 99952
lncambio_exp	-1.480656	1.204224	-1.23	0.219	-3.840891	.8795801
lncambio_imp	2498913	.4298296	-0.58	0.561	-1.092342	.5925592
lncorrupcion_exp	-2.636194	2.062961	-1.28	0.201	-6.679523	1.407135
lncorrupcion_imp	1.036279	.7280841	1.42	0.155	3907393	2.463298
lndemocracia_exp	-14.23661	5.963917	-2.39	0.017	-25.92568	-2.547551
lndemocracia_imp	1.097499	.9674515	1.13	0.257	7986714	2.993669
lntec_exp	1.865703	.5205828	3.58	0.000	.8453793	2.886026
_cons	10.16019	13.97136	0.73	0.467	-17.22317	37.54355
sigma u	1.2529649					
sigma_e	.47025457					
rho	.87653159	(fraction	of varia	nce due t	o u_i)	

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

Figura 29. Test de Hausman

Test: Ho: difference in coefficients not systematic

chi2(11) = (b-B)'[(V_b-V_B)^(-1)](b-B)

= 37.76

Prob>chi2 = 0.0001

(V b-V B is not positive definite)

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

En la figura 29 se aprecia un Prob>chi2=0,0001, por lo que se ratifica que el método por efecto fijo es más conveniente que el efecto aleatorio para explicar el comportamiento de exportación de carbonato de litio.

En la tabla 23 se exponen los datos finales de esta estimación. El coeficiente de determinación alcanzado en la estimación mediante datos de panel con efectos fijos (0,14) es muy bajo, por lo tanto, y siguiendo las indicaciones de Fuenzalida-O'Shee, D., et al. (2018), se decide aplicar datos de panel dinámicos.

Tabla 23. Resultados estimación datos de panel con efectos fijos.

Variables	Efectos Fijos
Ln (PIB importador)	2.37***(0,35)
Ln (precio exportación)	-0,59***(0,16)
Ln (cambio del importador)	-0,73*(0,36)
Ln (índice democracia exportador)	9,32**(4,08)
Ln (índice democracia importador)	3.45**(1,11)
2011-2012	0,45**(0,18)
Constante	-19,50*(9,00)
R^2	0,14
Número de observaciones	166

Nota 1: Valores con heterocedasticidad corregida.

Nota 2: Nivel de significancia: *** = 0% error; ** = 0% < P \leq 2,5%; * = 2,5% < P \leq 5%

Nota 3: Los valores entre paréntesis representan el estándar de error.

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

La estimación con datos de panel dinámicos se realiza con el método Arellano-Bover/Blundell-Bond. En primera instancia se prueba el modelo con tres retardos donde, como se muestra en la figura 30, el tercer retardo no es significativo al tener un error del 11%. De acuerdo a esto, se decide realizar la modelación con dos retardos.

Figura 30. Estimación datos de panel dinámicos

	Ü		•					
System dynamic panel-data estimation			Nu	mber of o	bs =	124		
Group variable: id	lem		Nu	mber of g	roups =	14		
Time variable: yea	ir							
			Ob	s per gro	up:			
					min =	7		
					avg =	3.857143		
					max =	9		
Number of instrume	ents = 76		Wa	ld chi2(2	3) =	232.39		
			Pro	ob > chi2	=	0.0000		
One-step results								
lnexp	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Con:	f. Interval]		
lnexp								
L1.	.3160486	.1221096	2.59	0.010	.0767181	.5553793		
L2.	.2874196	.1005409	2.86	0.004	.0903631	. 484476		
L3.	1469991	.0919631	-1.60	0.110	3272434	.033245		
20.			2.00	0.110	.02.2.01	. 5552 15.		
lnpib_exp	-6.053975	3.379836	-1.79	0.073	-12.67833	.570381		
lnpib_imp	.1819827	.571211	0.32	0.750	9375702	1.30153		
lndist	-4.438336	9.476552	-0.47	0.640	-23.01204	14.1353		
lnprecio_exp	4181961	.5110183	-0.82	0.413	-1.419774	.583381		
lnimp_cont	.646816	.2739808	2.36	0.018	.1098235	1.18380		
lncambio_exp	-1.751879	2.175654	-0.81	0.421	-6.016083	2.51232		
lncambio_imp	.808523	.4811475	1.68	0.093	1345088	1.75155		
lncorrupcion_imp	3460174	.9882289	-0.35	0.726	-2.28291	1.59087		
lndemocracia_imp	1.016713	.9344413	1.09	0.277	8147582	2.84818		
lntec_exp	2.546585	1.706858	1.49	0.136	7987955	5.89196		
idioma	8158006	1.366849	-0.60	0.551	-3.494776	1.86317		
argentina	-5.766167	14.38841	-0.40	0.689	-33.96694	22.434		
ue	-1.494689	2.804007	-0.53	0.594	-6.990441	4.00106		
free_com	1.064391	3.017197	0.35	0.724	-4.849206	6.97798		
nafta	-4.158009	6.545067	-0.64	0.525	-16.9861	8.67008		
t2	-1.157402	.4343723	-2.66	0.008	-2.008756	30604		
t3	5919398	.7048108	-0.84	0.401	-1.973344	.789464		
t5	.4026046	.3504746	1.15	0.251	284313	1.089522		
t6	1314169	.6583208	-0.20	0.842	-1.421702	1.158868		
t7	.5803089	.5622529	1.03	0.302	5216866	1.682304		
67	. 3003003	. 3622329	1.03	0.302	5216666	1.002304		

Instruments for differenced equation

GMM-type: L(2/.).lnexp

Standard: D.lnpib_exp D.lnpib_imp D.lnprecio_exp D.lnimp_cont
D.lncambio exp D.lncambio imp D.lncorrupcion exp

D.lncorrupcion_imp D.lndemocracia_imp D.lntec_exp D.t3 D.t4

D.t5 D.t6 D.t7

Instruments for level equation GMM-type: LD.lnexp Standard: _cons

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

Los resultados obtenidos de la estimación mediante el modelo Arellano-Bover/Blundell-Bond con dos retardos se presentan en la tabla 24.

Tabla 24. Resultados datos de panel dinámicos.

Variable	Datos de panel dinámicos
Ln (Exp-1)	0,42*** (0.08)
Ln(Exp-2)	0,22** (0,07)
Ln(PIB exportador)	-1,56** (0,59)
Ln(distancia)	2,02*** (0,56)
Ln(precio importar contenedor)	0,69** (0,21)
Ln(cambio importador)	0,57* (0,28)
Ln(exportación altas tecnologías)	1,27*** (0,27)
2010	0,61*** (0,10)
2011-2012	0,61*** (0,10)
2015-2016	0,49*** (0,12)
Constante	-39,64*** (6,82)
Número de observaciones	138

Nota 1: Valores con heterocedasticidad corregida.

Nota 2: Nivel de significancia: *** = 0% error; ** = 0% < P \leq 2,5%; * = 2,5% < P \leq 5%

Nota 3: Los valores entre paréntesis representan el estándar de error.

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

Según los datos obtenidos, el modelo propuesto queda expresado de la siguiente manera para los años 2005-2009 y 2013-2014:

$$ln(E_{ijt}) = -39,64 + 0,42 ln (E_{ijt-1}) + 0,22 ln (E_{ijt-2}) - 1,56 ln \gamma_{it} + 2.02 ln \varepsilon_{ij} + 0,69 ln \mu_{jt} + 0,57 ln \tau_{jt} + 1,27 ln \varepsilon_{it} + \omega_{ijt}$$
(7)

Para los años 2010, 2011, 2012, 2015 y 2016 se debe sumar un valor más, el cual se detalla en la tabla 25.

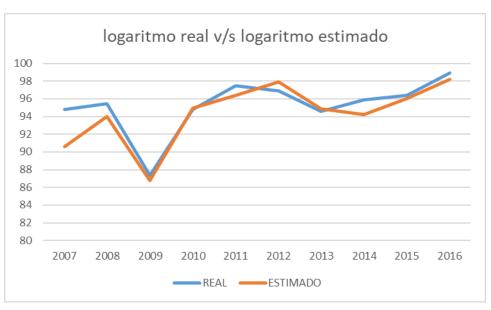
Tabla 25. Valores a sumar a la ecuación según año

Año	Valor a sumar a la ecuación
2010	0,61
2011	0,61
2012	0,61
2015	0,49
2016	0,49

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos de STATA.

Una vez obtenido el modelo, se verifica su eficiencia reemplazando los datos en la ecuación y comparando el resultado con las exportaciones reales. La primera gráfica, figura 31, muestra el resultado de dicho ejercicio teniendo todos los datos en logaritmo natural.

Figura 31. Exportaciones reales, bajo logaritmo natural v/s modelo estimado, bajo logaritmo natural



Fuente: Elaboración propia.

En la figura anterior se aprecia un comportamiento muy cercano entre los valores de exportación en logaritmo natural, reales con estimados mediante la ecuación.

La tabla 26, muestra los errores de estimación presentes en cada uno de los años de estudio.

Tabla 26. Porcentaje error estimación de logaritmo natural por año

AÑO	Error
2007	4.41%
2008	1.57%
2009	0.58%
2010	0.10%
2011	1.12%
2012	1.03%
2013	0.31%
2014	1.75%
2015	0.38%
2016	0.75%

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 26, el año 2007 presenta un elevado error en comparación a los demás años debido a la influencia de valores 0 (cero) como lo menciona Santos y Tenreyro (2006). En las exportaciones de los años 2005 y 2006 se presentan casos donde no existe exportación documentada los que mediante el efecto de retardo afectan fuertemente al año 2007. Al excluir dicho año y calcular el promedio de error, se obtiene un 0.84%. No obstante, si se replica dicho ejercicio a valores de toneladas y no en logaritmos, se aprecia un aumento significativo en el error de estimación, tal como se aprecia en la figura 32.

exportaciones reales v/s exportaciones modelo 70000 60000 50000 40000 30000 20000 10000 0 2007 2008 2012 2013 2014 2016 REAL --MODELO

Figura 32. Exportaciones reales v/s exportaciones modelo

Fuente: Elaboración propia.

Al calcular el promedio de error de estimación se observa un aumento significativo, llegando a alcanzar un porcentaje de error del 35%. Lo anterior se debe a que, según lo expresado por Santos y Tenreyro (2006), los datos considerados como 0 en el estudio, causan una disminución en los coeficientes de la ecuación generando una estimación con un comportamiento similar, pero con valores mucho menores.

De acuerdo a esto, se aconseja aplicar una estrategia econométrica para reducir el impacto de las observaciones cero en la estimación y así, obtener resultados más exactos.

Al final de este documento se anexa la proyección de las exportaciones de carbonato de litio en logaritmo natural, para los años 2017, 2018 y 2019 de acuerdo al modelo estimado (Anexo 1).

CONCLUSIONES

Para la realización de este trabajo se recopila información de diferentes fuentes; libros, artículos, presentaciones, entre otros. Posteriormente se clasifica dicha información y se procede a buscar coincidencias entre ellos de manera de validar sus datos. Para los usos del litio, se respaldan los más importantes con diversos artículos. Los datos de reservas y bases de datos de exportaciones se obtuvieron de organismos públicos como el USGS de Estados Unidos y COCHILCO de Chile.

La descripción del proceso de extracción se basa en el libro escrito por Álvaro González (2000) y se valida con diversas fuentes bibliográficas.

En cuanto a los datos de mercado, éstos son obtenidos principalmente de artículos del litio publicados por COCHILCO en 2003 y 2017.

Para modelar el comportamiento exportador, se conforma una base de datos con variables que pudiesen resultar significativas en el intercambio comercial entre dos países; se comprueba la correlación entre variables; la multicolinealidad y la heterocedasticidad. Una vez comprobada la base de datos se realiza una estimación mediante datos de panel estáticos con efecto fijo y aleatorio, para después, mediante test de Hausman, comprobar cuál de los dos es el más indicado. Luego, se realiza una estimación con datos de panel dinámicos con dos retardos. Finalmente, se verifica la eficiencia del modelo, comparando el comportamiento real con el estimado por la ecuación.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, el objetivo principal de "Determinar las variables que influyen en el proceso exportador de litio y carbonato de litio de Chile con sus principales socios comerciales durante el periodo 2005-2016" se considera cumplido.

En cuanto a los resultados empíricos, se puede concluir:

 Variables no significativas: PIB importador, precio de venta de una tonelada de carbonato de litio, precio por exportar contenedor desde Chile,

- el cambio real del país exportador, el índice de percepción de la corrupción de ambos países (exportador, importador), el índice de democracia de los países en estudio.
- Variables significativas: Exportación del año anterior, exportación de dos años atrás, PIB del exportador, distancia entre países, precio por importar contenedor según el país, el tipo de cambio real del importador y la exportación de altas tecnologías.

Como se aprecia en la tabla 24, el PIB del exportador tiene un coeficiente negativo, lo que, junto al coeficiente positivo de la distancia entre países, hace que lo propuesto teóricamente por el modelo gravitacional no se cumpla debido a que mientras mayor es el PIB de Chile, menos carbonato de litio se exporta y mientras mayor es la distancia a la que se encuentra el país importador, más exportaciones de carbonato de litio se realizan. No es primera vez que este comportamiento se observa en América Latina, por ejemplo, en el estudio realizado por Ovando, Canales y Munguía (2017), Colombia exhibe un comportamiento similar, importando más desde países con mayor distancia geográfica.

Al ser el coeficiente de la distancia y costo por importar contenedor positivos y significativos, se aprecia que los compradores de carbonato de litio están dispuestos a costear el transporte y la logística necesaria con tal de obtener este bien. Lo anterior se debe a que el carbonato de litio es un insumo de manufactura y los costos de transporte e importación de carbonato de litio no influyen en el volumen que se importa demostrando que, en su formulación y evaluación de proyectos, los importadores consideran mucho más rentable adquirir este bien asumiendo todos los costos de transporte, antes que buscar un sustituto con menores costos de traslado. Cabe recordar que los principales exportadores de litio son países que generan manufactura con altos volúmenes y/o tecnología como son Corea del Sur, Japón y China.

El coeficiente de las exportaciones de alta tecnología se presenta como positivo, por lo que se concluye que, a mayor exportación de bienes con alta

tecnología, mayor serán las exportaciones de carbonato de litio. Teóricamente es correcto, ya que las exportaciones de productos industriales son fundamentales para el crecimiento económico de los países (Herzer y Nowak-Lehmann, 2006).

Dentro de las variables no significativas figuran el índice de percepción de la corrupción y el índice de democracia, indicadores que se añadieron al modelo con el fin de determinar su influencia en las exportaciones de carbonato de litio. El hecho de que no presenten significancia en el modelo no debe ser motivo para inferir que la estabilidad política de Chile no afecta en las exportaciones ya que, estas variables no miden la estabilidad económica del país ni su estabilidad logística, solo mide aspectos de calidad institucional. Por ejemplo, China presenta una precepción de la corrupción media-alta, sin embargo, encabeza desde el 2014 el ranking de Lloyd's List sobre los 100 puertos que movilizan más cantidad de contenedores a nivel mundial. Dado esto, se recomienda para futuras investigaciones, incluir un indicador de logística dentro de las variables de estimación, aunque para estudios latinoamericanos este indicador es escaso y se presenta de manera discontinua.

Por último, la significancia de los años de exportación, muestra el efecto de recuperación que posee el carbonato de litio después de una crisis. Presentando una recuperación de la crisis económica del año 2009 durante los años 2010, 2011 y 2012, para volver a repetir el efecto en los años 2015 y 2016, después de la recesión mundial del año 2014.

Los resultados del presente trabajo tienen utilidad tanto para las empresas productoras de carbonato de litio, como para el Estado de Chile. En caso de las empresas productoras de carbonato de litio, conocer las variables que influyen en las exportaciones de su producto tiene grandes ventajas si se desea aumentarlas u optimizar las ganancias, además, les ayuda a entender los factores que afectan en el intercambio con cada uno de sus clientes. Por parte del Estado de Chile también presenta beneficios, ya que los resultados

obtenidos pueden ser de utilidad a la hora de pensar en acuerdos comerciales con alguno de países incluidos en el estudio, además de mostrar qué tipo de políticas internas puede favorecer o perjudicar a las exportaciones de carbonato de litio.

En cuanto al modelo gravitacional, presenta grandes beneficios para el rubro minero, tanto privado como estatal. Los resultados dan a conocer las variables que afectan a las exportaciones totales de un producto determinado y también es adaptable para conocer las variables que afectan en el intercambio comercial con un país en particular. El ejercicio realizado en este trabajo puede ser replicado para otros minerales o productos de origen mineral con el fin de conocer las variables que afectan a las exportaciones y en qué medida lo hacen, variables que no necesariamente deben ser las mismas obtenidas en este trabajo de título.

El tiempo acotado en la realización del trabajo de título no ha hecho posible el llevar a cabo un método para manejar las observaciones cero dentro de la muestra. Se recomienda la realización de otro estudio donde se aplique alguna de las estrategias mencionadas durante este trabajo con el fin de mitigar el impacto de éstas y obtener estimaciones más precisas.

BIBLIOGRAFÍA

- Academia Nacional de Ciencias Exactas (ANCEFN). (2017). Litio en cerámicos, esmaltes, cementos y materiales similares. *Litio: Un recurso natural estratégico.* 1. 154-166.
- Albemarle. (s/f). Logo Albemarle. [Imagen]. Recuperado de http://www.albemarlelitio.cl/
- Albemarle. (s/f). Los pasos de Albemarle en Chile. Recuperado de http://www.albemarlelitio.cl
- Angulo, A., Mtimet, N., Dehibi, B., Atwi, M., Ben Youssef, O., Gil, J. y Sai, M. (2011). A revisited gravity equation in trade flow analysis: an application to the case of Tunisian olive oil exports. *Investigaciones Regionales*. 21. 225-239.
- Asdrúbal, G. (2016). Las aleaciones aluminio litio. *Revista Colombiana de Materiales. 8. 1-37.*
- Banco Mundial. (2018). Perspectivas económicas mundiales, América Latina y el Caribe ¿La marea está cambiando? Recuperado de http://pubdocs.worldbank.org
- Biessen, G., Is the impact of central planning on the level of foreign trade really negative? *Journal of Comparative Economics*. *15*(1). 22-44.
- Bustamante, S., Campusano, S., Muñoz, F., Ortega, V., Santoro, E. (2012). *Litio. Producción, demanda y precio.*
- Brada, J. y Méndez, A. (1985). Economic Integration among Developed,

 Developing and Centrally Planned Economies: A Comparative Analysis. *The Review of Economics and Statistics.* 67(4). 549-556.
- Briones, R., Bosselin, H., Gutiérrez, G., Zagal, J. (2017). *El litio, mineral estratégico para la energía en Chile y el mundo*. Recuperado de: https://www.elmostrador.cl

- British Geological Survey. (2016). *Lithium Profile*. Recuperado de https://www.bgs.ac.uk/
- Cameán, I. (2011). PREPARACIÓN DE MATERIALES GRAFÍTICOS: APLICACIÓN COMO ÁNODOS EN BATERÍAS DE IÓN-LITIO. (Tesis para optar al grado de doctor, Universidad de Oviedo). Recuperada de: http://digital.csic.es
- Cameán, I. (2016). Nanomateriales de carbono: aplicación en baterías de iónlitio. *Boletín Grupo Español del Carbón. 41*. 15-18.
- Carrascoso, M. (2014). Bomba de calor basada en bromuro de litio y agua.

 Recuperado de: http://www.dicat.csic.es
- Chitue-de-Assunção-Nascimento, J., Lafargue-Pérez, F., Barrera-Vaillan, N., Díaz-Velázquez, M. y Rodríguez-Martínez, C. (2013). Caracterización de una biograsa de aceite vegetal de Jatropha curcas L y jabón de litio. *Ingeniería Mecánica. 16*(2). 171-177.
- Codelco (2017). Memoria Anual 2016 Recursos y Reservas Minerales.
- Comisión Nacional del Litio. (2014). *Litio: Una fuente de energía, una oportunidad para Chile. Informe Final.* Recuperado de www.biblioteca.sernageomin.cl
- Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). (2009). Antecedentes para una política pública en minerales estratégicos: Litio. Recuperado de http://www.chiperchile.cl
- Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). (2013). *Mercado internacional del litio.*Recuperado de www.cochilco.cl/
- Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). (2014). La explotación del litio en chile en el contexto del mercado internacional. Recuperado de http://www.cochilco.cl/
- Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO). (2017). *Mercado internacional del litio y su potencial en Chile*. Recuperado de http://www.cochilco.cl

- Comisión especial investigadora de la cámara de diputados. (2016). /NFORME DE LA COMISIÓN ESPECIAL INVESTIGADORA. DE "LA PARTICIPACIÓN DE TODA EMPRESA U ORGANISMO PÚBLICO EN LA EXPLORACIÓN, PROCESAMIENTO, EXPLOTACIÓN, EXPORTACIÓN Y TRANSPORTE DE LITIO, ASÍ COMO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONTRATO SUSCRITO ENTRE CORFO Y SQM PARA LA EXPLOTACIÓN DE DICHO METAL". Recuperado de www.camara.cl
- Contrading. (2018). *DETECCIÓN DE MULTICOLINEALIDAD Y SOLUCIONES*. Recuperado el 08 de enero de 2019, de http://www.cotradingclub.com
- Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) (2016), *Presentación Comisión Investigadora Litio*. Trabajo presentado en la Cámara de Diputados. Recuperado de www.camara.cl
- CORFO. (2018). CORFO aumenta cuota de litio a Albemarle. Recuperado de https://www.corfo.cl/
- CORFO. (2018). MEJORAMIENTO Y MODERNIZACIÓN CONTRATOS CORFO CON ALBEMARLE y SQM. Recuperado de https://slideplayer.es
- CORFO. (2018). PERSPECTIVAS EN LA INDUSTRIA DEL LITIO. Recuperado de https://www.camara.cl
- De Arce, R. y Mahía, R. (2009). CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LA HETEROCEDASTICIDAD EN EL MODELO BÁSICO DE REGRESIÓN LINEAL TRATAMIENTO CON E-VIEWS. Recuperado de http://www.uam.es
- Departamento de electrónica (UTFSM) (2010), *Tecnología de las baterías*, Universidad Técnica Federico Santa María. Recuperado de http://www.electronica.usm.cl

- Desormeaux, D. (abril, 2018), *Litio: Mercado y Regulación en Chile*, Trabajo presentado en EXPOMIN 2018. SIGNUM BOX. Recuperado de http://www.congreso.expomin.cl
- Diallo, A., Yinzhonghua, Morris, J., y Kolin, S. (2017). Panel Data Analysis of African's Trade: The Gravity Model Approach. *International Knowledge Sharing Platform.* 7(7). 73-85.
- DIRECON-PROCHILE (2018), Anuario de las exportaciones chilenas 2018.

 Recuperado de http://www.direcon.cl
- Eichengreen, B. y Irwin, D., (1995). Trade blocs, currency blocs and the reorientation of world trade in the 1930s. *Journal of International Economics*. 38. 1-24.
- Eichengreen, B. y Irwin, D., (1996). The rol of history in bilateral flows. NBER Working Papers Series. 5565.
- El-Sayed, M. (septiembre, 2012). A Gravity Model Analysis of Egypt's Trade and Some Economic Blocks. Presentado en: International Conference on Applied Life Sciences, International Society for Applied Life Sciences (ISALS), Turquía, Recuperado de: https://cdn.intechopen.com/
- Flores, H., Valdez, S. y Orce, A. (2017). Recuperación de Mg(OH)2 de salmueras.

 Presentado en: IX Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Cuba. Recuperado de: http://cinarem.ismm.edu.cu/
- Frankel, J. y Fellow, S. (1997). *REGIONAL TRADING BLOCS*. Estados Unidos. Harvard University.
- Fuenzalida-O'Shee, D.; Valenzuela-Klagges, B.; Corvalán-Quiroz, A. (2018). La facilitación comercial y sus efectos en el comercio bilateral chileno de 2006 a 2014. *Revista CEPAL*. (124). 173-191.
- Gajardo, A. (2014), *Potencial de litio en salares del norte de Chile.* SERNAGEOMIN. Recuperado de http://www.sernageomin.cl

- Garcés, I. (s.f.). *Litio y sus derivados*. Recuperado el 28 de mayo de 2018 de http://intranetua.uantof.cl
- Garret, D. (2004), *Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride*. Gran Bretaña. Elsevier.
- González, A. (2000). Riquezas minerales de Chile a nivel mundial. Santiago.
- González, J. (2017). Litio: Un tratamiento eficaz para el trastorno bipolar. *Molegla*. (25). 64-66.
- Havrylyshyn, O. y Pritchett, L. (1991). *European Trade Patterns After the Transition*. Country Economics Departament. The World Bank.
- Herzer, D. y Nowak-Lehnmann, F. (2006) What does export diversification do for growth? An econometric analysis. *Applied Economics*. *38*(15), 1825-1838, DOI: 10.1080/00036840500426983
- Iglesias, R., Lago, A., Nogueiras, A., Martínez-Peñalver, C., Marcos, J., Quintans, C., Moure, M.J., y Valdés M.D. (2012). Modelado y Simulación de una Batería de Ion-Litio Comercial Multicelda. Universidad de Vigo.
- Johnston, L., Morgan, S., Wang, Y. (2014). The Gravity of China's African Export Promise. The World Economy, 2014, Forthcoming.
- Jordaan, A. y Hinaunye, E. (2011). IDENTIFYING SOUTH AFRICA'S WOOD EXPORTS POTENTIAL USING A GRAVITY MODEL. 2010 International Conference on E-business, Management and Economics. 3. 159-164.
- Kepaptsoglou, K., Karlaftis, M. y Tsamboulas, D. (2010). The Gravity Model Specification for Modeling International Trade Flows and Free Trade Agreement Effects: A 10-Year Review of Empirical Studies. *The Open Economics Journal.* (3). 1-13.
- Kumar, A. (2016). Seleccionando grasas multipropósito: ¿litio complejo o sulfonato de calcio? Recuperado de: http://noria.mx

- Lapuerta, M. y Armas, O. (2012). *Frío Industrial y Aire Acondicionado*. España: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- Lombardi, P., Andrea Dal Bianco, A., Freda, R., Caracciolo, F. y Cembalo, L. (2016). Development and trade competitiveness of the European wine sector: A gravity analysis of intra-EU flows. *Wine Economics and Policy*. *5*(1), 50-59
- Macquarie Research. (2016). *Global Lithium Report.* Recuperado de: http://www.newagemetals.com
- Melero, F. (1993). *Materiales y Procesos Avanzados*. España: Consejo Superior Investigaciones Científicas.
- Minetti, J. (2005). El clima del noreste argentino. Argentina: Magna.
- Ministerio de Economía y Finanzas Públicas. (2011). *Complejo Minero: Litio.*Recuperado de https://docplayer.es
- Ministerio de Minería (s.f.). *Usos del Litio*. Recuperado el 29 de mayo del 2018 de http://www.minmineria.gob.cl/
- Ministerio de Minería (2016). *Marco General del Litio y la nueva Política Nacional del Litio y Gobernanza de los Salares.* Recuperado de https://www.camara.cl
- Ministerio de Obras Públicas. (2004). *Cuencas Salar de Atacama*. Recuperado de http://portal.mma.gob.cl
- Montero. R. (2005). Test de Hausman. Recuperado de https://www.ugr.es
- Osses, L., (mayo, 2018). Las tecnologías del litio y la cadena de valor. Trabajo presentado en el marco de los "jueves mineros". Instituto de Ingenieros de Minas de Chile. Santiago.
- Ovando, W., Canales, R., Munguía, G. (2017). Comercio interregional de bienes manufacturados en los países de la Alianza del Pacífico desde la Teoría de Linder. *Desafíos*, *29*(2). 169-197.

- doi: http://dx.doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/desafios/a.4876
- Polanco, E. (2005), *Historia de SOQUIMICH, una revisión.* Recuperado de www.sitiohistorico.sernageomin.cl
- Primo, E. (1996). Química orgánica básica y aplicada. España: Reverté.
- Resource World Magazine. (2018). *Triángulo del litio*. [Imagen]. Recuperado de http://resourceworld.com
- Revista ELECTRICIDAD. (2018). Aprueban aumento de cuota de extracción de litio de SQM. Recuperado el 03 de julio de 2018 de http://www.revistaei.cl/2018/03/09/
- Rockwood Litio Ltda. (agosto, 2014). *Operaciones y proyectos de Rockwood Litio Ltda*. Recuperado de http://www.sonami.cl
- Rodriguez, G. y Dávalos, J. (2017). The Trans-Pacific Partnership Agreement (TPP) Trade Potential for Peru, a Gravity Model Approach. *GECONTEC:* Revista Internacional de Gestión del Conocimiento y la Tecnología. 5(2). 93-107.
- Romano, F., Balderrama, F. (2013). Extracción solvente de boro a partir de salmueras evaporadas del Salar de Uyuni con 2-etil-1-hexanol y 2-etil-1,3-hexanodiol. *Revista Metalúrgica UTO*. (34). 13-17. Recuperado de www.revistasbolivianas.org.bo
- Roncero, C., López-Ortiz, C., Barral, C., Sáez-Francas, N., Rovira, M. y Casas, M. (2008). Tratamiento concomitante de litio y metadona en un paciente bipolar: a propósito de un caso. *Adicciones.* 21(2). 167-172.
- Sánchez, R. (2011). Formulación y procesado de oleogeles para el desarrollo de nuevas grasas lubricantes biodegradables. (Memoria para optar al grado de doctor, Universidad de Huelva). Recuperado de: rabida.uhu.es
- Santos, J. y Tenreyro, S. (2006). The log of gravity. *Review of Economics and Statistics*. 88(4). 641-658.

- Sawyer, J. (1967). The Canadian Journal of Economics and Political Science / Revue Canadienne D'Economique Et De Science Politique, 33(4). 633-634.
- Serrano, R. y Pinilla, V. (2010). AGRICULTURAL AND FOOD TRADE IN EUROPEAN UNION COUNTRIES, 1963-2000: A GRAVITY EQUATION APPROACH. Asociación Española de Historia Económica.
- Signum Box. (2015). What to expect from the Chilean lithium industry after the National Commission's advancement plan? Recuperado de: http://lwww.indmin.com
- SQM. (s/f). Logo SQM. [Imagen]. Recuperado de https://www.sqm.com
- SQM. (s/f). *Nuestra Historia*. Recuperado el 12 de diciembre de 2018, de https://www.sqm.com
- Tansey, M. y Touray, A. (2010). The Gravity Model Of Trade Applied To Africa. International Business & Economics Research Journal. 9(3). 127-130.
- Tay, C. (2013). An econometric model on bilateral trade in education using an augmented gravity model. *Journal of Industrial Engineering and Management*. 7(2). 402-412.
- The Economist. (2017). Democracy Index 2017. Recuperado de: https://pages.eiu.com
- Tondo, L. (2014). El tratamiento a largo plazo del trastorno bipolar. *Psicodebate. 14*(2). 83-100.
- Transparency International. (2005, ,2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016). *CORRUPTION PERCEPTIONS INDEX.*Recuperados de https://www.transparency.org
- Ulloa, C. (2017). EL COMERCIO ENTRE LOS PAÍSES DE LA ALIANZA DEL PACÍFICO. UN ANÁLISIS DESDE EL MODELO GRAVITACIONAL Y EL INTERCAMBIO BILATERAL. *TEAC*. (20). 11-19.

- USGS (2017). MCS Lithium 2017. Recuperado el 27 de abril de 2018 de https://minerals.usgs.gov
- USGS (2018). MCS Lithium 2018. Recuperado el 05 de noviembre de 2018 de https://minerals.usgs.gov
- Valenzuela-Klagges, B. (2011). COMERCIO Y CALIDAD INSTITUCIONAL EN EL CRECIMIENTO ECONÓMICO DEL CONO SUR AMERICANO: CUESTIONES Y DESAFÍOS. Revista Pilquen Sección Ciencias Sociales, (14), 1-8.
- Wang, Z., & Winters, L. (1992). The Trading Potential of Eastern Europe. Journal of Economic Integration, 7(2), 113-136.
- Winters, L. (1992). The Trading Potential of Eastern Europe. Journal of Economic Integration, 7(2), 113-136.
- Zambra, M. (Junio, 2016). *El litio y su interés para la energía nuclear.* Presentado en seminario: El significado del litio para el desarrollo del país. Universidad San Sebastián. Santiago.

ANEXO N°1: Proyección de exportaciones de carbonato de litio

Para realizar la proyección de exportaciones de carbonato de litio para los años 2017, 2018 y 2019 se dejan como constantes, con valores iguales a los del año 2016, las variables que han mostrado mayor fluctuación dentro del periodo de estudio y se deja el dinamismo en las exportaciones de alta tecnología, aplicando la tendencia de crecimiento.

De acuerdo a las exportaciones del año anterior, el 2017 presenta un alza del 0,81%, el 2018 un alza del 3,16% y el 2019 se observa un alza del 3,52%. Sin embargo, esta proyección presenta limitaciones debido a que para realizar una correcta estimación se deben modelar las proyecciones de cada una de las variables que influyen en las exportaciones de carbonato de litio (PIB de Chile, tipo de cambio real del país importador y precio por importar contenedor de país importador), lo que se sugiere para trabajos posteriores. Por otra parte, a medida que han avanzado los años se han sumado algunos países a los compradores del carbonato de litio chileno, mientras que otros han dejado de adquirir el mineral. Algunos de estos países no han sido considerados dentro del estudio debido a que poseen 5 o más años con observaciones cero en importación. No obstante, se presenta una proyección base donde se observa una tendencia al alza en las exportaciones de carbonato de litio.



Figura 33. Anexo 1: Proyección de exportaciones de carbonato de litio (2017-2019)

Fuente: Elaboración propia según estimaciones.