

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Sr. Ramón Díaz Noriega

**ANÁLISIS DE ANTECEDENTES AMBIENTALES EN LA EXPLOTACIÓN DEL
LITIO Y SUS PERSPECTIVAS DE FUTURO EN SUDAMÉRICA. CASO DE
ESTUDIO, SALAR DE ATACAMA, CHILE.**



JAIME ERNESTO BARRÍA URIBE

Informe de Memoria de Título
para optar al Título de
Ingeniero Civil de Minas

ABRIL 2021

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, Marcelo y Verónica por todo el apoyo que me han brindado durante esta etapa universitaria, sin su esfuerzo y amor hacia mí no lo hubiese logrado.

Agradezco también la paciencia y cariño en estos meses de mucho trabajo a mi tía Marisol y mi hermana Camila. Gracias por su compañía en esta cuarentena y por ayudarme en todo lo que necesité.

A Javiera, a quien conocí durante los últimos años de la carrera, gracias por inspirarme y motivarme en todo momento, especialmente durante la realización de esta memoria, gracias por todo tu amor.

A mis amigos que conocí en Concepción, gracias por todas las jornadas de estudio e interminables noches de “centralazos” que, sin duda, la universidad y estadía en Conce habrían sido mucho más difíciles sin ustedes. También por todos los momentos de distracción y diversión porque la U no es sólo para estudiar.

Quiero agradecer a la comisión, profesora Asieh y profesor René por su expedita revisión y correcciones que le dieron forma a esta memoria.

Finalmente, agradezco al profesor Ramón Díaz por estos meses de trabajo, por su total disponibilidad para resolver cada una de mis dudas y brindarme aliento.

RESUMEN

El litio es un recurso que tiene múltiples usos, es en la industria de baterías en donde ha adquirido una mayor importancia recientemente. El objetivo de este estudio es brindar una revisión detallada de la explotación de litio y los impactos ambientales generados por la producción minera a través del caso de estudio del Salar de Atacama.

El litio se encuentra en cantidades económicamente rentables en diferentes tipos de minerales como la espodumena y en salmueras. Los recursos de litio se encuentran distribuidos globalmente, pero en particular en los salares de Bolivia, Argentina y Chile que concentran alrededor del 58% de los recursos. La extracción mediante salmueras se realiza por bombeo del subsuelo y luego se transporta a estanques de evaporación, en donde se concentra el litio en varias etapas hasta obtener una salmuera rica en Litio.

El Salar de Atacama, Antofagasta, Chile es el tercer salar más grande del mundo y, la mayor fuente activa y concentrada de litio. Posee un ecosistema único que alberga diversas especies de flora y fauna autóctonas. En base a las características de la biodiversidad ecológica existen tres áreas protegidas en el salar, la Reserva Nacional de los Flamencos, el Sistema hidrológico de Soncor y el Santuario de la Naturaleza Valle de la Luna.

Actualmente en el Salar de Atacama hay dos empresas operando, SQM Salar y Albemarle.

Se recopilaron los estudios de impacto ambiental (EIA) que afectan el salar presentados por las empresas al Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA). Se analizaron los aspectos relativos al área de Influencia, la identificación y predicción de impactos ambientales y, las medidas de mitigación, compensación y/o reparaciones propuestas en cada proyecto.

Finalmente se determinó que el medio físico y medio biótico son los más afectados por las actividades del proyecto. Se identificó las actividades que generan mayores impactos, estas son el bombeo de salmuera, la extracción de agua fresca y la reinyección. Al respecto de, estos impactos ambientales los proyectos definen medidas de mitigación enfocadas en prevenir los impactos, pero no contemplan medidas de compensación o reparación.

El método de explotación actual no es sustentable. Es inconsistente que la explotación del salar no sea sustentable considerando que el uso del recurso tiene el objetivo final de contribuir con mejores prácticas ambientales en la industria energética.

ABSTRACT

Lithium is a multiple purpose mineral mostly used in the battery industry where it has acquired greater importance recently. The purpose of this study is to provide a detailed review of lithium exploitation and the environmental impacts generated by mine production through the case study of the Salar de Atacama.

Lithium can be found in profitable amounts in different types of deposits such as spodumene and in brines. Lithium resources are distributed all over the world, but in particular there are many salt flats of Bolivia, Argentina, and Chile, which concentrate around 58% of the resources. The brines are extracted by pumping out from underground and then transported to evaporation ponds, where the lithium is concentrated in several stages until a concentrated brine is obtained.

The Salar de Atacama, located in the Antofagasta region, is the third largest salt flat and world's largest and purest active source of lithium in the world. This place has a unique ecosystem in the world where it is home to diverse species of flora and fauna autochthonous. Based on the biodiversity ecological characteristics, there are three highly protected areas in the salt flat, which are: Los Flamencos National Reserve, Soncor Hydrological System, and the Valle de la Luna Nature Sanctuary.

Actually, two companies are operating in the Salar de Atacama, SQM Salar and Albemarle.

The environmental impact studies (EIA Spanish acronym) that affect the salt flat presented by the companies to the Environmental Impact Assessment Service (SEIA Spanish acronym) were completed. Aspects related to the area of influence, the identification and prediction of environmental impacts and the mitigation, compensation and / or repair measures proposed in each project were analyzed.

Finally, it was determined that the physical environment and the biotic environment are the most affected by the project activities. The activities that generate the greatest impacts were identified, these are the pumping of brine, the extraction of fresh water and reinjection. Regarding these environmental impacts, the projects define mitigation measures focused on preventing the impacts, but they do not contemplate compensation or repair measures.

The current method of exploitation is not sustainable. It is inconsistent that the exploitation of the salar is not sustainable considering that the use of the resource has the final objective of contributing to better environmental practices in the energy industry.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Contexto general del litio a nivel mundial	1
1.2.	Recursos en las salmueras de Sudamérica, el triángulo del litio	2
1.3.	El Salar de Atacama en Chile	4
1.4.	Aspectos ambientales asociados a la explotación de litio en Chile	5
1.5.	Objetivos	6
1.5.1.	Objetivo general	6
1.5.2.	Objetivos específicos	6
1.6.	Alcances.....	7
2.	LA INDUSTRIA DEL LITIO	8
2.1.	Usos y aplicaciones	8
2.2.	Formas comerciales de litio	9
2.2.1.	Carbonato de litio (Li₂CO₃).....	9
2.2.2.	Hidróxido de litio (LiOH).....	10
2.2.3.	Butil-litio (C₄H₉Li):.....	10
2.2.4.	Cloruro de litio (LiCl):	11
2.3.	Recursos y reservas de litio	11
2.4.	Tipos de yacimientos	14
2.5.	Métodos de explotación	15
2.5.1.	Yacimientos de roca	15
2.5.2.	Yacimientos de salmueras	16
3.	ANTECEDENTES DEL CASO DE ESTUDIO: SALAR DE ATACAMA.....	22
3.1.	Ubicación	22
3.2.	Marco Geológico.....	23
3.2.1.	Geomorfología	23
3.2.2.	Geología.....	25
3.3.	Marco Hidrogeológico.....	27
3.3.	Áreas protegidas en el Salar de Atacama.....	29
4.	EXPLORACIÓN DEL LITIO EN EL SALAR DE ATACAMA	32
4.1.	Marco regulatorio en Chile.....	32
4.2.	Organismos estatales.....	33
4.2.1.	Instituciones reguladoras	33
4.2.2.	Empresas del Estado	34
4.3.	Empresas involucradas e historial de explotación.....	35
5.	INSTRUMENTOS DE GESTIÓN AMBIENTAL	37

5.1.	Contexto general	37
5.2.	Contenidos Estudios de Impacto Ambiental	38
5.3.	Proyectos ingresados al SEIA en el Salar de Atacama	41
6.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	45
6.1.	1994 - Proyecto para Producción de 300 mil Toneladas Anuales de Cloruro de Potasio	45
6.1.1.	Área de influencia	45
6.1.2.	Evaluación de Impacto Ambiental	46
6.1.3.	Medidas de Mitigación	47
6.2.	1996 - Producción de Sulfato de Potasio Ácido Bórico con ampliación de la capacidad productiva de Cloruro de Potasio	48
6.2.1.	Área de influencia	48
6.2.2.	Evaluación de Impacto Ambiental	48
6.2.3.	Medidas de Mitigación	49
6.3.	2005 - Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama	50
6.3.1.	Área de influencia	50
6.3.2.	Evaluación de Impacto Ambiental	50
6.3.2.	Medidas de Mitigación	51
6.4.	2009 - EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar	52
6.4.1.	Área de influencia	52
6.4.2.	Evaluación de Impacto Ambiental	52
6.4.3.	Medidas de Mitigación	55
6.5.	Discusión	55
7.	CONCLUSIONES	59
8.	REFERENCIAS	61
9.	ANEXOS	66
9.1.	Descripción de proyectos en el Salar de Atacama	66
9.2.	Impactos Ambientales EIA y actividad que lo produce	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales salares con contenido de Li en la Meseta Andina	2
Figura 2 Usos del litio 2010.....	8
Figura 3 Usos del litio 2020.....	9
Figura 4 Tipos de recursos y reservas, productos principales y aplicaciones del litio	11
Figura 5 Distribución recursos mundiales 2020	13
Figura 6 Distribución reservas mundiales 2020	14
Figura 7 Cono de descenso del nivel freático formado alrededor de un pozo de bombeo	18
Figura 8 Secciones transversales verticales esquemáticas de un acuífero que contiene numerosos pozos de bombeo	19
Figura 9 Representación esquemática de la extracción y procesamiento de litio con la tecnología evaporítica actual.....	21
Figura 10 Ubicación Salar de Atacama	23
Figura 11 Grandes estructuras morfológicas del Salar de Atacama	25
Figura 12 Grandes unidades geológicas que delimitan la cuenca del Salar de Atacama	26
Figura 13 Esquema hidrogeológico del Salar de Atacama	28
Figura 14 Sitios de protección ambiental en Cuenca del Salar de Atacama	31
Figura 15 Línea de tiempo marco regulatorio chileno	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Recursos y reservas de distintas fuentes	12
Tabla 2 Recursos mundiales	13
Tabla 3 Reservas mundiales	14
Tabla 4 Proyectos sometidos a Evaluación de Impacto Ambiental en el Salar de Atacama	41
Tabla 5 Proyectos sometidos a Evaluación de Impacto Ambiental en Antofagasta relacionados al Salar de Atacama.....	43
Tabla 6 Impactos ambientales EIA 1994 MINSAL.....	46
Tabla 7 Impactos ambientales EIA 1996 MINSAL.....	48
Tabla 8 Impactos ambientales EIA 2005 SQM.....	51
Tabla 9 Impactos ambientales EIA 2009 SCL	53
Tabla 10 Impactos ambientales EIA	71



NOMENCLATURA

Unidades de medida

ha	Hectárea
Km	Kilómetros
l/s	Litros por segundo
m	Metros
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
Mt	Millones de toneladas

Abreviaturas

CCHEN	Comisión Chilena de Energía Nuclear
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción
CODELCO	Corporación Nacional del Cobre
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
DGA	Dirección General de Aguas
ENAMI	Empresa Nacional de la Minería
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
RCA	Resolución de Calificación Ambiental
SEA	Servicio de Evaluación Ambiental
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos/ United States Geological Survey
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
SEIA	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
SCL	Sociedad Chilena de Litio
SQM	Sociedad Química y Minera de Chile
YLB	Yacimiento de Litio Boliviano

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto general del litio a nivel mundial

El litio es un elemento de la tabla periódica perteneciente al grupo de los metales alcalinos, es el metal más liviano y de menor densidad, propiedades que le permiten ser un excelente conductor eléctrico y térmico (Garcés, 1998).

Debido a estas propiedades el litio ha ido tomando mayor importancia en el último tiempo, siendo un elemento crítico de interés global. Usado en una amplia gama de industrias como lubricantes, cerámicas, vidrios, aleaciones, medicamentos y baterías (L. Munk et al., 2016). Adicionalmente es considerado fundamental para la industria nuclear debido a que se utiliza en la fabricación de Tritio (Giegerich et al., 2019).

Por otro lado, el mundo se ha visto afectado por el calentamiento global y uno de los causantes de esta crisis es el uso de los combustibles fósiles. Una opción para cambiar esta dependencia de ese tipo fuentes energéticas es el uso de baterías ion Litio, para almacenar eficientemente electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables (Choubey et al., 2016).

Las baterías ion Litio son sistemas de almacenamiento de energía eléctrica que pueden tener diferentes propiedades y características físicas dependiendo del uso. En la actualidad estas baterías son usadas en teléfonos móviles, computadoras portátiles, trenes y vehículos eléctricos. Debido a la gran versatilidad de usos se ha generado un rápido desarrollo de la tecnología, donde destaca su utilización para el cambio de matriz energética en el sector del transporte hacia la movilidad eléctrica (Oliveira et al., 2015). Las baterías usadas en vehículos eléctricos se pueden componer de varios elementos, pero las que contienen litio son las más prometedoras debido a que proveen mayor potencia, energía y una mayor vida útil (Opitz et al., 2017).

El litio requerido para fabricar las baterías se puede encontrar en diversas fuentes, está presente en minerales como la Espodumena, la Petalita y la Lepidolita, pero también en salmueras y en agua de mar. En esta última, aún no es viable económicamente su extracción (Zhang et al., 2019).

1.2. Recursos en las salmueras de Sudamérica, el triángulo del litio

La extracción del litio es menos costosa en las salmueras que en minerales, y además representan la mayor fuente de recursos mundiales conocidos (Grosjean et al., 2012). Las salmueras son soluciones altamente salinas en donde los sólidos disueltos tienen valores más altos que en el agua de mar (Flexer et al., 2018). Las salmueras ricas en litio se encuentran en diversas partes del mundo, pero por sus particulares condiciones geográficas hay una gran cantidad en Argentina, Bolivia y Chile (L. Munk et al., 2016), zona denominada “Triángulo del Litio” que supone el 58.7% de los recursos mundiales conocidos (USGS, 2020). En la figura 1 se muestra la ubicación de, los 29 salares con contenidos de litio que se encuentran en el triángulo del litio.



Figura 1. Principales salares con contenido de Li en la Meseta Andina. (Modificado de López Steinmetz & Fong, 2019)

Esta zona de Sudamérica es ideal para la explotación de litio mediante procesos de concentración por evaporación debido a que las salmueras se encuentran en regiones áridas con tasas altas de evaporación y pocas precipitaciones (López Steinmetz & Fong, 2019).

Geográficamente el triángulo del litio está delimitado al Norte por el Salar de Uyuni (Bolivia), al Este están los salares de las provincias de Jujuy, Salta y Catamarca (Argentina), y finalmente en el oeste destaca el Salar de Atacama (Chile).

El fácil acceso, la tecnología simple de extracción, los bajos costos de los procesos y los altos contenidos de litio, son parámetros que convierten el triángulo del litio en una zona de interés a nivel mundial (Gundermann & Göbel, 2018).

Los sitios desde donde se extrae la salmuera del subsuelo y se procesa, no requieren instalaciones mineras complejas, ni equipamiento, y por ello tienen un bajo costo operacional comparándolo con la obtención del litio a través de minerales que si requieren instalaciones mineras complejas (COCHILCO, 2013).

En términos de cantidad de recursos, Bolivia es el país que tiene la mayor cantidad del mundo con 21 millones de toneladas (Mt) de litio, Argentina ocupa el segundo lugar con 17 Mt y Chile es el tercer país en cantidad de recursos a nivel mundial con 9 Mt (USGS, 2020).

Las políticas y regulaciones con respecto a la extracción del litio en los tres países del triángulo son distintas y por lo tanto el contexto de la explotación del litio debe analizarse en cada caso teniendo en cuanta estas diferencias.

En Argentina los permisos de exploración y explotación no varían respecto a los de otros minerales, y la propiedad minera corresponde a cada provincia.

En Bolivia la propiedad del litio es estatal y está en manos de la empresa estatal Yacimientos del Litio Boliviano (YLB) (Jerez, 2018).

En Chile, el litio fue declarado mineral estratégico y de interés nacional en el año 1979 debido a su importancia en la producción de energía nuclear en donde se hacían estimaciones del rol que cumpliría el litio en el futuro (COCHILCO, 2009), dada esta reservación para el Estado no se pueden realizar concesiones de manera similar a otros minerales, pero si se mantienen vigentes las concesiones obtenidas antes de ese año, en donde algunas instituciones estatales eran dueñas de éstas.

Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en el año 2020, Chile tiene las mayores reservas del planeta con 8.6 millones de toneladas (USGS, 2020). El Salar de Atacama es el tercer salar más grande del mundo (M. Marazuela et al., 2020) y es el mayor yacimiento de litio en producción (Ministerio de Energía y Minería, 2017). El organismo del Estado denominado Corporación de Fomento a la Producción (en adelante CORFO) tiene la concesión del 54.6 % de las

pertenencias del Salar de Atacama, y controla el arriendo de concesiones a las empresas privadas. No obstante, estas empresas también deben contar con la autorización de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) para poder comercializar el Litio extraído (COCHILCO, 2013).

1.3.El Salar de Atacama en Chile

El Salar de Atacama, está ubicado en la región de Antofagasta, al sur del pueblo San Pedro de Atacama. Es una cuenca activa gigante en el flanco occidental de la Meseta Andina Central en el hiperárido Desierto de Atacama (L. A. Munk et al., 2018).

En la salmuera del salar de Atacama además de litio, hay altas concentraciones de Potasio y Boro, y un bajo contenido en Magnesio, lo que favorece el proceso de tratamiento y extracción del litio (Gajardo, 2014). Además la concentración promedio de litio en el Salar de Atacama es la más alta del mundo (1400 mg/L)(L. Munk et al., 2016). Factores como el clima, la proporción de potasio-litio y magnesio-litio, y la gran superficie del salar son claves para determinar la viabilidad y eficiencia en la recuperación de litio a partir de salmueras (COCHILCO, 2013).

La explotación del litio en el Salar de Atacama se hace mediante el bombeo de las salmueras que se encuentran en los acuíferos subterráneos del salar a través de una densa red de pozos(M. Marazuela et al., 2020) de alrededor de 440 pozos de extracción (M. A. Marazuela et al., 2019b; SQM, 2018b). La salmuera bombeada en estos pozos se canaliza hacia piscinas en la superficie del salar en donde se evapora y precipitan las sales que contiene la salmuera. Una parte del exceso de salmuera una vez procesada se reinyecta o infiltra nuevamente al acuífero (M. A. Marazuela et al., 2019b).

La producción actual en el salar de Atacama la realizan dos empresas privadas, Albemarle y Sociedad Química y Minera de Chile (SQM) (Ministerio de Minería, 2016). En el año 2017 en el salar la producción de ambas empresas fue de 80 417 toneladas de litio equivalente, incrementándose un 4.1% respecto al año anterior (2016), de las cuales el 90% fue Carbonato de Litio (COCHILCO, 2018).

Las actividades de ambas empresas son reguladas por la CORFO, la CCHEN, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y la Dirección General de Aguas (DGA) (COCHILCO, 2013).

1.4. Aspectos ambientales asociados a la explotación de litio en Chile

El crecimiento económico de Chile ha sido acompañado por el desarrollo de la minería, no obstante, también de la contaminación atmosférica, la escasez de agua, la pérdida de hábitats, la contaminación de agua y suelos, lo que conlleva a una gran presión sobre el medioambiente (Garces et al., 2017).

La extracción de litio desde salmueras tiene procedimientos de extracción con impactos ambientales más leves respecto de la extracción de minerales convencionales, pero no se tiene certeza del impacto general de todo el proceso. Especialmente hay dudas respecto al equilibrio hidrológico y a la generación de residuos. Esto es una inconsistencia si se considera que la industria del litio está asociada a energías renovables, limpias y a una transición energética más sustentable, sin embargo las prácticas de las empresas que lo producen no están libres de generar impactos ambientales (Flexer et al., 2018).

El auge en la producción de la energía verde pronostica un aumento en la demanda de litio, lo que implica un aumento de las cantidades extraídas de salmuera. Esto puede producir mayores impactos ambientales. Es por eso que el estudio de estos sistemas y la comprensión de la hidrodinámica de los salares es importante para prevenir impactos, y así realizar una mejor gestión ambiental (M. A. Marazuela et al., 2019b).

En el salar de Atacama se han registrado en los últimos años diversos cambios debido a la minería, como son una menor disponibilidad de territorio para pastoreo, contaminación, cambios en las prácticas sociales y culturales de las localidades cercanas (Liu et al., 2019).

El Salar de Atacama es importante desde un punto de vista económico, pero también desde un punto de vista ecológico. En los bordes del salar existen zonas de flora y fauna, y en el núcleo del salar hay zonas de vegas y bofedales, que la DGA ha delimitado e identificado como zonas sensibles, debido a su importancia ambiental (DGA, 2010).

A finales del año 2015 se crea la Comisión Nacional del Litio con el fin de tener un mejor diagnóstico del acontecer del recurso. La comisión concluye que hay una falta de control y conocimiento sobre los salares, y se determina que los salares constituyen un ecosistema complejo y frágil que deben ser gestionados por el Estado, en cuanto a su protección, conservación y manejo sustentable (Ministerio de Minería, 2016).

La falta de control y conocimiento sobre el uso adecuado recurso hídrico puede afectar a la flora y la fauna del salar, así como a los asentamientos humanos que están establecidos cerca del salar. (Babidge, 2019).

Los antecedentes señalados acerca del contexto actual de la explotación de Litio en Sudamérica y especialmente en Chile, permiten identificar una serie de impactos ambientales en el entorno de los salares.

Sin embargo, la transición a la movilidad eléctrica y el uso de energías más limpias están en auge y el litio es necesario para estos fines.

En este trabajo se plantea una revisión bibliográfica que abarca distintas áreas de la explotación del litio con el objetivo de caracterizar la situación en el triángulo del Litio haciendo énfasis en los aspectos ambientales de su explotación y sus perspectivas de futuro, tomando como caso de estudio al Salar de Atacama.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es identificar y contextualizar los impactos ambientales debidos a la explotación del litio en el Salar de Atacama.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Establecer el contexto general de la explotación del litio en Sudamérica.
2. Establecer el contexto de la explotación del litio en el Salar de Atacama, Chile.
3. Analizar los métodos de explotación de litio en base a salmueras.
4. Analizar el contexto legal aplicable en Chile sobre el litio y los salares.

5. Definir el rol de las empresas privadas y organismos públicos involucrados en la explotación del Litio en Chile.
6. Analizar las medidas de gestión ambiental en Chile relacionadas a la explotación de litio.
7. Analizar los impactos ambientales generados por la explotación de litio en salmueras.

1.6. Alcances

El estudio realizado tiene un carácter plenamente académico y se basa exclusivamente en información pública y estudios científicos publicados. El trabajo no abordará la dimensión social del problema ni los aspectos relativos a las comunidades indígenas afectadas por la explotación de litio.



2. LA INDUSTRIA DEL LITIO

2.1. Usos y aplicaciones

En el año 1817 el geólogo sueco Johan Arfvedson descubrió el litio, pero no fue aislado como metal hasta el año 1855. El litio metálico tuvo una demanda baja hasta la segunda guerra mundial, momento en el cual aumento su demanda porque comenzó a utilizarse en la fabricación de lubricantes, y posteriormente en bombas de hidrógeno (Aral & Vecchio-Sadus, 2008).

El litio tiene actualmente múltiples usos. Se utiliza para producir grasas lubricantes, en fundición de colada continua, para la fabricación de vidrios y cerámicas, como absorbente en acondicionadores de aire, en aleaciones de aluminio y también en productos farmacéuticos, pero en los últimos años destaca por su utilización para la fabricación de las baterías de iones de litio recargables (Aral & Vecchio-Sadus, 2008; Figueroa et al., 2012; L. Munk et al., 2016; Yaksic & Tilton, 2009).

El consumo de litio ha tenido un incremento cercano al 9% anual en la última década (Poveda, 2020) y especialmente la cantidad destinada a baterías que ha tenido un incremento en los últimos 10 años de un 42 %, (véase figuras 2 y 3). (USGS, 2010, 2020).

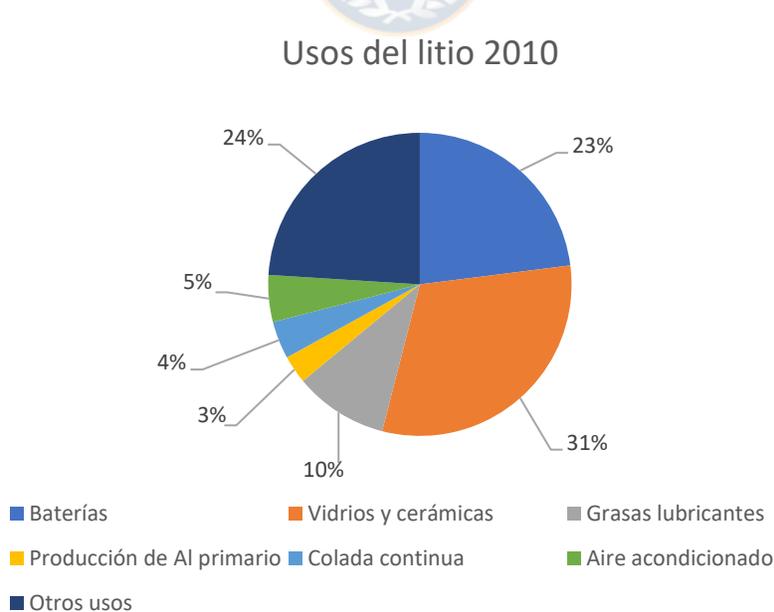


Figura 2 Usos del litio 2010

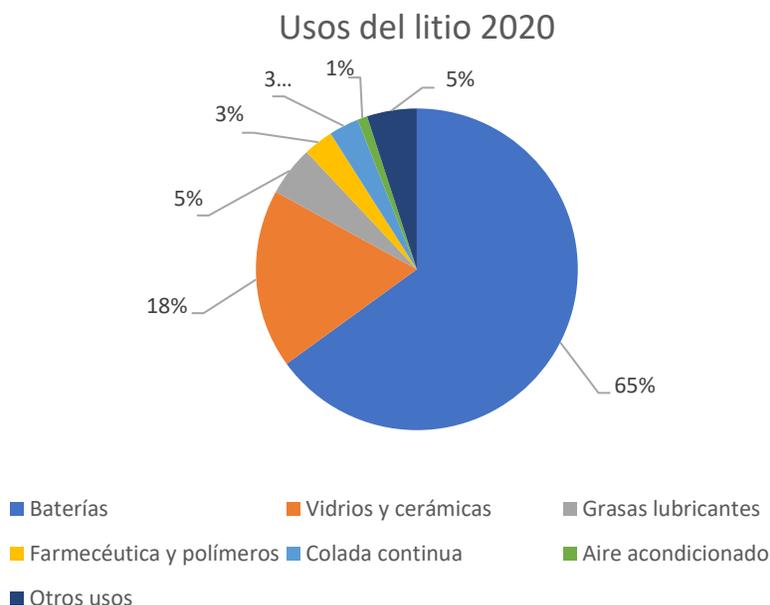


Figura 3 Usos del litio 2020

El litio además tiene utilidad en la fusión nuclear, en donde se utilizan dos isótopos pesados del hidrogeno, el deuterio (D) y el tritio (T). El deuterio se encuentra fácilmente en la naturaleza mientras que el tritio es un isotopo radioactivo muy escaso, que se puede obtener bombardeando un isótopo del litio (Litio-6) con neutrones. En un reactor de fusión, el deuterio y el tritio se fusionan y generan neutrones los cuales son absorbidos por un manto cerámico con contenido del litio. El litio-6 cuando absorbe un neutrón se divide en helio y tritio, el cual sirve como combustible del reactor, además el litio es usado en el manto como refrigerante y medio de transporte calorífico (COCHILCO, 2013).

2.2. Formas comerciales de litio

Se comercializan varios tipos de compuestos del litio. Los principales compuestos o formas comerciales del Litio y sus usos se detallan a continuación (COCHILCO, 2018).

2.2.1. Carbonato de litio (Li_2CO_3)

Se utiliza principalmente en aplicaciones de almacenamiento de energía, fabricación de vidrio y cerámica. También se utiliza como materia prima en la producción de hidróxido de litio y compuestos especiales de litio. En aplicaciones de almacenamiento de energía, el uso de carbonato

de litio se focaliza en baterías para dispositivos electrónicos portátiles y vehículos eléctricos que requieren una menor densidad de energía. El carbonato de litio, según su nivel de pureza, se clasifica en grado técnico y grado batería. El grado técnico generalmente se compone de un mínimo de 99% de carbonato de litio, mientras que el grado batería contiene un mínimo de 99,2% - 99,5% de carbonato de litio. El grado batería tiene menores impurezas, tales como como magnesio, sodio y potasio, por lo que requiere un procesamiento adicional, generando mayores costos de producción.

2.2.2. Hidróxido de litio (LiOH)

Se clasifica en hidróxido de litio grado batería e hidróxido de litio grado técnico.

El hidróxido de litio grado batería es usado principalmente para producir cátodos con alto contenido de níquel, los que permiten producir baterías con mayor densidad de energía para que los vehículos eléctricos logren un mayor rango de conducción. Por lo anterior se prevé que este tipo de cátodos se adopten con mayor fuerza en el mercado de baterías en los próximos años, lo que aumentará significativamente su demanda.

El hidróxido de litio grado técnico se utiliza en grasas para automóviles, aviones, vagones de trenes, equipos agrícolas o maquinaria. Las grasas de litio no son corrosivas, son versátiles y tienen buen rendimiento frente a diferentes temperaturas y condiciones climáticas. El grado técnico y batería de este compuesto está conformado por un mínimo de 56,5% de hidróxido de litio, sin embargo, el grado de batería contiene menos impurezas, como dióxido de carbono, cloro y sulfato. Se estima que al año 2027 el hidróxido de litio de grado de la batería representará el 45,4% de la demanda de litio.

2.2.3. Butil-litio (C₄H₉Li):

Se utiliza en la fabricación de caucho sintético (neumáticos), polímeros y como reactivo químico para la síntesis de determinados compuestos orgánicos, ingredientes farmacéuticos activos, agroquímicos y materiales electrónicos.

2.2.4. Cloruro de litio (LiCl):

Se usa principalmente en sistemas de aire acondicionado y deshumidificadores de aire. Es la materia prima para obtener litio metálico a través de electrólisis, también se usa en el control de humedad y de zeolitas.

La figura 4 ilustra la distribución de los recursos de litio, los tipos de reserva de litio, los compuestos y usos.

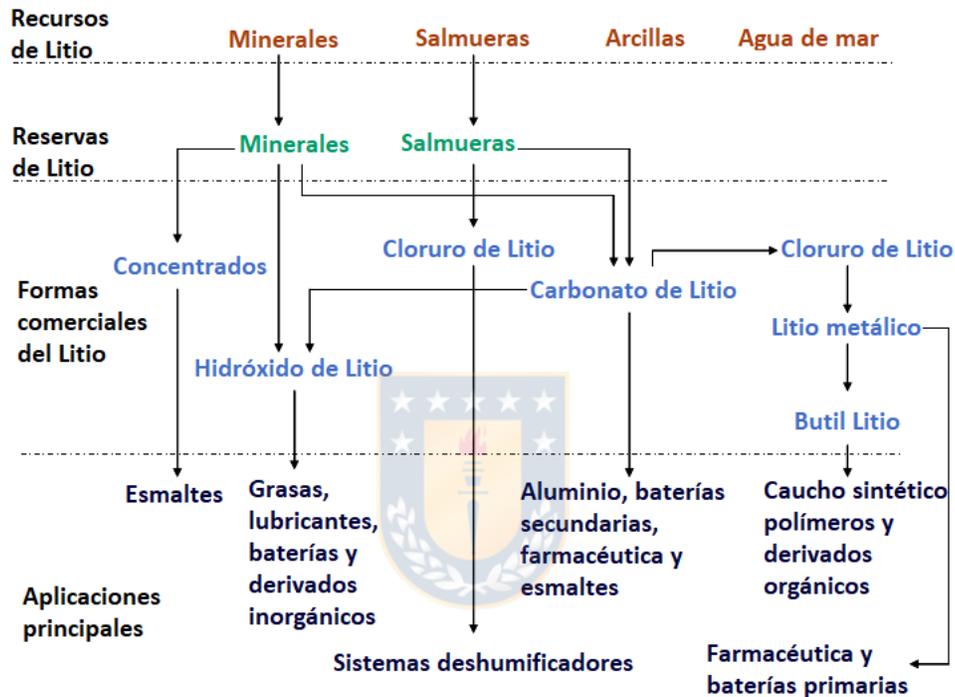


Figura 4 Tipos de recursos y reservas, productos principales y aplicaciones del litio (Modificado de (Yaksic & Tilton, 2009))

2.3. Recursos y reservas de litio

El litio que se explota y se procesa en sus diferentes formas comerciales no sólo está presente en salmueras, rocas pegmatíticas y agua de mar, sino que también se encuentra en rocas sedimentarias (hectoritas) y campos de petróleo (COCHILCO, 2013). Las cantidades aproximadas de recursos y reservas van cambiando a medida que se hacen más exploraciones y cambian los parámetros de rentabilidad de su explotación (Yaksic & Tilton, 2009).

Es importante mencionar que hay discrepancias significativas entre los diferentes autores, respecto de las cantidades de recursos y reservas a nivel mundial. Oliveira (2015) presenta una

recopilación de estimaciones realizadas por diferentes autores de recursos y reservas cuantificados entre 2007 y 2013, (Tabla 1). Este trabajo pone de manifiesto grandes diferencias en las estimaciones según la fuente consultada y la importancia de una cuantificación sistemática y veraz.

Tabla 1 Recursos y reservas de distintas fuentes (Modificado de Oliveira et al., 2015)

Referencia	Año	Depósitos incluidos	Reservas (Mt)	Recursos (Mt)
Mohr et al.	2012	45	23	71
Evans	2013	24	n/a	30
Grosjean et al.	2012	77	n/a	37-43
Kesler et al.	2012	35	n/a	38
Vikström et al.	2013	112	15	65
Kushnir and Sandén	2012	n/a	30	n/a
Yaksic and Tilton	2009	40	29	64
Tahil	2007	15	5	19
USGS	2014	8	13	40
Gruber et al.	2011	61	n/a	31

Una de las fuentes más confiable al respecto es el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Cada año el USGS hace una cuantificación exhaustiva de los recursos y reservas de diversos minerales en el mundo, entre ellos el litio. Para el año 2020 los recursos mundiales cuantificados por el USGS son de 79.8 Mt, mientras que las reservas son 17 Mt. En la tabla 2 y en la tabla 3 se presentan los países con mayor cantidad de recursos y reservas, respectivamente.

Bolivia y Argentina tienen en conjunto la mayor cantidad de recursos mundiales, cada uno de estos países cuenta con más de la quinta parte del total mundial individualmente (figura 5) (USGS, 2020). Bolivia es el líder mundial en cuanto a recursos, pero no figura dentro de los países con mayores reservas, esto se debe a que los recursos presentan una alta concentración relativa de magnesio, elemento que dificulta el procesamiento y, por lo tanto, no son considerados rentables (COCHILCO, 2020).

Chile en este estudio tiene cuantificados 9 Mt de recursos y 8.6 Mt de reservas este dato posiciona a Chile como el país con mayores reservas del mundo con el 50% del total (figura 6), en gran parte por el Salar de Atacama.

Australia es otro país que cuenta con importantes recursos y reservas proveniente de minerales, además de las dos potencias mundiales, China y Estados Unidos con números significativos en la distribución de los recursos.

Tabla 2 Recursos mundiales (toneladas·10³)

País	Recursos
EE. UU.	6800
Bolivia	21000
Argentina	17000
Chile	9000
Australia	6300
China	4500
Congo	3000
Alemania	2500
Otros	9479

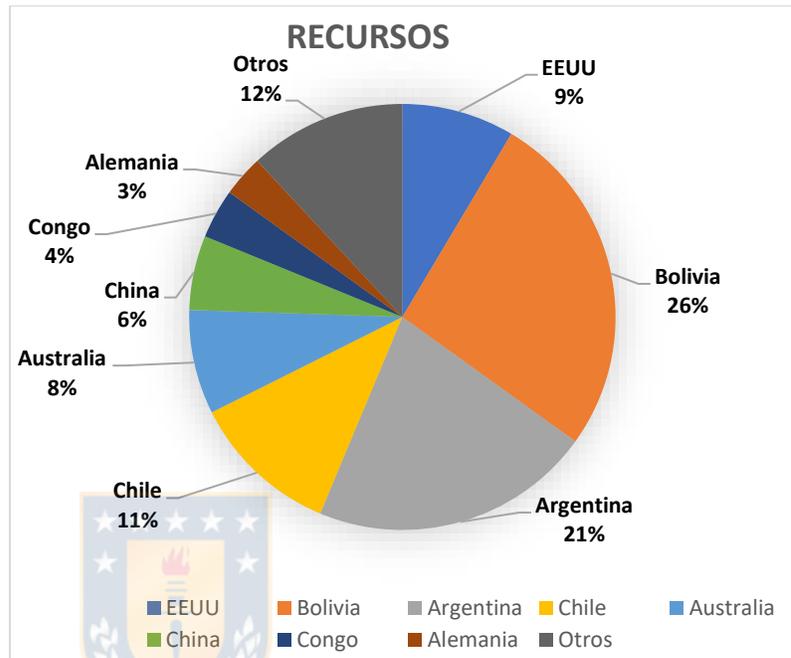


Figura 5 Distribución recursos mundiales 2020

Tabla 3 Reservas mundiales
(toneladas·10³)

País	Reservas
EE. UU.	630
Argentina	1700
Australia	2800
Brasil	95
Canadá	370
Chile	8600
China	1000
Portugal	600
Zimbabue	230
Otros	1100

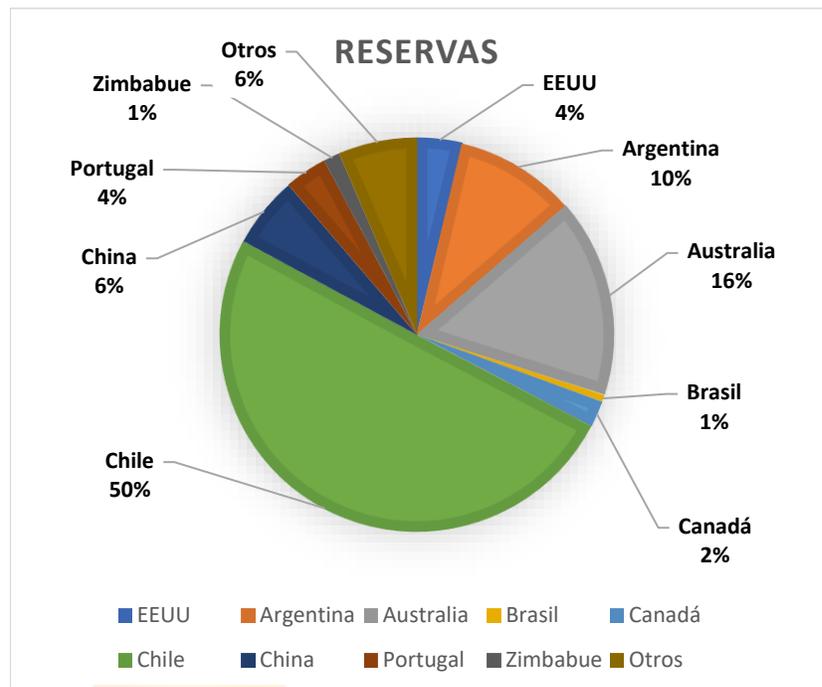


Figura 6 Distribución reservas mundiales 2020

2.4. Tipos de yacimientos

Los yacimientos de litio están distribuidos en todo el mundo, pero sólo unos pocos de ellos son adecuados para que su extracción sea viable económicamente (COCHILCO, 2013).

Los yacimientos de litio en rocas se encuentran principalmente en Australia, Canadá, Estados Unidos, República Democrática del Congo y Serbia (Mohr et al., 2012). El principal tipo de roca que se encuentra en este tipo de yacimientos es la pegmatita (COCHILCO, 2013) que es una roca ígnea intrusiva formada como parte del proceso de enfriamiento y cristalización de magma. La Espodumena, la Lepidolita y la Petalita son minerales con contenido de litio que usualmente se encuentran en rocas pegmatíticas (COCHILCO, 2018). Estos depósitos tienen como factores claves la concentración del litio y el contenido de hierro, que se considera como una impureza (Mohr et al., 2012).

Los salares corresponden a depósitos salinos continentales generados en cuencas endorreicas con altas tasas de evaporación y bajas tasas de precipitación (Gajardo, 2014). Las

salmueras son soluciones acuosas en donde las sales minerales muestran concentraciones mucho más altas que en el agua de mar (Flexer et al., 2018). Dentro de las salmueras con contenidos de litio, puede diferenciarse entre salmueras continentales, salmueras geotérmicas o salmueras de campos petroleros (COCHILCO, 2018). Las salmueras continentales de litio son las más comunes y se encuentran principalmente en Argentina, Bolivia, Chile, China y Estados Unidos.

Estos depósitos de salmueras continentales de litio tienen varios factores importantes que se deben considerar y que varían en cada salar. Estos factores son la concentración de litio, la proporción de magnesio - litio, la concentración de potasio, la tasa de evaporación, la superficie del salar, y el clima. A mayor tasa de evaporación y concentración de litio se reduce la cantidad de tiempo en que las salmueras permanecen en los estanques de evaporación, una mayor concentración de potasio permite menos costos debido a que también es un producto que tiene un valor económico. Por otro lado los altos contenidos de magnesio aumentan los costos de explotación ya que es difícil separar el magnesio del litio (COCHILCO, 2009; Mohr et al., 2012). La concentración de litio en las salmueras es variable, pero la gran mayoría yacimientos tienen concentraciones entre los 200ppm y los 700 ppm (Choubey et al., 2016).

2.5. Métodos de explotación

El tipo de yacimiento determina el método de extracción a utilizar. En el caso de yacimientos de roca, las tecnologías no difieren a los métodos mineros utilizados convencionalmente para la obtención de otros minerales. Mientras que para la extracción desde litio a partir de salmueras continentales en salares, se utilizan métodos no convencionales mediante pozos de bombeo y posterior evaporación.

2.5.1. Yacimientos de roca

Uno de los procedimientos de extracción actuales es la explotación de pegmatitas ricas en litio a partir de las cuales se obtiene carbonato de litio o hidróxido de litio (COCHILCO, 2009). Los más usuales son los de Espodumena, Lepidolita y Petalita.

La gran mayoría de estos depósitos de roca se encuentran cercanos a la superficie y se utilizan métodos mineros de rajo abierto.

El mineral es sometido a procesos de conminución, separación en medio denso, molienda y clasificación. Luego son separados por flotación o magnéticamente. Los últimos pasos son el filtrado, lavado y secado del concentrado obtenido (COCHILCO, 2013).

2.5.2. Yacimientos de salmueras

La mayor producción de compuestos comerciales de litio proviene de salmueras ricas en litio (Flexer et al., 2018), que además son la fuente menos costosa y el método de explotación es más simple y fácil de ejecutar (Flexer et al., 2018; L. Munk et al., 2016).

El procedimiento de extracción utilizado actualmente y el único ejecutado en el Salar de Atacama, es el de evaporación solar y concentración de salmueras para obtener posteriormente carbonato de litio o cloruro de litio (COCHILCO, 2009).

A finales de los años 60 la recuperación de litio a través de salmueras tuvo un fuerte impacto en la industria, debido a sus bajos costos en comparación con los métodos de explotación utilizados en materiales pegmatíticos (COCHILCO, 2009). El proceso consiste en extraer las salmueras de acuíferos subterráneos mediante bombas y luego se transportan a estanques de evaporación, en donde se concentra el litio en varias etapas hasta obtener una salmuera concentrada con más de 4% de litio.

Este proceso de evaporación se da de forma natural y demora entre 12 y 24 meses, la solución concentrada es tratada en una planta química para purificarla y posteriormente se precipita el litio en la forma de carbonato. También existe la posibilidad de obtener cloruro de litio directamente de la salmuera (COCHILCO, 2013).

Es importante aclarar y comparar con la minería convencional de roca, sobre el concepto extracción, en donde se asocia principalmente con la explotación exitosa de un depósito mineral, es decir, la separación física de los minerales de los depósitos naturales. Para los efectos de la obtención de litio, esto es equivalente a bombear salmuera del salar y al igual que en minería convencional, los minerales deben procesarse, para obtener un producto con un determinado grado de pureza (Flexer et al., 2018).

La composición de la salmuera, el volumen y la accesibilidad son parámetros que determinan la viabilidad de la producción de litio (Kesler et al., 2012). La composición puede variar y tener distintos elementos como potasio, sodio, calcio, magnesio, hierro, boro, bromo, cloro, nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos (COCHILCO, 2009).

El clima, la geología e hidrología del salar también son factores importantes para tener en cuenta porque pueden marcar diferencias importantes en los costos de operación. Aspectos como las tasas de evaporación y precipitación influyen en el tiempo que dura el proceso (Flexer et al., 2018). Por otro lado, es importante evaluar las condiciones políticas, económicas, ambientales y sociales del entorno del salar, las cuales incurren directamente en los permisos de explotación.

Las concentraciones de litio en la salmuera de manera natural son muy bajas para ser consideradas una fuente de extracción directa, está debe ser concentrada previamente. Usar la evaporación solar abundante es una ventaja en este método, debido al bajo costo energético que implica este paso. Es por eso que esta técnica es efectiva en áreas con climas áridos, en donde la tasa de evaporación es mucho mayor que la tasa de precipitación (Choubey et al., 2016).

Para extraer la salmuera se debe tener en cuenta como se compone el salar hídricamente. Generalmente albergan lagos, ecosistemas, y humedales muy singulares, los cuales se pueden ver afectados por el bombeo de salmuera. El caudal bombeado, los parámetros hidráulicos característicos de cada salar y la distribución de los pozos de bombeo son factores determinantes que deben ser controlados para prevenir la aparición de impactos ambientales (M. Marazuela et al., 2020).

Según López (2019) la hidráulica de un pozo de bombeo depende de los parámetros físicos que tenga el acuífero, así como también de las características específicas del pozo en sí, y del diámetro y profundidad de este. El funcionamiento de los pozos genera una disminución en el nivel freático del acuífero, esto genera un cambio en su geometría lo que provoca un cono de descenso del nivel freático alrededor del pozo. Los parámetros físicos del acuífero que deben considerarse en el diseño de los pozos de bombeo ilustrados en la figura 7 son el espesor del acuífero (b); la conductividad hidráulica horizontal (K_s) y vertical (K_z), respectivamente; la tasa de bombeo (Q); la capacidad de almacenamiento (S); la transmisividad (T) y la extensión del área horizontal del cono de goteo medida desde el pozo (R).

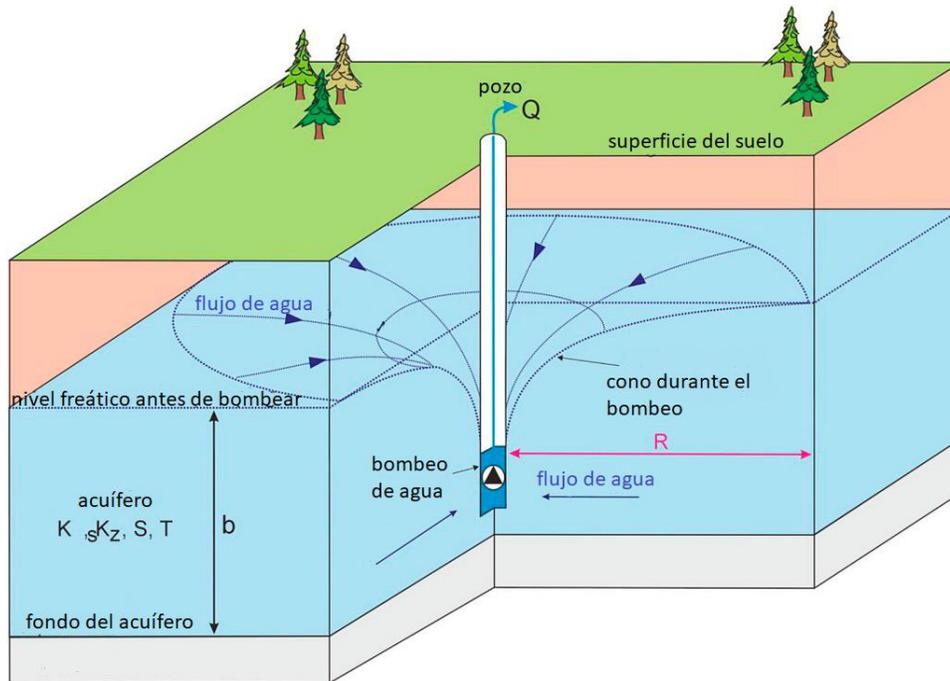


Figura 7 Cono de descenso del nivel freático formado alrededor de un pozo de bombeo (Modificado de López Steinmetz & Fong, 2019)

Existe una distancia R tal que el efecto de descenso del nivel freático es insignificante, esta distancia depende del espesor y la hidráulica del acuífero. Esta distancia R representa la extensión máxima del cono de descenso cuando se bombea a la máxima capacidad permitida por el acuífero.

El valor, R es el parámetro que permite definir la cantidad de pozos de bombeo necesarios para explotar la salmuera en un acuífero. Un distanciamiento menor a $2R$ provoca un cono de descenso del nivel freático y por lo tanto la interferencia entre pozos puede hacer que no cumplan con su objetivo (López Steinmetz & Fong, 2019) o se produzcan impactos ambientales. La figura 8 muestra ambos casos y esquematiza cómo se comporta el acuífero si se bombea desde dos pozos a una distancia mayor a $2R$ (figura 8.A), y cómo se comporta si la distancia es menor a $2R$ (figura 8.B) lo que resulta en una alimentación insuficiente en el fondo de los pozos y que el pozo se seque.

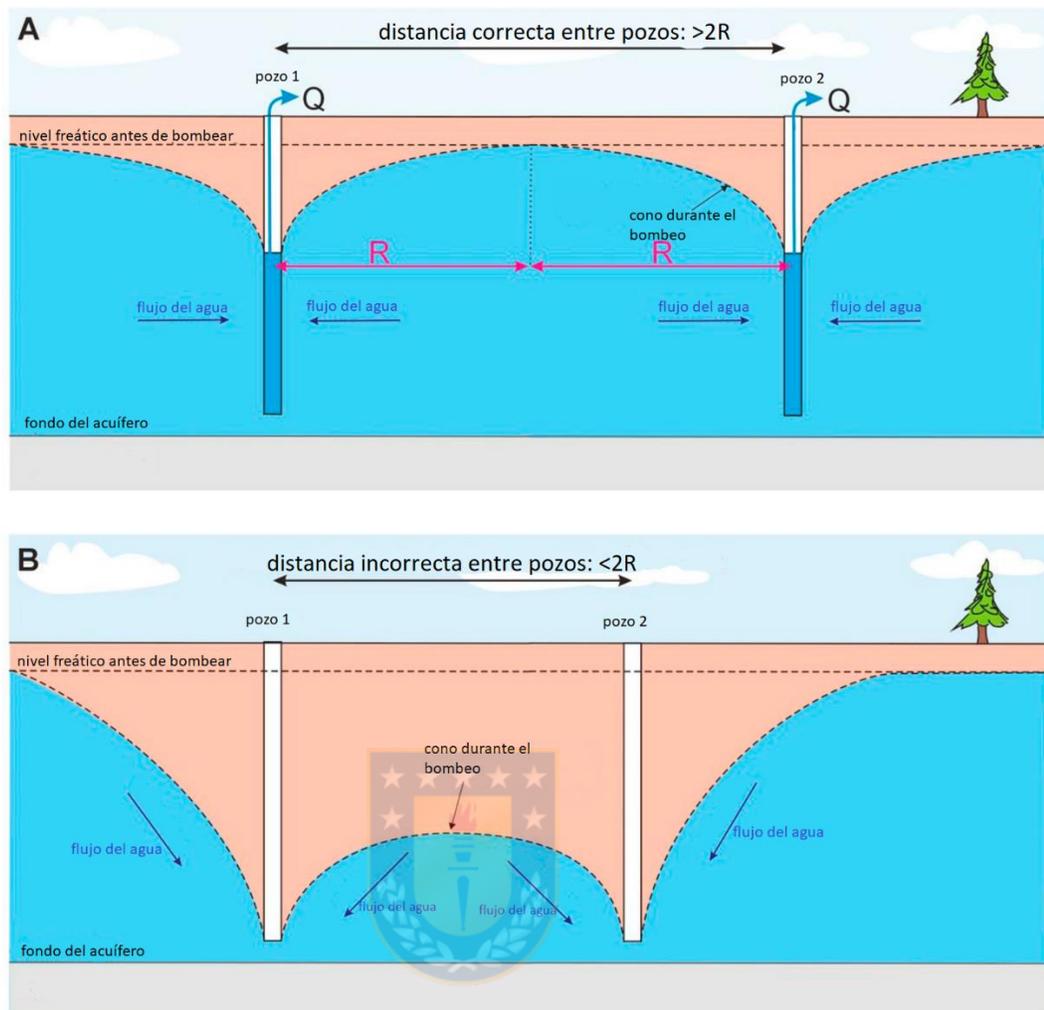


Figura 8 Secciones transversales verticales esquemáticas de un acuífero que contiene numerosos pozos de bombeo (Modificado López Steinmetz & Fong, 2019)

Por lo tanto, cuando se decide explotar un salar se debe tener en cuenta su comportamiento hidrodinámico en conjunto ya que el bombeo en un determinado punto del salar puede afectar a todo el sistema (Ministerio de Minería, 2014). Cuando se comienza a bombear la salmuera comienza inmediatamente una redistribución del recurso, esto se debe a que el fluido está sometido a tensión dinámica, el proceso de bombeo genera el cono de descenso anteriormente descrito en la superficie freática alrededor del pozo, y la forma de este cono estará dado por la permeabilidad y la capacidad de almacenamiento del acuífero, también de la velocidad y el tiempo de bombeo. La permeabilidad del acuífero es el factor de control para las tasas de extracción (Houston et al., 2011).

La relación entre el volumen de extracción y el volumen de almacenamiento determina la vida útil del proyecto.

Para estimar los recursos de una salmuera, se deben conocer principalmente 3 elementos (Houston et al., 2011):

- 1.- Geometría del acuífero
- 2.- Porosidad efectiva del acuífero
- 3.- Concentración de los elementos de interés

Los dos primeros determinan el volumen del recurso de salmuera, y junto a la concentración se determina la estimación.

Los pozos se operan a una profundidad que puede ser variable, para extraer la salmuera. Esto también depende de la profundidad del salar, por ejemplo en el Salar de Atacama se bombea desde 30 a 50 metros de profundidad (Barriga & Sanchez, 2017).

Luego del bombeo la salmuera es enviada a unas piscinas (o estanques) de evaporación de 1.5 m de profundidad y superficie de 600 m x 800 m o más (Wilkomirsky, 2008). En estos estanques en donde comienza la concentración por acción solar y eólica. Este proceso implica pasos sucesivos de evaporación con el fin de la precipitación y recolección de sales (Flexer et al., 2018) como cloruro de potasio o silvita (KCl), cloruro de sodio o halita (NaCl), sulfato de potasio (K_2SO_4), sulfato de sodio (Na_2SO_4), así como otras sales dobles como silvinita, carnalita, bishoffita, schoenita, kainita, glasserita, glauberita, eptonita, singerita entre otras.

Usualmente la primera sal que precipita es la halita (NaCl), luego continúa la silvinita (KCl – NaCl) y en tercer lugar la silvita (KCl), la cual es un producto industrial, por lo tanto, hacia el término de la precipitación de silvinita se transfiere a otra piscina y se recupera la sal precipitada de silvita más silvinita, luego continua la evaporación en donde se cristaliza carnalita ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6 H_2O$) y luego la bishoffita ($MgCl_2 \cdot 6 H_2O$) (Wilkomirsky, 2008).

Hasta este momento del proceso el litio se ha incrementado hasta un 4.5% aproximadamente con un contenido de magnesio cercano a 4%. Debido a que para la posterior purificación química de la salmuera se requiere tener entre 5.5 a 6% de litio, al proseguir la evaporación, precipita el cloruro doble de Li-Mg llamado carnalita de litio ($LiCl \cdot MgCl_2 \cdot 6 H_2O$) lo que disminuye el rendimiento de la

operación, sin embargo, es posible lixiviar la carnalita de litio con salmuera fresca para recuperar parte del litio contenido (Wilkomirsky, 2008).

La salmuera concentrada en litio contiene entre 5.5 a 6.0% de litio, equivalente a 35-40% de LiCl. Finalmente, este concentrado es enviado a una planta de tratamiento para eliminar el magnesio y otras impurezas (Wilkomirsky, 2008). En la figura 9 se muestra de manera simplificada el método descrito.

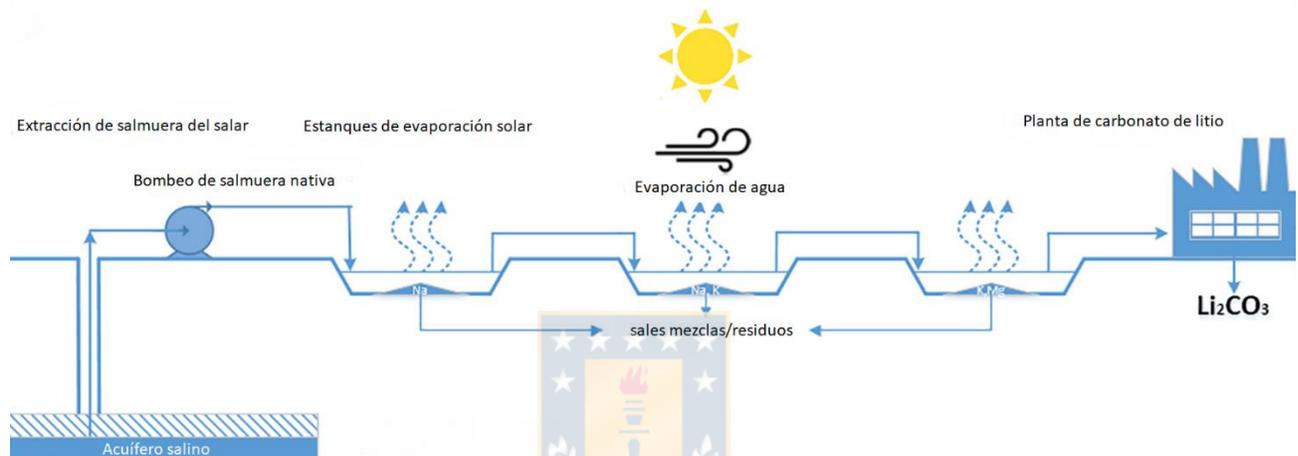


Figura 9 Representación esquemática de la extracción y procesamiento de litio con la tecnología evaporítica actual (Modificado Flexer et al., 2018)

3. ANTECEDENTES DEL CASO DE ESTUDIO: SALAR DE ATACAMA

3.1. Ubicación

El Salar de Atacama es el tercer salar más grande del mundo, proporciona servicios biológicos cruciales para las comunidades locales y para las diversas especies de flora y fauna (Liu et al., 2019). Este salar se encuentra en la cuenca del mismo nombre, en el desierto de Atacama y aproximadamente a unos 200 km al Este del Océano Pacífico (figura 10), en la región de Antofagasta (L. Munk et al., 2016).

La cuenca del Salar de Atacama tiene un área de 18 100 km² aproximadamente, es una cuenca endorreica que al Este está delimitada por la Cordillera de Los Andes y al Oeste por la Cordillera de Domeyko, siendo la evaporación la única salida natural del agua (Cornellà et al., 2009; DGA, 2016).

El salar se ubica en la parte topográficamente más baja de la cuenca a unos 2300 m.s.n.m., tiene forma de elipsoide con un eje mayor de 85 km y un ancho máximo de 50 km (Wolf von Igel Grisar, 2014) y tiene una superficie aproximada de 3500 km² (AMPHOS21, 2018). Hay diversos poblados cercanos al Salar de Atacama con una fuerte presencia de pueblos originarios, entre ellos Río Grande, Machuca, Talabre, Toconao, Camar, Socaire, Peine y San Pedro de Atacama (Gestión Ambiental Consultores, 2017).

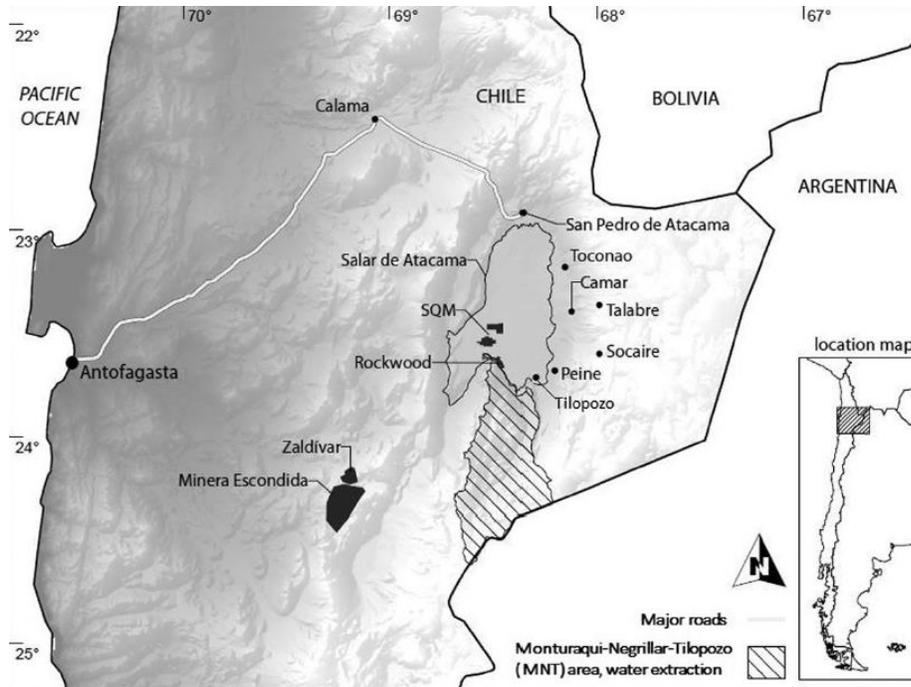


Figura 10 Ubicación Salar de Atacama (Babidge, 2019)

3.2. Marco Geológico

3.2.1. Geomorfología

La cuenca está formada por 7 grandes estructuras morfológicas (figura 11) de orientación principalmente norte-sur, de oeste a este son la Cordillera Domeyko, el Llano de la Paciencia, la Cordillera de la Sal, el Salar de Atacama, la Precordillera, la Cordillera de los Andes (donde se ubica el arco volcánico actual) y el Cordón de Lila al sur (AMPHOS21, 2018).

1. Cordillera de Domeyko: forma el margen oeste de la cuenca y se trata de un cordón montañoso de orientación aproximada NNE, cuyo límite oriental es un escarpe que coincide con el sistema de Falla el Bordo. Este cordón montañoso tiene una altura promedio de 3000 m.s.n.m.
2. Llano de la Paciencia: depresión con forma elipsoidal de 80 km de largo y 8 km de ancho, la orientación general de esta unidad es NNE, pero hacia el sur de la cuenca discurre principalmente N-S. Se trata de una cuenca endorreica que presenta una altura promedio de 2300 m.s.n.m.

3. Cordillera de la Sal: cordón montañoso de orientación NS a NE. Este cordón montañoso se caracteriza por la presencia de grandes pliegues y fallas que generan una estructura anticlinal que presentan una altura promedio de 2500 m.s.n.m.
4. Salar de Atacama: depocentro de la cuenca tectónica de forma elíptica y orientación N-S. El salar está constituido por depósitos salinos, que ocupan una superficie de aproximadamente 3500 km², la altitud media del salar es de 2300 m.s.n.m. El centro del salar se denomina núcleo y la superficie de éste presenta una costra levantada, formada por procesos de evaporación y cristalización de sales de los intersticios del material que cubre la superficie del núcleo, debido a la evaporación de la salmuera subterránea. Algunos autores también denominan al yacimiento costra salina. El yacimiento evaporítico muestra una zonación bien definida, siguiendo el orden de solubilidades de la secuencia de precipitación evaporítica clásica. En el borde este, se da la precipitación de carbonatos, seguida de la de sulfatos hacia el interior del salar, mientras que el núcleo, está formado principalmente por evaporitas cloruradas sódicas.
5. Cordillera Occidental: cordón montañoso de orientación N-S que forma el margen este del Salar de Atacama. Tiene una disposición declinada aproximadamente de 2° a 5°O y alcanza alturas promedio de 3500 m.s.n.m. Aparece cubierta por depósitos piroclásticos y de abanicos aluviales en su base.
6. Arco volcánico actual: cordón montañoso de orientación N-S que conforma el borde este de la cuenca de Atacama y que se corresponde con el arco volcánico actual. Presenta una topografía irregular con una altura media de 4200 m, aunque la cumbre de los volcanes actuales es próxima a 6000 m.s.n.m.
7. Cordón de Lila: cordón montañoso de orientación N-S que conforma el sur de la cuenca y limita parte del borde sur del salar. Constituye un bloque tectónico alzado con altura promedio de 3200 m.s.n.m., que hacia el norte desciende en altura hasta desaparecer en el Salar de Atacama. Su relieve es abrupto, cortado por numerosas quebradas de orientación NO y NE.

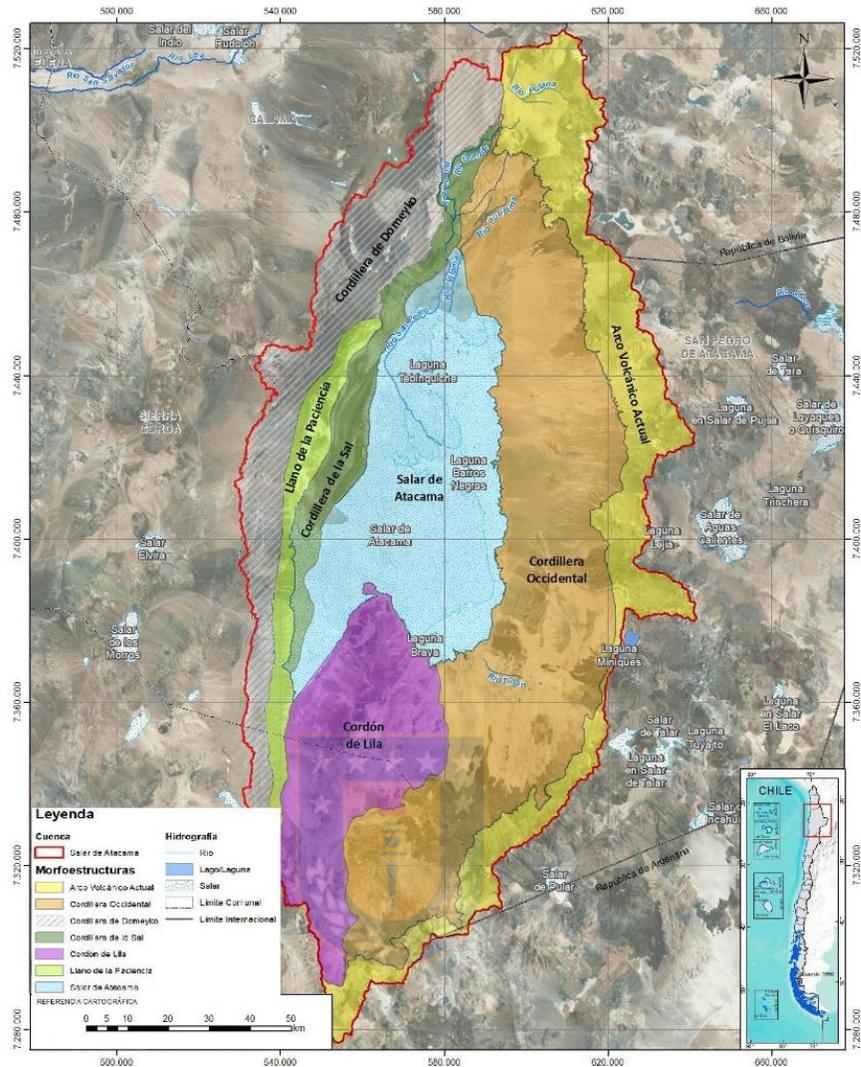


Figura 11 Grandes estructuras morfológicas del Salar de Atacama (Modificado de AMPHOS21, 2018)

3.2.2. Geología

La cuenca del Salar de Atacama es parte de la Cordillera de los Andes, las grandes unidades geológicas que la delimitan son la propia Cordillera de los Andes por el Este y en el margen Oeste por la Cordillera de Domeyko (AMPHOS21, 2018). En la figura 12 se destacan las grandes unidades geológicas que delimitan la cuenca.

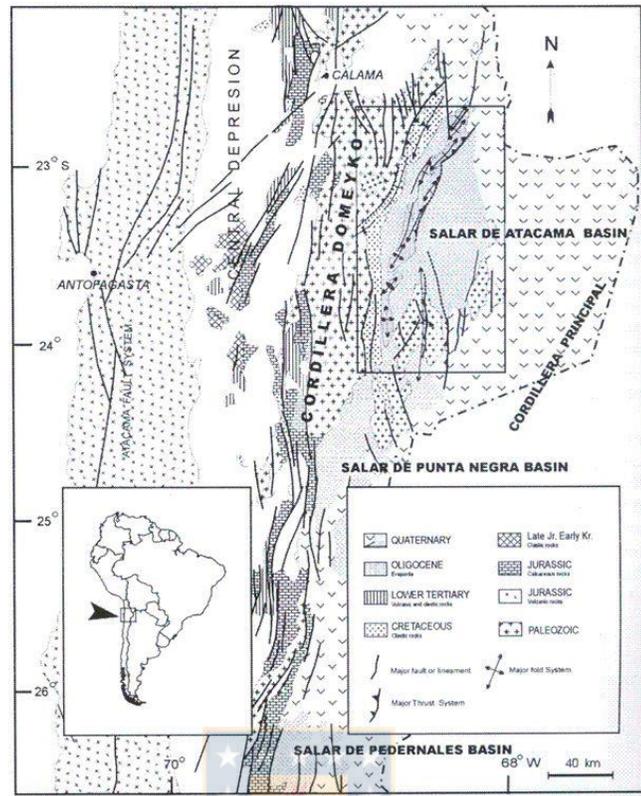


Figura 12 Grandes unidades geológicas que delimitan la cuenca del Salar de Atacama (AMPHOS21, 2018)

La parte de la Cordillera de los Andes que bordea el Salar de Atacama por el Este, está constituida por ignimbritas y volcanes de edad cenozoica de rocas ácidas como dacitas, andesitas y riolitas, también se encuentran algunos afloramientos de rocas sedimentarias más antiguas como areniscas, conglomerados y lutitas.

Por otro lado, la Cordillera de Domeyko, al Oeste del salar, es una compleja sucesión de formaciones volcánicas y sedimentarias de edad paleozoica a terciaria donde predominan, por lo menos en superficie, las rocas sedimentarias: areniscas, conglomerados, lutitas y yeso.

En el Cordón de Lila predominan las rocas intrusivas (granitos, granodioritas, dioritas) de edad paleozoica a cretácica.

Entre la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de los Andes se encuentra un cordón de rocas evaporíticas continentales, la Cordillera de la Sal (yeso y halita), de edad oligocena, que divide la depresión central en dos subcuencas: la del Salar de Atacama propiamente dicha y la del Llano de la

Paciencia. Esta formación parece proseguir por debajo de las ignimbritas en el sector noreste del salar. La deposición de evaporitas en la cuenca del salar de Atacama ha durado, al menos, desde el Oligoceno. Se puede considerar un proceso de deposición continuo desde esta época.

Los niveles estratigráficamente bajos, que constituyen la Cordillera de la Sal, han sido plegados y expuestos a partir del Mioceno medio por la tectónica de bloques que controla toda la estructura de la cuenca del Salar de Atacama.

Se pueden distinguir dos grandes unidades en el salar de Atacama: el núcleo y la zona marginal. El núcleo de alrededor de 1100 km² de superficie y de 900 m de espesor está constituido por un 90% de halita porosa impregnada con una salmuera intersticial muy rica en litio (Li), potasio (K), magnesio (Mg) y boro (B). Alrededor del núcleo, se extiende la zona marginal del salar constituida de sedimentos salinos finos, ricos en sulfatos, especialmente yeso (Alonso, 1996).

3.3. Marco Hidrogeológico

Marazuela (2019b) define el salar como una cuenca endorreica en donde toda la recarga que se produce en los acuíferos del Salar de Atacama se produce por infiltración de lluvias. Debido a que la Cordillera de los Andes actúa como una barrera para las nubes amazónicas y por acción de la corriente de Humboldt de la costa del Pacífico, el Salar de Atacama se encuentra bajo una zona subtropical de alta presión y tiene un clima hiperárido que se caracteriza por bajas tasas de precipitación.

La red de aguas superficiales es escasa y los mayores caudales se dan en los ríos San Pedro y Vilama (figura 13). El río San Pedro forma un abanico aluvial (abanico aluvial de San Pedro) al llegar al margen norte del salar, donde el agua se infiltra en los sedimentos detríticos. Adicionalmente, existen algunos arroyos intermitentes que drenan, a lo largo del margen oriental, el agua de las montañas como los arroyos Toconao, Aguas Blancas, Talabre, Camar, Socaire, Peine y Tilomonte (figura 13).

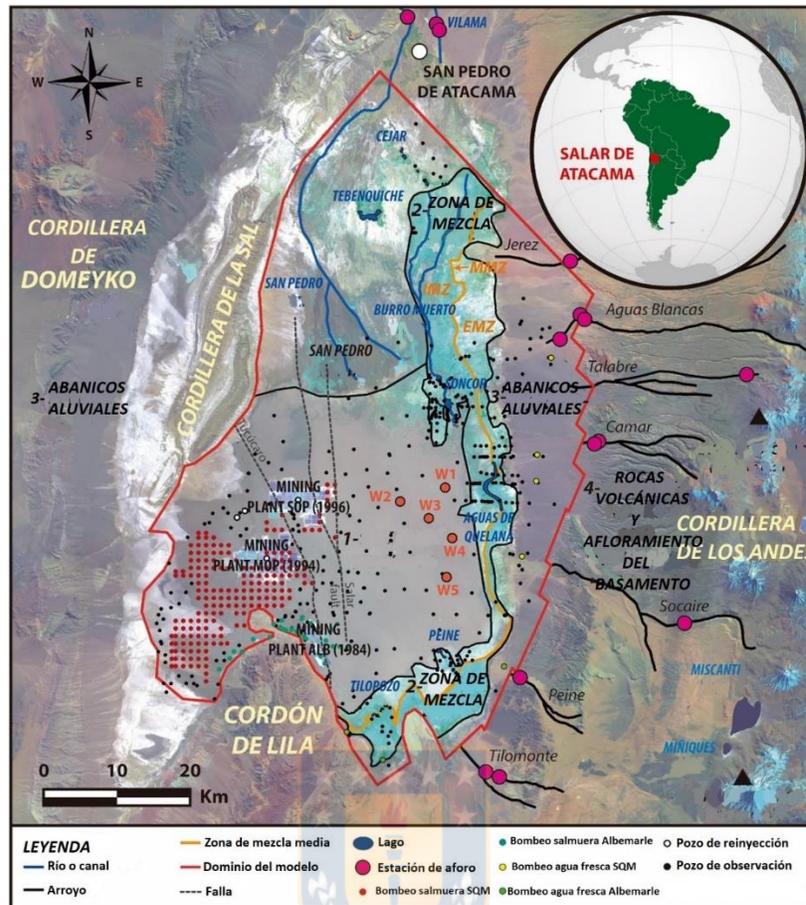


Figura 13 Esquema hidrogeológico del Salar de Atacama (Modificado de M. A. Marazuela et al., 2019b)

Cercano al abanico aluvial de San Pedro, y en dirección Este, el Canal Burro Muerto conecta y alimenta los lagos Chaxa y Barros Negros que constituyen el sistema Soncor. Además de Soncor, existen varios lagos Cejar, Tebenquiche, Aguas de Quelana, Peine y Tilopozo en color azul, en la zona de mezcla asociados a los flujos ascendentes que constituyen ecosistemas de gran valor que sirven de hábitat o centro de anidación de flamencos andinos y otras especies (Ortiz et al., 2014). Se aprecian tres zonas hidrodinámicas dentro de la zona de mezcla: una zona de mezcla interna (IMZ), una zona de mezcla media (MMZ) y una zona de mezcla externa (EMZ) en la figura 13 se encuentran en naranja.

La mayoría de los lagos se encuentran en los flujos aguas arriba asociados con la MMZ, que separa la IMZ de la EMZ. La IMZ exhibe una hidrodinámica dominada por movimientos de agua subterránea asociados con contrastes de densidad. Por otro lado, la EMZ está controlada por los flujos de agua subterránea provenientes de la recarga en las montañas (M. A. Marazuela et al.,

2019a). La profundidad del nivel freático en el régimen natural varía de 0.1 a 1 m en el núcleo del salar y de 0 a 1.5 m en la zona de mezcla.

En el núcleo las descripciones de sondajes indican profundidades de entre 40 y 100 m consistentes en extensos paquetes de halita con variaciones texturales dependientes de las condiciones paleoclimáticas, donde se destacan intercalaciones menores de capas de yeso y arcillas. La piezometría del núcleo se ve afectada por los bombeos de las empresas que explotan el salar que generan conos de depresión locales por lo que no es posible generar una piezometría de detalle. En las zonas de explotación se observan descensos sostenidos, mientras que en las lejanías se los niveles aumentan durante los periodos de recarga.

La conductividad hidráulica del núcleo del Salar en los primeros 10 m de profundidad es del orden de 10 veces mayor que los siguientes 40 metros y 50 veces mayor que los siguientes 50 m. Se observa una gran dispersión en los valores de conductividad hidráulica medidos, variando entre 5×10^{-5} m/día y 5×10^3 m/día. Con respecto a la porosidad, esta tiende a disminuir exponencialmente con la profundidad. Existe una zona superior de 10 a 20 m de espesor con una porosidad efectiva de alrededor de 6.3%. La zona inferior, bajo los 20 m, tiene una porosidad promedio de 3.4%. Especialmente, la porosidad efectiva en los 40 m superiores tiene un promedio de 4.4%, con valores más altos en el centro, y una disminución hacia la periferia (Wolf von Igel Grisar, 2014).

3.3. Áreas protegidas en el Salar de Atacama

En la segunda región de Antofagasta existen diversas áreas protegidas prioritarias para la biodiversidad debido a sus características ecológicas, que significan sitios de alimentación, refugio, reproducción y hábitat para especies únicas de vegetación y fauna. Se constituyen áreas silvestres protegidas, santuarios de la naturaleza, bienes nacionales, sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad y sitios RAMSAR (CIREN, 2016). En particular en el Salar de Atacama se identifican 3 zonas ambientales relevantes (figura 14) y que actualmente son sitios de protección (CORFO, 2017):

1. Reserva Nacional de Los Flamencos
2. Sistema Hidrológico de Soncor
3. Santuario de la Naturaleza Valle de la Luna

En primer lugar, se encuentra la Reserva Nacional de Los Flamencos, clasificado como Sitio Nacional de Áreas Protegidas (SNASPE). En 1984 se publicó la Ley 18 362 que crea las SNAPES con el objetivo de mantener áreas de carácter único representativas de la diversidad ecológica del país. La Corporación Nacional Forestal (CONAF) es la entidad reguladora de estos sitios.

La Reserva Nacional de Los Flamencos fue creada el 17 de octubre de 1990, por decreto supremo N° 50 del Ministerio de Agricultura, con una superficie de 73 986 ha (CIREN, 2016). Se ubica administrativamente en la comuna de San Pedro de Atacama y está dividida en siete sectores; Salar de Tara, Salar de Aguas Calientes y Salar de Pujsa, ubicados en el Altiplano; Lagunas Miscanti, Miñiques, Valle de La Luna y Tambillo, en el sector del Salar de Atacama.

Los objetivos de esta unidad son preservar y dar representación en el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas, incentivar el uso público en la forma de ecoturismo, investigación científica y educación ambiental, además de proteger ambientes expuestos a los efectos antrópicos negativos y manejarlos con criterio de desarrollo sostenido (CORFO, 2017), además hay participación de comunidades indígenas atacameñas en la formación de proyectos ecoturísticos (CIREN, 2016).

En segundo lugar, el Sistema Hidrológico de Soncor, que se incluye dentro de los sitios RAMSAR. Chile está suscrito al Convenio de Ramsar desde el 2 de febrero de 1971 y paso a ser Ley de la República el 27 de julio de 1981.

La convención sobre los humedales es un tratado intergubernamental en el que se consagran los compromisos contraídos por sus países miembros para mantener las características ecológicas de sus humedales de importancia internacional y planificar el uso sostenible, de todos los humedales situados en sus territorios.

En el Salar de Atacama se encuentra el sistema hidrológico de Soncor el cual se nombra Ramsar el 2 de diciembre de 1996, está constituido por cuatro lagunas, de no más de 1.5 m de profundidad interconectadas superficial y subsuperficialmente, de gran dinamismo en sus superficies.

Las lagunas albergan componentes microfaunísticos y microalgales, fuente de alimento de importantes especies de avifauna migratoria como las tres especies de flamencos, chorlos y playeros, entre otras (CIREN, 2016). CONAF es el encargado de administrar este sistema, se ubica en el sector nororiente del salar dentro de la Reserva Nacional Los Flamencos, por lo que se encuentra

incluido en el Plan de Gestión Participativa de la Reserva bajo la gestión de la categoría IV de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (CORFO, 2017).

En tercer y último lugar clasificado como Santuario de la Naturaleza se encuentra el Valle de la Luna. El valle es nombrado el 7 de enero de 1982 como Santuario por el decreto supremo N° 37 del Ministerio de Educación. Se encuentra en plena Cordillera de la Sal y forma parte de la Reserva Nacional Los Flamencos, está ubicada a 13 km de San Pedro de Atacama y su altura máxima es de 2624 m.s.n.m. (CIREN, 2016).

Cabe destacar que las actividades turísticas están a cargo de la comunidad indígena de San Pedro de Atacama, cuyo enfoque principal es el turismo y el cuidado del patrimonio geomorfológico. También cercano al Valle de Luna se encuentra el sitio arqueológico Tulo, ubicado en el margen norte del Salar de Atacama, con una antigüedad estimada de más de 2800 años.

La administración de este sitio se desarrolla en el marco de una estrategia en la que participan la Comunidad Indígena de Coyo, la Corporación Nacional Forestal (CONAF), el Consejo de Monumentos Nacionales (CMN) y la Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI) (CORFO, 2017).

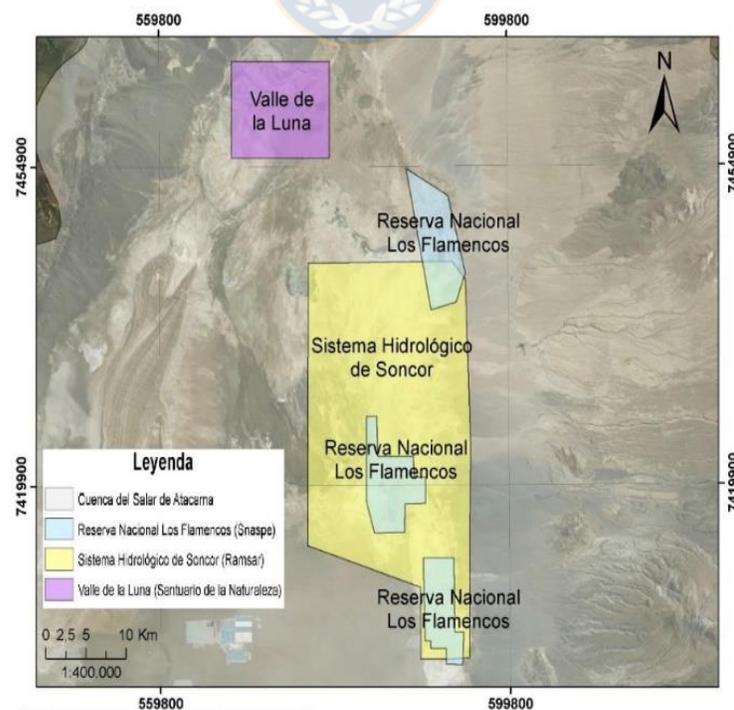


Figura 14 Sitios de protección ambiental en Cuenca del Salar de Atacama (Modificado de Corfo & Comité de minería no Metálica, 2017)

4. EXPLOTACIÓN DEL LITIO EN EL SALAR DE ATACAMA

4.1. Marco regulatorio en Chile

En Chile el litio es considerado de carácter estratégico, a diferencia de otros tipos de minería, la explotación del litio no es concesible. En los años 50 surge un creciente interés por los minerales radioactivos, no sólo enfocado en asuntos bélicos, también hay una preocupación por buscar minerales con potenciales de generación eléctrica por vía de la fisión nuclear (COCHILCO, 2009).

Debido a estas nuevas necesidades en el año 1965 se crea la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) mediante la Ley N°16 319, en donde se declara al litio como material de interés nuclear (Art.2) por otro lado en el artículo 8 se determina que el litio extraído y los concentrados derivados o compuestos no podrán ser objeto de ningún acto jurídico, sino cuando se ejecute por la CCHEN, con ésta o con su autorización previa (Ley 16319, 1965).

En el decreto N°450 del año 1975 “Reglamento de términos nucleares” el litio junto a otros elementos o compuestos como el uranio y el torio, son calificados de interés nuclear (COCHILCO, 2013), no obstante, el litio no se hallaba reservado para el Estado, sino que seguía siendo una sustancia de libre denunciabilidad (COCHILCO, 2009). En 1976 a través del decreto ley N°1557 se dictaminaron normas que permitieran celebrar contratos de operación para explorar y explotar materiales atómicos naturales mediante contratistas, se estableció que únicamente la CCHEN podría fijar y realizar el acopio de estos materiales. También se determina la posibilidad de expropiar a favor de la CCHEN los materiales de interés nuclear una vez extraídos.

Para el año 1976 Codelco inscribe concesiones mineras de litio en los salares de Pedernales, Aguilar, Infieles y Cototos, de los cuales se traspasan a la Empresa Nacional de Minería (ENAMI) estos tres últimos (OCMAL, 2019). El año 1977 CORFO solicitó y mensuro 59 820 pertenencias mineras en el Salar de Atacama, denominadas “OMA” de las cuales se quedó con 32 768 pertenencias las cuales tiene hasta el día de hoy (COCHILCO, 2009).

En 1979 debido al volumen de reservas del Salar de Atacama, a las estimaciones del rol del litio en una futura industria de baterías secundarias y en reactores de fusión nuclear, el Estado decide reservarse el litio a través del decreto ley N°2886 con la excepción de las concesiones entregadas antes de la fecha de publicación del Decreto Ley, a su vez se ratificó a la CCHEN como el organismo

a cargo de todo acto jurídico con respecto al litio y sus concentrados (COCHILCO, 2009). En el año 1983 entró en vigor el nuevo código de minería y también la Ley N°18 097 Orgánica Constitucional, en ambas se mantuvo la calificación del litio de reservado para el Estado y de no concesible, a excepción de las concesiones ya otorgadas (COCHILCO, 2009).

En la figura 15 se encuentra una línea de tiempo que ilustra el marco regulatorio chileno con respecto al litio.

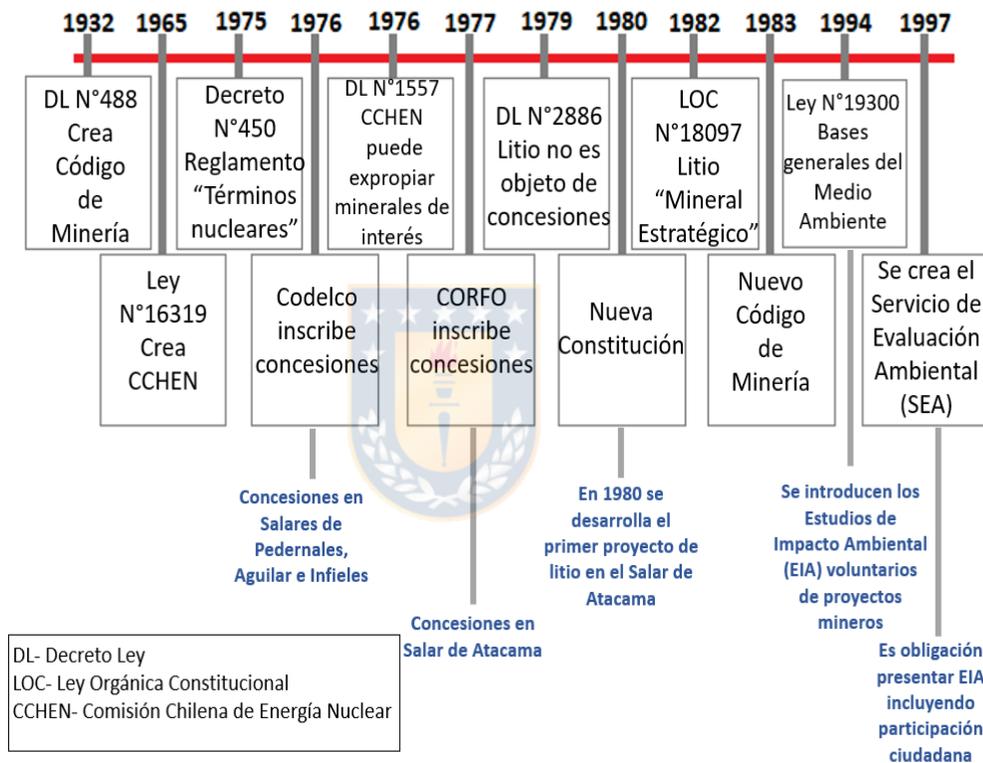


Figura 15 Línea de tiempo marco regulatorio chileno

4.2. Organismos estatales

4.2.1. Instituciones reguladoras

El litio en Chile está sujeto a una serie de instituciones estatales que se encargan de controlar y regular la explotación, venta, caudales de salmuera y agua con el fin de asegurar una extracción sustentable en el tiempo.

a) Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN)

Esta entidad fue creada en el año 1965 con el objetivo de encargarse de la producción, adquisición, transferencia, transporte y usos pacífico de la energía atómica, regular, fiscalizar y controlar las instalaciones nucleares y las instalaciones radiactivas relevantes en Chile. Representa al Estado en lo referente a la reserva de los materiales atómicos naturales y el litio, por lo tanto, tiene influencia directa en la extracción y comercialización de estos minerales. Además, se le concede en primera instancia la opción de compra del Estado sobre el litio si es de interés nacional y es quien autoriza la comercialización del resto del litio para fines expresamente no nucleares (COCHILCO, 2013).

b) Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)

El SERNAGEOMIN cumple el rol sobre propiedad, seguridad y producción minera considerando las características específicas que tienen las concesiones para explotar litio. Es tarea de esta entidad identificar la ubicación y caracterización de los recursos de litio, recopilando información sobre la cantidad de salmuera extraída desde el salar y manteniendo un catastro de la producción de potasio, litio y ácido bórico (COCHILCO, 2013).

c) Dirección General de Aguas (DGA)

La DGA tiene competencias sobre los derechos de agua y la gestión que se hace de los reservorios de salmueras, considerando la sustentabilidad de ellos y su compatibilidad con los derechos de otros usuarios de la cuenca, principalmente comunidades agrícolas locales (COCHILCO, 2013)

4.2.2. Empresas del Estado

Chile cuenta con empresas estatales que representan los intereses del Estado, algunas de ellas tienen concesiones en salares chilenos desde antes del año 1979.

a) Corporación de Fomento a la Producción (CORFO)

CORFO es actualmente dueño de las concesiones que existen en el Salar de Atacama, las cuales son explotadas por Albemarle y SQM a través de los contratos específicos con límites a la extracción de litio en el tiempo y/o cantidad. Su trabajo es cautelar los derechos

descritos en los contratos y recaudar los pagos a través del Sistema de Empresas Públicas (SEP), cuya función es la administración de las empresas CORFO (COCHILCO, 2013).

b) Corporación Nacional del Cobre (CODELCO)

CODELCO posee concesiones mineras anteriores al año 1979, en donde se incluyen gran parte del Salar de Maricunga y todo el Salar de Pedernales. Al ser una empresa pública podría facilitar la incorporación de empresas privadas a través de “Joint Venture” u otro modelo de negocios a la explotación del litio, sin tener la necesidad de tener concesiones anteriores a 1979, en el año 2016 Codelco fundó la empresa estatal Salar de Maricunga SpA con el objetivo de fomentar la participación estatal en el mercado del litio e inaugurar plantas en las pertenencias mineras en el Salar de Maricunga y Pedernales. La empresa se proyecta en el futuro desarrollando un modelo de negocios en asociación con el sector privado y cuenta con un Contrato Especial de Operaciones de Litio (OCMAL, 2019).

c) Empresa Nacional de Minería (ENAMI)

Al igual que CODELCO, ENAMI cuenta con concesiones anteriores a 1979, posee pertenencias mineras autorizadas para la explotación del litio en los salares de Aguilar, Infieles y Cototos, por lo que podría posibilitar la explotación de litio con empresas privadas. ENAMI ha incluido entre sus ejes estratégicos la extracción de litio Firmó un acuerdo en 2018 con la minera asociada Sorcia Mineral L.L.C. a través de su empresa Ensorcía Chile SpA, para poder iniciar explotación de litio en las pertenencias de ENAMI en los Salares Aguilar e Infieles (OCMAL, 2019).

4.3. Empresas involucradas e historial de explotación.

En el año 1975 se inició un estudio de factibilidad para la recuperación de litio del Salar de Atacama, las operaciones comerciales y producción de Carbonato de litio comenzó en el año 1984. CORFO (45%) y Foote Mineral Co. (55%) crean la Sociedad Chilena del Litio (SCL) en el año 1980 para explorar y vender productos de litio procedentes del Salar de Atacama con un límite de 200 000 toneladas métricas de litio metálico.

La CCHEN autorizó a la SCL para que vendiera toda clase de productos de litio, a excepción de los destinados a la creación de energía nuclear por fusión (COCHILCO, 2009).

Por otro lado, en 1986 CORFO (25%) junto a Amax (63.7%) y Molymet (11.25%) crearon la empresa Minsal Ltda. para explorar, explotar y comercializar potasio, boro, litio y cualquier otro producto o subproducto proveniente del Salar de Atacama. Otorgando una cuota máxima de producción total de litio de 180 100 toneladas métricas de litio metálico en un plazo de 30 años.

Actualmente las pertenencias de SCL son las arrendadas por Albemarle, mientras que las correspondientes a Minsal Ltda. son las arrendadas por la empresa SQM.

SQM dio inicio a sus operaciones en el año 1997 con la producción de Carbonato de litio como un coproducto del Cloruro de Potasio (SQM, 2010), es una empresa privada chilena de carácter global y está presente en una gran variedad de industrias entre ellas el litio y sus derivados (SQM, 2018c), en la actualidad a partir de la salmuera del salar se produce: cloruro de potasio, sulfato de potasio, sales de cloruro de magnesio y soluciones de litio (SQM, 2018a). En los inicios de Minsal la explotación promedio anual era de un caudal aproximado 70 l/s, en el año 2006 con la aprobación de la RCA 226/2006, el caudal aumento hasta al menos 750 l/s, y en la actualidad el caudal alcanza los 1500 l/s (AMPHOS21, 2018).

Albemarle está presente en Chile desde el año 2015 y opera en las concesiones arrendadas a la SCL (Ministerio de Minería, 2016), es una empresa líder en la producción de Litio a nivel mundial, tiene clientes en más de 100 países y está presente en otras industrias, en el salar Albemarle produce carbonato de Litio y cloruro de Litio.

La extracción de salmuera del núcleo del salar comenzó con una extracción promedio anual de 48.6 l/s, en el año 1997 se incrementa progresivamente la extracción hasta superar los 100 l/s promedio anual en el año 2005 y finalmente se alcanzan 142 l/s en 2015 por la compañía Rokwood Lithium (empresa que es comprada por Albemarle en 2015) y en el 2016 se aprueba con RCA N°021/2016 el proyecto “EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de evaporación Solar en Salar de Atacama” (analizado posteriormente) permitiendo un aumento del caudal de 300 l/s, adicionalmente a los 142 l/s ya aprobados (AMPHOS21, 2018).

5. INSTRUMENTOS DE GESTIÓN AMBIENTAL

5.1. Contexto general

Gestión ambiental se puede definir como la administración y manejo de todas las actividades humanas que influyen sobre el medio ambiente, mediante un conjunto de pautas, técnicas y mecanismos que aseguren la puesta en práctica de una política ambiental racional y sostenida (Naturales, 2016).

Los instrumentos que utiliza la gestión ambiental son herramientas de política pública que, mediante regulaciones, incentivos o mecanismos que motivan acciones o conductas de agentes, permiten contribuir a la protección del medio ambiente, así como a prevenir, atenuar o mejorar problemas ambientales (SINIA, 2016).

Debido a la importancia ambiental que tiene toda la cuenca del Salar de Atacama es requisito que los proyectos se sometan a un proceso de evaluación ambiental para poder concretarlos. La ley 19 300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente dio origen al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

El SEIA es un instrumento de gestión ambiental destinado a la evaluación y predicción de los impactos ambientales que puedan generar los proyectos y actividades que se realizan en el país y que, de acuerdo con la ley, requieran ser evaluados. Todo proyecto o actividad susceptible de causar impacto ambiental, incluidas sus modificaciones, sólo se puede ejecutar o modificar previa evaluación de su impacto ambiental mediante la presentación, según corresponda, de una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de Impacto Ambiental (EIA). Someter un proyecto o actividad al SEIA permite acreditar el cumplimiento de la normativa y obtener las autorizaciones ambientales respectivas (ChileAtiende, 2021).

Se presentará un EIA o una DIA según:

1.- Estudio de Impacto Ambiental (EIA): si el proyecto genera o presenta a lo menos uno de los efectos, características o circunstancias establecidas en el artículo 11 de la Ley sobre las Bases de Medio Ambiente (impactos significativos).

2.- Declaración de Impacto Ambiental (DIA): si el proyecto no genera ni presenta ninguno de los efectos, características o circunstancias establecidas en el art. 11 de la Ley sobre las Bases de Medio Ambiente.

Los efectos, características o circunstancias contemplados en el artículo 11 de la Ley, caso en el cual deberá presentar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) son (SEA Chile, 2018):

1. Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones y residuos.
2. Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluido el suelo, agua y aire.
3. Reasentamiento de comunidades humanas, o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de los grupos humanos.
4. Localización en o próxima a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, glaciares, susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar.
5. Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona.
6. Alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural.

El proceso de evaluación concluye cuando todos los órganos partícipes se demuestran conformes con las medidas declaradas por el Titular del proyecto, emitiéndose una Resolución de Calificación Ambiental (RCA) favorable, que fija las condiciones en que el proyecto podrá ejecutarse la RCA es desfavorable en caso de que el proyecto no cumpla con la normativa ambiental vigente (Gestión Ambiental Consultores, 2017).

Los EIA son evaluaciones de impacto ambiental para proyectos o actividades que generan mayores efectos sobre el medio ambiente, en comparación con los proyectos en donde se presentan DIA, para efectos de análisis de esta memoria se tomaran en cuenta los EIA en el Salar de Atacama.

5.2.Contenidos Estudios de Impacto Ambiental

Los EIA (al igual que las DIA) tienen que indicar como información obligatoria si el proyecto o actividad modifica un proyecto o actividad, su relación con las políticas, planes y programas de

desarrollo regional, se deben indicar el desarrollo de proyectos o las actividades por etapa (en caso de que sea por etapas), se debe establecer el inicio de ejecución del proyecto y, por último, informar las negociaciones con los grupos de interés. Además de los ya mencionados requisitos, el reglamento del SEIA establece un contenido mínimo de capítulos los cuales considerarán:

- a) Índice
- b) Resumen del Estudio de Impacto Ambiental
- c) Descripción del proyecto o actividad
- d) Determinación y justificación del área de influencia del proyecto o actividad, incluyendo una descripción general de la misma
- e) Línea de base
- f) Predicción y evaluación del impacto ambiental del proyecto o actividad
- g) Descripción pormenorizada de aquellos efectos, características o circunstancias del artículo 11 de la Ley que dan origen a la necesidad de elaborar un Estudio de Impacto Ambiental
- h) Cuando el proyecto o actividad deba presentar un EIA por generar riesgo para la salud de la población, el proponente deberá considerar un capítulo específico relativo a los potenciales riesgos que el proyecto o actividad podría generar en la salud de las personas
- i) Plan de Medidas de Mitigación, Reparación y Compensación
- j) Plan de Prevención de Contingencias y de Emergencias asociado a las eventuales situaciones de riesgo o contingencia identificadas
- k) Plan de Seguimiento de las Variables Ambientales relevantes
- l) Plan de cumplimiento de la legislación ambiental aplicable
- m) Descripción del contenido de aquellos compromisos ambientales voluntarios
- n) Ficha en la cual se resuman, para cada fase del proyecto o actividad, los contenidos a que se refieren las letras c), f), g), i), j), k), l) y m)
- o) Descripción de las acciones realizadas previamente a la presentación del Estudio de Impacto Ambiental

p) Apéndice del Estudio de Impacto Ambiental.

Para el análisis de los impactos ambientales producidos por la explotación del litio en Salar de Atacama se identificaron las componentes ambientales susceptibles de recibir impactos ambientales, las actividades que generan dichos impactos y, por último, las medidas de mitigación, reparación y compensación presentadas por los titulares, es decir, los capítulos d), f) e i) mencionados.

1. Área de influencia

El área de influencia se define y justifica para cada elemento afectado del medio ambiente tomando en consideración los impactos ambientales potencialmente significativos sobre ellos, este capítulo está ligado al de línea de base, ya que en este se describen detalladamente aquellos elementos que se encuentren en el área de influencia y están establecidos en el artículo 11 de la Ley 19300 (Decreto 40, 2013).

2. Predicción y evaluación del impacto ambiental del proyecto o actividad.

La predicción y evaluación de impactos es el apartado en donde se encuentran los posibles impactos que dan origen al estudio. Según el Reglamento del SEIA (Decreto 40, 2013) la predicción de impactos consistirá en la identificación y estimación o cuantificación de las alteraciones directas e indirectas a los elementos del medio ambiente descritos en la línea de base, derivadas de la ejecución o modificación del proyecto o actividad para cada una de sus fases. La predicción de los impactos ambientales se efectuará en base a modelos, simulaciones, mediciones o cálculos matemáticos. Cuando, por su naturaleza, un impacto no se pueda cuantificar, su predicción sólo tendrá un carácter cualitativo.

3. Plan de Medidas de Mitigación, Reparación y Compensación

Este capítulo debe describir y justificar las medidas que se adoptarán para eliminar, minimizar, reparar, restaurar o compensar los efectos ambientales adversos del proyecto o actividad descritos en el capítulo de predicción y evaluación. El Plan de Medidas de

Mitigación, Reparación y Compensación Ambientales de un proyecto o actividad deberá contener, cuando proceda, uno o más de los siguientes planes:

- a) Plan de Medidas de Mitigación Ambiental.
- b) Plan de Medidas de Reparación Ambiental.
- c) Plan de Medidas de Compensación Ambiental.

El Plan deberá contener para cada fase del proyecto o actividad la indicación del componente ambiental; el impacto ambiental asociado; el tipo de medida; nombre, objetivo, descripción y justificación de la medida correspondiente; lugar, forma y oportunidad de implementación; y el indicador de cumplimiento.

Las medidas de mitigación tienen por finalidad evitar o disminuir los efectos adversos del proyecto o actividad, cualquiera sea su fase de ejecución. Las medidas de reparación tienen por finalidad reponer uno o más de los componentes o elementos del medio ambiente a una calidad similar a la que tenían con anterioridad al impacto sobre dicho componente o elemento o, en caso de no ser ello posible, restablecer sus propiedades básicas. Las medidas de compensación tienen por finalidad producir o generar un efecto positivo alternativo y equivalente a un efecto adverso identificado, que no sea posible mitigar o reparar (Decreto 40, 2013).

5.3. Proyectos ingresados al SEIA en el Salar de Atacama

En la plataforma del Servicio de Evaluación Ambiental (https://seia.sea.gob.cl/reportes/publico/rpt_proyectos_comunas.php?CP=0) se buscó los proyectos (EIA y DIA) en la comuna de San Pedro de Atacama, se encontraron 204 resultados, de los cuales se descartaron 181 por no estar relacionados con el Salar de Atacama, y se encontraron sólo 4 EIA aprobados que fueron objeto de análisis. En la tabla se encuentran los 23 proyectos, el tipo de evaluación, el titular, la inversión para el proyecto, la fecha de presentación y el estado en que se encuentran.

Tabla 4 Proyectos sometidos a Evaluación de Impacto Ambiental en el Salar de Atacama

N°	Nombre	Tipo	Titular	Inversión (MMU\$)	Fecha presentación	Estado
1	Actualización Plan de Alerta Temprana y Seguimiento Ambiental, Salar de Atacama	EIA	SQM Salar S.A.	0.450	02-06-2020	En Calificación

2	RED DE MONITOREO AMBIENTAL SALAR DE ATACAMA	DIA	Albemarle Limitada	1.000	06-12-2019	Desistido
3	Planta Carbonato de Litio Mejillones	DIA	Albemarle Limitada	583.500	26-09-2018	No calificado
4	Ampliación de la Planta de Carbonato de Litio a 180.000 ton/año	DIA	SQM Salar S.A.	450.000	23-07-2018	Aprobado
5	AMPLIACIÓN PLANTA LA NEGRA FASE 3	DIA	Albemarle Limitada	300.000	23-11-2016	Aprobado
6	Secador Planta Potasa Rockwood Litio Limitada	DIA	Albemarle Limitada	5.000	12-07-2013	Aprobado
7	Ampliación Planta de Secado y Compactado de Cloruro de Potasio	DIA	SQM Salar S.A.	20.000	07-12-2012	Aprobado
8	Aumento de Capacidad de Procesamiento de Carnalita de Potasio	DIA	SQM Salar S.A.	30.000	25-10-2010	Aprobado
9	Ampliación Planta SOP	DIA	SQM Salar S.A.	100.000	13-09-2010	Aprobado
10	Nueva Planta de Secado y Compactado de Cloruro de Potasio	DIA	SQM Salar S.A.	70.000	14-06-2010	Aprobado
11	Aumento de Capacidad de Secado y Compactado de Cloruro de Potasio (e-seia)	DIA	SQM Salar S.A.	20.000	19-05-2009	Aprobado
12	EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama	EIA	Albemarle Limitada	17.000	15-05-2009	Aprobado
13	Modificación Planta SOP (e-seia)	DIA	SQM Salar S.A.	16.500	23-04-2009	Aprobado
14	Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama	EIA	Sociedad Chilena de Litio Ltda.	17.000	20-04-2009	Desistido
15	Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama	EIA	Sociedad Chilena de Litio Ltda.	17.000	27-03-2009	Desistido
16	Ampliación Producción Cloruro de Potasio Salar (e-seia)	DIA	SQM Salar S.A.	527.393	21-01-2009	Aprobado
17	Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama	EIA	SQM Salar S.A.	234.198	10-01-2005	Aprobado
18	Producción de Cloruro de Potasio a partir de Sales de Carnalita de Potasio	DIA	SQM Salar S.A.	4.540	15-02-2002	Aprobado
19	Construcción de Pozas de Evaporación Solar	DIA	Albemarle Limitada	2.450	21-01-2000	Aprobado
20	Reemplazo Parcial de Pozas de Evaporación Solar del Proyecto de producción de Sulfato de Potasio y Ácido Bórico	DIA	SQM Salar S.A.	21.500	10-06-1999	Aprobado
21	Planta Secado y Compactado de Cloruro de Potasio	DIA	SQM Salar S.A.	10.700	12-06-1998	Aprobado
22	Producción de Sulfato de Potasio Ácido Bórico con ampliación de la capacidad productiva de Cloruro de Potasio	EIA	SQM Salar S.A.	124.000	08-10-1996	Aprobado
23	Proyecto para Producción de 300 mil Toneladas Anuales de Cloruro de Potasio	EIA	SQM Salar S.A.	92.000	01-07-1994	Aprobado

Los proyectos 14 y 15 fueron desistidos por los titulares de cada proyecto y el 1 aún se encuentra en calificación, por lo tanto, no son materia de análisis. En la tabla 5 se presentan dos EIA en la ciudad de Antofagasta en los cuales se presentan al SEIA las plantas que procesarán la salmuera solicitada en los EIA analizados.

Tabla 5 Proyectos sometidos a Evaluación de Impacto Ambiental en Antofagasta relacionados al Salar de Atacama

N°	Nombre	Tipo	Titular	Inversión (MMU\$)	Fecha presentación	Estado
1	Planta Cloruro de Litio	EIA	Albemarle Limitada	10.000	01-09-1997	Aprobado
2	Producción de 17500 Ton/año de Carbonato de Litio	EIA	SQM Salar S.A.	54.2	25-01-1996	Aprobado

En la plataforma del SEIA se encuentran los informes de cada proyecto sometido a evaluación. A continuación, se describen brevemente los estudios seleccionados.

12.-2009 - EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama

El proyecto modifica la RCA 092/2000 y consiste en el aumento progresivo en la extracción de salmuera natural desde el Salar de Atacama, aumentando la extracción de bombeo de salmuera en 300 litros, adicional a los 142 litros actualmente autorizados. Su vida útil es de 30 años. El proyecto “Construcción de Pozas de Evaporación Solar”, de SCL contempla la construcción de 10 pozas adicionales a las 17 ya existentes, comprendiendo una superficie total de 680 000 m², las que estarán ubicadas al Oeste del sistema actual de pozas. El proyecto permite el aumento de producción de salmuera desde 60 000 ton/año a 80 000 ton/año, como consecuencia del aumento en la cantidad de salmueras tratadas, como resultado de la expansión del sistema de pozas, generando además un aumento en la cantidad de sales (Albemarle, 2009a).

17.-2005 - Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama

El objetivo del proyecto es sustentar la producción actual de cloruro de potasio, sulfato de potasio, ácido bórico y salmuera rica en litio, en las instalaciones que actualmente posee SQM en el Salar de Atacama. A fin de satisfacer este objetivo, el proyecto contempla efectuar los cambios operacionales que a continuación se indican:

- a.- Aumentar la extracción de salmuera desde el núcleo del salar.
- b.- Aumentar la extracción de agua dulce desde el borde este del salar.
- c.- Aumentar la superficie de evaporación solar en el núcleo del salar.

d.- Aumentar la superficie de acopio de sales de descarte en el núcleo del salar.

Es importante señalar que es mediante este Proyecto que se establece el Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) vigente a la fecha, el cual gatilla medidas de Contingencia y de Alerta Temprana. Dicho Plan de Seguimiento Ambiental está asociado a los componentes Hidrología, Vegetación, Flora y Biotá Acuática (SQM, 2005a).

22.-1996 - Producción de Sulfato de Potasio Ácido Bórico con ampliación de la capacidad productiva de Cloruro de Potasio

Este proyecto consiste en la construcción y operación de una planta de Sulfato de Potasio y Ácido Bórico, cuyas producciones alcanzarán las 250 000 ton/año y 16 500 ton/año respectivamente; y una ampliación de la capacidad productiva de Cloruro de Potasio de 200 000 ton/año. Corresponde a la tercera etapa del proyecto gradual de desarrollo minero de Minsal en el Salar de Atacama. Este proyecto posee fases de producción similares a la Primera Etapa (producción de Cloruro de Potasio) y a la Segunda Etapa (producción de Carbonato de Litio). La ubicación del proyecto es al interior del Salar de Atacama en la II Región de Antofagasta, perteneciente a la Comuna de San Pedro de Atacama(SQM, 1996a).

23.-1994 - Proyecto para Producción de 300 mil Toneladas Anuales de Cloruro de Potasio

El proyecto consiste en la producción del orden de 300 000 ton/año de Cloruro de Potasio (KCl). El Cloruro de Potasio será consumido en Chile por Sociedad Química y Minera de Chile (SOQUIMICH), empresa que actualmente compra toda la producción de KCl producido por SCL (Sociedad Chilena del Litio) en sus instalaciones ubicadas en el Salar de Atacama, para producir Nitrato de Potasio (KNO₃) y requiere importar otras 170 000 ton/año, de diversas procedencias. El proceso productivo se basa fundamentalmente en la evaporación solar, debiéndose destacar que el sol aporta el 96 % de la energía requerida para los procesos. La Silvinita (KCl) será transportada hasta las instalaciones existentes en Coya Sur propiedad de SOQUIMICH para su transformación en Nitrato de Potasio, usado como fertilizante inorgánico. El producto del proyecto sustituirá la importación de Cloruro de Potasio (muriato) de diversas procedencias (SQM, 1994a).

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En los informes seleccionados se identifican diferencias con respecto al formato, los del año 1994 y 1996 son distintos a los del 2005 y 2009 posiblemente debido a las menores exigencias en cuanto a la evaluación ambiental en los años 90. Uno de los objetivos en común de los proyectos presentados en los informes es la extracción de salmuera, por lo que los resultados son similares en cuanto a las componentes ambientales afectadas y las actividades que lo producen.

Cabe destacar que los EIA de 1994 y 1996 no están ligados directamente al procesamiento de salmuera para obtener litio, pero junto al EIA “Producción de 17500 Ton/año de Carbonato de Litio”, proyecto en la ciudad de Antofagasta, forman parte de un mismo proceso y la salmuera solicitada en estos estudios es la que se utiliza en la planta de Carbonato de Litio.

A continuación, se muestran los resultados del análisis de los 3 capítulos analizados en los 4 informes de los EIA. Finalmente se presenta una discusión sobre estos resultados.

6.1. 1994 - Proyecto para Producción de 300 mil Toneladas Anuales de Cloruro de Potasio



6.1.1. Área de influencia

La línea de base es generada en gran mayoría por la empresa MINSAL, se encuentra dividida en medio físico, biótico y medio humano. Se describe el Salar de Atacama completamente en todas sus áreas, se destacan las campañas de terreno por parte de la empresa y de consultoras.

Se analiza el medio físico (geología del núcleo, niveles y calidad de salmueras, propiedades del acuífero, reservas de minerales, meteorología, calidad del aire, ruido, balance hídrico y calidad de aguas frescas), el medio biótico (flora y fauna) y el medio humano (demografía, economía, infraestructura y cultura).

En particular en la salmuera se analizan los niveles de la napa, composición química, propiedades del acuífero y estimación de los recursos. Estas medidas se hicieron con sondajes especialmente construidos para el proyecto. Para las mediciones del acuífero se usaron ensayos de terreno y modelos matemáticos de flujo (SQM, 1994c).

6.1.2. Evaluación de Impacto Ambiental

El capítulo evalúa los impactos ambientales, sociales, económicos y culturales del proyecto, en donde se identifica los impactos y luego son calificados. La principal preocupación asociada al proyecto es el posible impacto sobre los recursos bióticos, y la principal actividad que podría afectarlos es el bombeo de salmuera y agua fresca, lo que podría provocar una disminución del nivel de las lagunas que sirven de hábitat a flamencos, parinas y otras especies.

A través de una modelación matemática numérica se espera un descenso de no más de 10 cm en el nivel de la salmuera. Se agrega que hay evidencia que el nivel de conexión hidráulica entre las lagunas marginales y la salmuera que la subyace es limitada, por esa razón el modelo numérico predice también que las lagunas tendrán una disminución de menos de 10 cm, por lo tanto, no habrá pérdidas considerables en la cantidad de suelo ecológico.

En la tabla 6 se muestran los impactos de consideración importante. Al ser el primer EIA del Salar de Atacama se toman en consideración todos los aspectos de la operación y se identifican impactos en los componentes suelo, agua, biota y medio humano. Los impactos son causados por actividades propias de la explotación. El componente suelo y agua son los más afectados, ambos relacionados directamente con el salar y las lagunas (SQM, 1994b).

Los impactos de menor consideración se encuentran en el Anexo 2 tabla 10.

Tabla 6 Impactos ambientales EIA 1994 MINSAL

Medio	EIA	Impacto	Actividad que causa Impacto
Suelo	1994	Cambio topográfico.	Acopio de halita (545000 a 93500 m ³ /año).
Suelo	1994	Posible disminución en suelo ecológico (lagunas).	Bombeo de salmuera(220l/s) y agua fresca (22,5 l/s).
Suelo	1994	Posible disminución en suelos agrícolas.	Extracción de agua fresca (22,5 l/s).
Suelo	1994	Aumento en el nivel de las lagunas	Retorno de la salmuera de cola al Salar.
Suelo	1994	Disminución en el nivel de la salmuera	Extracción de salmuera y de agua fresca
Suelo	1994	Aumento en el nivel de la salmuera	Retorno de la salmuera de cola al Salar.
Suelo	1994	Cambio en la calidad de la salmuera	Bombeo de salmuera y agua fresca, así como también por el retorno de salmuera de cola.
Agua	1994	Disminución en la recarga de agua al salar	Consumo humano y para la operación.

Agua	1994	Disminución en el nivel de las lagunas	Instalación de población. También por la extracción de salmuera y agua fresca.
Agua	1994	Aumento en el nivel de las lagunas	Retorno de la salmuera de cola al Salar.
Agua	1994	Cambio en la calidad del agua de las lagunas	Instalación de población. También por la extracción de salmuera y agua fresca.
Agua	1994	Posible disminución de cantidad de agua disponible para otros usos	Instalación de la población y por el bombeo de agua fresca.
Biota	1994	Cambio de conducta de mamíferos y aves	Alimentación de agua fresca, construcción de campamento, construcción de vía férrea Chacance-Coya Sur, instalación de población durante la construcción y operación, y finalmente por el transporte requerido.
Biota	1994	Destrucción de hábitats, vegetación y animales	Construcciones, transporte y la instalación de población. Mientras que representan un peligro mayor los bombeos de salmuera y de agua de alimentación.
Biota	1994	Perturbación antrópica (ruidos, caza, saqueo de nidos)	Instalación de población y transporte.
Biota	1994	Atracción de aves a lagunas de evaporación	Pozas de evaporación de salmuera (pueden ser atraídas por las pozas).
Medio humano	1994	Cambios en el paisaje	Apilamiento de sales de descarte.

6.1.3. Medidas de Mitigación

El proyecto se califica así mismo como “amigable” con el medio ambiente debido al uso de la tecnología de evaporación, a que la ubicación de la planta está distante de cualquier hábitat sensible, el campo de bombeo y los pozos de agua fresca fueron escogidos con el fin de no afectar las lagunas, la cañería no atraviesa hábitats sensibles, el agua fresca es extraída en cantidades limitadas, y por último, la dotación de personal será mayoritariamente local de manera de no producir impactos culturales.

Las medidas de prevención que se tomaran constan de un programa de educación ambiental para el personal de Minsal, el uso de depresores de polvo en fase de construcción, financiamiento de investigaciones para la preservación de flamencos y cambios en el patrón de bombeo de salmuera (SQM, 1994d).

6.2.1996 - Producción de Sulfato de Potasio Ácido Bórico con ampliación de la capacidad productiva de Cloruro de Potasio

6.2.1. Área de influencia

Se caracteriza las diferentes componentes ambientales del proyecto (físicas, químicas, biológicas y humanas). Se realizó complementando investigación bibliográfica con estudios de terreno de las componentes, se analizan las componentes de meteorología, clima y calidad del aire; suelos; hidrogeología; hidrología y calidad del agua; vegetación y flora; fauna; paisaje y estética; ruido; área de riesgo; características socioeconómicas y culturales, aspectos arqueológicos e históricos; infraestructura vial y férrea (SQM, 1996c).

6.2.2. Evaluación de Impacto Ambiental

En primer lugar, se identifican las componentes y factores ambientales potenciales, luego se identificó las etapas y sectores del proyecto, las actividades que podrían causar impacto, de qué tipo son, se calificaron y se analizaron los impactos de mayor relevancia. Inicialmente se considera la totalidad de las componentes ambientales, sectores del proyecto, fuentes de impactos potenciales, sin juicio previo acerca de la relevancia, magnitud o certeza, posteriormente los impactos son jerarquizados y dan lugar a los impactos esperables del proyecto una vez calificados. Estos impactos son agrupados en cinco componentes: suelo, agua, aire, biota y medio humano (SQM, 1996b). En la tabla 7 se encuentran los impactos más relevantes, en donde la componente agua es la más afectada. El bombeo, tanto de salmuera como agua fresca provoca cambios en los niveles de ambas, como consecuencia la biota se ve afecta por alteración en la vegetación. La calidad de la salmuera es otro resultado del bombeo.

Los impactos de menor consideración se encuentran en el Anexo 2 tabla 10.

Tabla 7 Impactos ambientales EIA 1996 MINSAL

Medio	EIA	Impacto	Actividad que causa Impacto
Agua	1996	Aumento en nivel del acuífero de salmuera	Bombeo de salmuera fresca y de la reinyección de salmuera de cola.
Agua	1996	Disminución en el nivel del acuífero de salmuera	

Agua	1996	Cambio en la calidad de la salmuera	Bombeo de salmuera fresca y la reinyección de salmuera de cola.
Agua	1996	Aumento en nivel de agua en las lagunas	Bombeo de salmuera fresca y la reinyección de salmuera de cola.
Agua	1996	Disminución en nivel de agua en las lagunas	
Agua	1996	Cambio en la calidad de agua de las lagunas	Bombeo de salmuera fresca y la reinyección de salmuera de cola.
Biota	1996	Destrucción de hábitats	Muestran potencial escaso el transporte, construcción e instalación de personal. La actividad con mayor potencial de destrucción de hábitats es la extracción de salmuera, por el riesgo de disminución en el nivel de agua en las lagunas que acarrearía.
Biota	1996	Perturbación antrópica (ruidos, caza, saqueos)	Instalación de población y también por el transporte.
Biota	1996	Alteración de vegetación	Bombeo salmuera fresca y la reinyección de salmuera de cola tienen el potencial de producir una alteración de la vegetación de las lagunas como consecuencia de un virtual descenso en el nivel de éstas.
Medio humano	1996	Aumento de población en pueblos aledaños	Debido a la construcción y operación en el salar.
Medio humano	1996	Mejoramiento económico y generación de fuentes de empleo	Debido a la construcción y operación en el salar.
Medio humano	1996	Cambio en el paisaje	Debido a la construcción y operación en el salar.
Medio humano	1996	Aumento del tránsito vehicular al exterior de las instalaciones	Transporte de materiales, equipos y personal durante la construcción, y de insumos, productos y personal durante la operación.

6.2.3. Medidas de Mitigación

En el proyecto los impactos identificados se definen de magnitud baja o incierta, en cuanto a las medidas de mitigación son entregadas según el componente que afectan. Como medidas se presenta que las sales de descarte serán apiladas de forma adecuada y segura, las basuras domiciliarias serán retiradas por Minsal y las aguas servidas serán recolectadas en una red de alcantarillados. El agua fresca es extraída desde un lugar cuidadosamente seleccionado. Se considera un plan de vigilancia ambiental con el fin de proteger la biota y su hábitat. La contratación de

personal será en la mayoría de las localidades cercanas. La reinyección de la salmuera de cola se toma como una medida de mitigación, esto es con el fin de contrarrestar el efecto del bombeo en la salmuera (SQM, 1996d).

6.3.2005 - Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama

6.3.1. Área de influencia

Se caracterizan los componentes ambientales físicos, biológicos y humanos, la recolección y análisis de información se realizó a través de campañas de terreno en las cuales se evaluó la situación de estos sitios sin la actividad o proyecto para comparar con las actividades a desarrollarse en las fases de construcción y operación. La caracterización se enfoca en los componentes comprometidos y representativos del área, en donde se entregan las principales conclusiones de clima y meteorología; geología, geomorfología y sismología; suelos; hidrología, hidrogeología y calidad de las aguas; vegetación, flora y fauna, paisaje y estéticas, medio socioeconómico; aspectos históricos, arqueológicos y culturales, medio construido; instrumentos de planificación territorial y áreas protegidas (SQM, 2005c).



6.3.2. Evaluación de Impacto Ambiental

El proceso se realizó a partir de la descripción del proyecto, el marco jurídico aplicable, y las características en la cual se emplaza el proyecto.

Se consideró las siguientes fases: identificación de las etapas del proyecto, identificación de los componentes ambientales potencialmente afectados, fuentes de impactos potenciales (actividades del proyecto), identificación de los tipos de impactos potenciales, análisis y calificación de los impactos potenciales y jerarquización de los impactos según su relevancia.

A través de las actividades del proyecto se analizó aquellas que puedan generar impactos ambientales, y a través de las componentes ambientales que potencialmente podrían ser afectadas se determinaron las zonas ambientalmente sensibles (ZAS), luego a partir de estas zonas y de las actividades que podrían generar impactos se identificaron los impactos potenciales, posteriormente se calificaron, se jerarquizaron y finalmente se identificaron las áreas de riesgo (SQM, 2005b).

En la tabla 8 se encuentran los impactos más relevantes, se destaca la componente aire afectada por las actividades, específicamente el nivel de ruido, el cual se ve aumentado por la operación en general, también se identifica el manejo de residuos como actividad que genera impactos significativos en el componente paisaje.

Los impactos de menor consideración se encuentran en el Anexo 2 tabla 10.

Tabla 8 Impactos ambientales EIA 2005 SQM

Medio	EIA	Impacto	Actividad que causa Impacto
Aire	2005	Aumento del nivel de ruido	Suministro de agua industrial, suministro de agua potable, transporte de personal, materiales e insumos, operación de maquinarias y equipos motorizados, bombeo de salmuera fresca, reinyección de salmuera "no usada" y operación del plan de contingencias.
Medio humano	2005	Generación de empleos	Contratación mano de obra.
Medio construido	2005	Aumento del tránsito vehicular	Transporte de personal, materiales e insumos.
Paisaje	2005	Alteración de las formas naturales el paisaje	Operación de pozas de operación y manejo de residuos mineros sólidos.
Paisaje	2005	Efectos molestos para la percepción del paisaje	Operación de pozas de operación y manejo de residuos mineros sólidos.

6.3.2. Medidas de Mitigación

El plan de manejo ambiental contempla medidas genéricas y específicas. Las medidas genéricas están orientadas a impedir la ejecución de prácticas cuya implementación puede provocar efectos perjudiciales (por ejemplo, prohibir la quema de residuos) o a promover acciones cuya ejecución produce efectos benéficos (por ejemplo, mantención periódica de maquinaria).

Por su naturaleza, las medidas genéricas corresponden a buenas prácticas constructivas u operativas. Las medidas específicas, corresponden a obras o acciones a implementar para abatir, reparar o compensar efectos adversos.

A fin de asegurar el cumplimiento de las medidas de mitigación contempladas en el Plan de Medidas de Mitigación y/o Restauración, SQM dispondrá de un encargado ambiental. Según los

resultados de la Evaluación de impacto ambiental el proyecto no tendrá efectos significativos sobre las ZAS. Entre las medidas tomadas destaca el uso de equipos y maquinarias con niveles máximos de emisión certificados para controlar las emisiones atmosféricas y el ruido producido, se les hará constantes mantenciones para evitar derrames que afecten los accidentes y la flora y fauna. Se prohíbe estrictamente la alteración de vegetación. No se permitirá que residuos sólidos, líquidos o de cualquier otro elemento sea vertido en lugares ambientalmente sensibles, los enjuagues y lavados de maquinaria serán en lugares estrictamente delimitados, también los combustibles e hidrocarburos serán manejados en lugares especialmente habilitados. Todos los contratistas deberán seguir estas indicaciones. Se mencionan otras medidas genéricas como el manejo de aguas servidas y el manejo de todo tipo de residuos sólidos de forma segura y adecuada. El proyecto no presenta medidas de reparación ni de compensación (SQM, 2005d).

6.4.2009 - EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación

Solar

6.4.1. Área de influencia

El área de influencia caracterizada por la línea de base determina el estado actual (de ese momento) de los componentes ambientales bajo la condición de “sin proyecto”, de manera que posteriormente se puedan analizar estos componentes en condición de “con proyecto”. Se analizó el medio físico, biótico, medio humano, medio construido, uso del suelo, patrimonio cultural y paisaje. Se encontró que son componentes altamente sensibles el agua, la vegetación, flora y fauna, la limnología y la dimensión socioeconómica (Albemarle, 2009c).

6.4.2. Evaluación de Impacto Ambiental

En el capítulo se identifican los impactos ambientales y los riesgos asociados al proyecto, de manera de poder después evaluarlos y calificarlos. En primer lugar, se definen y analizan las actividades del proyecto durante todas sus fases, y en segundo lugar se identifican y evalúan los impactos ambientales generados por las actividades del proyecto. La evaluación de impactos se realiza de acuerdo con la siguiente metodología:

a. Identificación y valoración de la relevancia de los componentes ambientales susceptibles de ser impactados.

- b. Determinación de la magnitud de los impactos ambientales.
- c. Calificación de los impactos ambientales, considerando su magnitud y relevancia.
- d. Jerarquización de los impactos ambientales

Además, se menciona que los componentes que se encuentran normados como calidad del aire y ruido, la evaluación ambiental se realiza en función del cumplimiento de la normativa correspondiente (Albemarle, 2009b). En la tabla 9 se encuentran los impactos más relevantes. Hay una gran cantidad de impactos relevantes en comparación con los presentados en los EIA anteriores, también se incluye una diferenciación de los impactos causados en la construcción a los propios de la operación, se ven afectados las componentes, agua, aire, biota, medio humano y medio construido. La perforación de los pozos de extracción asoma como actividad importante a considerar en cuanto a los impactos que genera, también se menciona la construcción de pozas de evaporación y la instalación de las tuberías utilizadas para transportar la salmuera.

Los impactos de menor consideración se encuentran en el Anexo 2 tabla 10.

Tabla 9 Impactos ambientales EIA 2009 SCL

Medio	EIA	Impacto	Actividad que causa Impacto
Agua	2009	Alteración física puntual del núcleo de halita.	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera e instalación de tuberías de transporte de salmuera.
Agua	2009	Depresión del nivel de salmuera almacena en el núcleo en el entorno de la planta y en menor medida, su radio e influencia.	Bombeo de salmuera.
Agua	2009	Alteración funcionamiento hidráulico el Sistema Peine.	Bombeo de salmuera.
Agua	2009	Alteración de las características basales de Aguas Superficiales del Sistema de lagunas.	Bombeo de salmuera.
Aire	2009	Aumento en la concentración de gases y material particulado (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera, instalación de tuberías de transporte

			de salmuera y transporte de insumos y personal.
Aire	2009	Aumento en la concentración de gases y material particulado.	Bombeo de salmuera, operación de pozas de evaporación, procesamiento de sales de litio, transporte de salmuera concentrada a Planta la Negra y transporte de insumos y personal.
Biota	2009	Alteración de hábitat de especies de fauna en categoría de conservación (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera e instalación de tuberías de transporte de salmuera.
Biota	2009	Alteración de hábitat de especies de flora acuática micro y macro bentónicas (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera e instalación de tuberías de transporte de salmuera.
Biota	2009	Alteración de hábitat de especies de flora y vegetación en categoría de conservación.	Bombeo de salmuera.
Biota	2009	Alteración de hábitat de especies de fauna en categoría de conservación.	Bombeo de salmuera.
Biota	2009	Alteración de hábitat de especies de flora acuática micro y macro bentónicas.	Bombeo de salmuera.
Medio humano	2009	Generación de nuevos empleos (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera, instalación de tuberías de transporte de salmuera y transporte de insumos y personal.
Medio humano	2009	Generación de nuevos empleos.	Bombeo de salmuera, operación de pozas de evaporación, procesamiento de sales de litio, transporte de salmuera concentrada a Planta la Negra y transporte de insumos y personal.
Medio construido	2009	Alteración del valor y singularidad paisajística (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera, instalación de tuberías de transporte de salmuera y transporte de insumos y personal.
Medio construido	2009	Alteración el flujo de tránsito vehicular (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera, instalación de tuberías de transporte de salmuera y transporte de insumos y personal.

Medio construido	2009	Alteración el flujo de tránsito vehicular.	Transporte de insumos y personal, y transporte de salmuera concentrada a Planta La Negra.
Medio construido	2009	Alteración del valor turístico por emplazamiento y operación del proyecto en una ZOIT (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera, instalación de tuberías de transporte de salmuera y transporte de insumos y personal.
Medio construido	2009	Alteración del valor turístico por emplazamiento y operación del proyecto en una ZOIT.	Transporte de salmuera concentrada a Planta La Negra.

6.4.3. Medidas de Mitigación

Se espera que el proyecto no genere impactos en las lagunas cercanas de manera directa, sin embargo, pudiese haber variaciones en los niveles de ésta considerando la extracción de salmuera. Se harán constantes monitoreo de niveles de salmuera y agua dulce, monitoreos de la calidad físico-químico de la salmuera y lagunas, uso de imágenes satelitales en el área del proyecto, uso de batimetrías con el objetivo de levantar información sobre la morfología y profundidad de las lagunas (Albemarle, 2009d).

6.5. Discusión

A través del área de influencia es posible identificar las componentes ambientales susceptibles de ser impactados por cierta actividad, además de identificar, es posible luego estimar o medir el impacto del proyecto sobre los elementos descritos en la línea de base, lo que permite generar medidas de mitigación, reparación y compensación. En los estudios analizados se destaca como área de influencia casi la totalidad del Salar de Atacama, es decir que en casi todas sus componentes ambientales las actividades de alguna u otra manera pueden generar impactos potenciales en todo el salar.

La información se genera en su gran mayoría con campañas de terreno propias de la empresa, de consultores externos e información bibliográfica. La cantidad y calidad de la información acerca de las componentes ambientales en el área de influencia es importante, por lo tanto, mientras más

conocimiento se tenga acerca de estas componentes mejor se puede evaluar las componentes sometidas a la explotación del salar.

En la evaluación y predicción de impactos se presentan actividades e impactos similares en los estudios analizados. Se destaca el uso de modelos numéricos para predecir el comportamiento de la salmuera y lagunas. Las componentes ambientales susceptibles de recibir impactos son principalmente el medio físico, en particular el suelo y el agua. A raíz de estos impactos se ven afectados también el medio biótico.

El bombeo de salmuera es una actividad que destaca como potencial de generar impactos en todos los estudios, es decir, la operación central de la explotación del salar es la que provoca directamente impactos ambientales. Se aprecian en el descenso del nivel de la salmuera directamente, en las lagunas que tienen conexión con el salar, también provoca cambios en la calidad de la salmuera, se ven disminuidos los suelos ecológicos, la alteración de la vegetación, y los hábitats de flora y fauna.

La extracción de agua fresca es otra actividad indispensable dentro de la operación, y produce impactos ambientales considerables como la disminución de suelo ecológico y agrícola, cambio en la calidad de las lagunas, disminución en la recarga del salar, disminución en la cantidad de agua para otros usos.

Hidrológicamente estos efectos antropogénicos producen reducción en la recarga y aumento de la descarga de recursos hídricos. Una reducción de la recarga se da cuando se extrae agua dulce en los acuíferos aguas arriba. El aumento en la descarga se da a través de bombeo cuando se extrae salmuera de un acuífero aguas abajo (Ortiz et al., 2014).

Estos impactos en la cuenca, genera cambios en los recursos hídricos de su entorno y afectan directamente el medio biótico asociado, y también los grupos humanos asentados en la cuenca del salar (Ministerio de Minería, 2014). Es de gran importancia avanzar en el conocimiento sobre los impactos que induce el bombeo de salmuera en la descarga por evaporación de los salares para establecer una extracción con menos impactos ecológicos (M. Marazuela et al., 2020).

La salmuera de descarte es otro aspecto importante para considerar dentro de la operación, sólo una parte de la salmuera extraída es valiosa. Una solución planteada dentro de los estudios es la

reinyección de la salmuera de descarte, pero esto provoca cambios en la calidad de la salmuera del subsuelo, aumento en el nivel del salar y lagunas y, genera alteraciones vegetales. Además, esta opción, no se ha estudiado a fondo, un volumen muy grande de reinyección puede provocar problemas de ingeniería, geología y ecología. Esta reinyección debe ser alejada del acuífero de manera de no generar dilución, también hay que considerar que la salmuera se trata con elementos ajenos a la salmuera nativa por lo tanto una reinyección de salmuera también significa una perturbación al acuífero (Flexer et al., 2018).

En los estudios seleccionados se determina que la llegada de personal es una actividad que genera impactos sobre el medio ambiente, el consumo de agua fresca genera los impactos antes mencionados, eventualmente se pueden ver perturbados hábitats, la flora y fauna y aumentos en el tránsito vehicular. En el medio humano además es el único en donde se aprecian impactos potenciales positivos, principalmente atribuidos a la preferencia de contratación de personal de las comunidades cercanas al salar.

En los resultados se presentan principalmente medidas de mitigación, según los informes no se necesitan medidas de reparación y compensación. Se aprecia en los informes una justificación en donde se comenta que la operación no produce grandes impactos además de que se consideran inciertos o de una magnitud baja.

Se presentan programas de monitoreo ambiental de manera de tener una cuantificación de las diferentes componentes con el fin de identificar a tiempo los efectos negativos de las producto de las actividades, de forma de evitar el potencial impacto, destaca un monitoreo de todas las variables ambientales relevantes, en las salmueras y lagunas se medirán niveles y parámetros físico químicos, el uso de agua fresca se utiliza de manera medida y restringida, correcta apilamiento de las sales de descarte, cuidados con los residuos generados por la operación y el personal y, se utilizaran imágenes satelitales para obtener un seguimiento de las lagunas.

El monitoreo es clave para evitar los posibles impactos, es una de las medidas de mitigación más importantes. Es información cuantitativa que permite obtener medidas a tiempo. En la actualidad los sistemas de monitoreo son muy completos y entregan información en tiempo real. La empresa SQM, por ejemplo, tiene habilitado una plataforma en línea (<https://www.sqmsenlinea.com/>) en

donde se encuentra un monitoreo de las variables hidrogeológicas y bióticas. El correcto uso de la información proporcionada por estos sistemas ayuda a mejorar los planes de explotación del salar.

La metodología actual implica bajos costos, y además el Salar de Atacama presenta parámetros ideales para el método actual, es decir, gran superficie, altas concentraciones de litio y otros elementos valiosos, geográficamente está bien ubicado, hay gran radiación solar y bajas concentraciones de magnesio. Pero los impactos ambientales identificados son causados directamente por las actividades centrales del método de explotación y posterior concentración, por lo tanto, las nuevas metodologías debiesen procurar evitar estos impactos.

Los esfuerzos por cambiar la actual metodología se basan principalmente en cambiar el proceso de concentración de las salmueras, debido al volumen de agua evaporada, al gran tiempo de espera para obtener una salmuera concentrada y a la gran cantidad de sales de descarte que quedan de la operación.

En el proceso de concentración de salmuera se evapora una gran cantidad de agua, que si bien no es apta para el consumo humano ni animal, a través de algún proceso de desalinización podría ser apta para algunos usos. Flexer (2018) propone estudiar la opción de tener una planta de tratamiento de aguas, aprovechando la gran radiación solar como medio de energía, bastaría con que sólo una porción del agua se pudiese recuperar para evitar bombear agua fresca para los procesos de la explotación, evitando el agotamiento de las fuentes de agua dulce y los conflictos que genera esta escasez, además se podría aumentar las zonas de suelos agrícolas con el agua desalinizada.

La gran cantidad de sales de descarte es otro problema que se logra identificar en los EIA, son toneladas de material que tienen problemas desde el punto de estabilidad y paisajístico. Es importante considerar, estudiar e investigar el uso de los residuos, de manera en que estos materiales de descarte, entre ellas sales de Na tengan algún uso funcional dentro del proceso o bien sean comercializados, aunque sea a bajos precios, de tal forma de obtener un proceso más eficiente.

7. CONCLUSIONES

El litio es un elemento valioso para el mundo, sus múltiples propiedades le permiten estar presente en una diversificada cantidad de industrias. Las baterías compuestas de litio pueden almacenar energía de forma eficiente y son un gran aliado para combatir las crisis energéticas, por lo que en los últimos años han tenido una mayor demanda.

Los recursos del litio en el mundo tienen una gran diversificación geográfica, principalmente en rocas minerales y salmueras. Los salares de Bolivia, Argentina y Chile presentan una gran oportunidad para que esos países sean partícipes en las nuevas tecnologías energéticas, ya que concentran más de la mitad de los recursos mundiales actuales.

Argentina ha aumentado su producción en los últimos años, y cuenta con grandes cantidades de recursos y reservas. Bolivia tiene los mayores contenidos de recursos de todo el mundo, si se encontrará nuevas metodologías rentables para separar el Magnesio se podrá convertir en una potencia del recurso. Chile es uno de los líderes en cuanto a la producción de litio en el mundo, siendo el salar de Atacama el responsable de la mayor cantidad comercializada.

El Salar de Atacama es una zona compleja desde el punto de vista ambiental, alberga un ecosistema único en el mundo, además de ser un zona turística y hogar de muchas comunidades autóctonas.

El método de explotación actual permite bajos costos de operación por el uso de la energía solar y eólica. Pero tiene desventajas como el gran tiempo que lleva concentrar el litio, el bombeo de salmuera y agua fresca y, baja recuperación de los elementos de interés.

Los organismos estatales involucrados en el litio tienen un rol decisivo. CORFO como dueño de las pertenencias en el Salar de Atacama vela por los contratos de arriendos lo que en cierta medida le permite controlar que empresas son las que explotan el salar. CCHEN en su rol de regulador es comprador prioritario, y por lo tanto puede fomentar generar valor agregado a la cadena del litio, y no sólo exportar materia prima, de esta entidad pueden surgir los contratos con terceros para estos objetivos.

ENAMI y CODELCO son empresas públicas que como CORFO pueden firmar contratos con empresas privadas de tal manera de sumar nuevas empresas a la explotación del litio en Chile.

CODELCO tiene una amplia experiencia en minería metálica, a diferencia de CORFO puede actuar como empresa que explote y produzca directamente sin terceros. ENAMI es una empresa que fomenta la pequeña y mediana minería, y podría desarrollar modelos de explotación bajo ese concepto, facilitando la explotación a empresarios nacionales incentivando dar valor agregado al litio y buscando nuevos métodos de explotación a pequeña escala.

La evaluación de impacto ambiental en Chile se hace a través de dos instrumentos, las declaraciones de impacto ambiental (DIA) y los estudios de impacto ambiental (EIA). Las DIA se utilizan cuando la complejidad de la actividad o proyecto evaluada por el SEIA es menor, por lo tanto, se esperaría que hubiese varios EIA ligados al Salar de Atacama, pero sólo hay 4 calificados, 3 de SQM y 1 de Albemarle.

En estos estudios es en donde se documentan los impactos ambientales causados por la explotación de litio. Sin embargo, se realizan por separado, es decir, cada empresa debe realizar su estudio y si se considera que el salar es un medio hidrodinámico se podría esperar que los impactos generados por cada empresa deberían ser considerados por la otra.

El bombeo de salmuera y de agua fresca son los principales problemas observados en la explotación del litio, estas actividades están asociadas directamente a los impactos ambientales. El bombeo de salmuera es indispensable en el método de explotación utilizado, en este tema se debería buscar soluciones asociadas a cambiar el método, buscar alguna forma en que se pueda extraer el litio sin extraer grandes caudales de salmuera del subsuelo, disminuir el bombeo de agua fresca y usar de forma eficiente los elementos extraídos.

La situación del Salar de Atacama ha sido objeto de interés en los últimos años y se han buscado mejores prácticas por parte de las empresas que explotan el salar, entre ellas los constantes monitoreos, reducción en el uso de agua fresca, ayudas sociales, apoyo a las comunidades cercanas y mejores prácticas en general. Los esfuerzos se deberían seguir enfocando en buscar minimizar en lo máximo posible los impactos ambientales, crear nuevos métodos de explotación o mejorar los aspectos negativos de los actuales y en general, buscar mejorar las prácticas ambientales.

8. REFERENCIAS

- Albemarle. (2009a). *Descripción del proyecto EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama*. <https://seia.sea.gob.cl/archivos/20090514.182228.pdf>
- Albemarle. (2009b). *Evaluación de Impacto Ambiental EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama*. <https://seia.sea.gob.cl/archivos/20090514.182539.pdf>
- Albemarle. (2009c). *Línea de base EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama*. <https://seia.sea.gob.cl/archivos/20090514.182435.pdf>
- Albemarle. (2009d). *Medidas de Mitigación EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama*. <https://seia.sea.gob.cl/archivos/20090514.182633.pdf>
- Alonso, H. (1996). Origen De Los Componentes Y Balance Salino. *Revista Geologica de Chile*, 23(2), 113–122. <https://doi.org/10.5027/andgeoV23n2-a01>
- AMPHOS21. (2018). Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados , para los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales. In *Comité de Minería No Metálica CORFO*. <https://www.corfo.cl/sites/Satellite?jsessionid=Gp57k4xqfw3CbuqGBwz0A8xM7IHxpjbrnz3gGXAAyFu0YBzW6rdQ!268200766!1994251304?blobcol=urldata&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1475167244426&ssbinary=true>
- Aral, H., & Vecchio-Sadus, A. (2008). Toxicity of lithium to humans and the environment-A literature review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 70(3), 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2008.02.026>
- Babidge, S. (2019). Sustaining ignorance: the uncertainties of groundwater and its extraction in the Salar de Atacama, northern Chile. *Journal of the Royal Anthropological Institute*, 25(1), 83–102. <https://doi.org/10.1111/1467-9655.12965>
- Barriga, B., & Sanchez, A. (2017). *Apunte curso "Recursos no metálicos de Chile."* <https://es.scribd.com/document/379421304/Apunte-Curso-u-i>
- ChileAtiende. (2021). *ChileAtiende - Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y Declaración de Impacto Ambiental (DIA)*. <https://www.chileatiende.gob.cl/fichas/2638-estudio-de-impacto-ambiental-eia-y-declaracion-de-impacto-ambiental-dia>
- Choubey, P., Kim, M., Srivastava, R., Lee, J., & Lee, J. (2016). Advance review on the exploitation of the prominent energy-storage element: Lithium. Part I: From mineral and brine resources. *Minerals Engineering*, 89, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.01.010>
- CIREN. (2016). *Sistema de Información Territorial de Humedales Altoandinos: Áreas protegidas de la Región de Antofagasta*. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26194/CIREN-HUMED047-AP-RII.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- COCHILCO. (2009). *Antecedentes para una Política Pública en Minerales Estratégicos : Litio*. https://www.cochilco.cl/Mercado de Metales/informe_minerales_estrategicos_litio.pdf
- COCHILCO. (2013). *Compilación de Informes sobre mercado internacional del litio y el potencial de litio en salares del norte de Chile*. https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/09/Mercado-Internacional_Potencial-del-Litio-en-salares-del-norte-de-chile.pdf
- COCHILCO. (2018). Mercado Internacional del Litio. In *Comisión Chilena del Cobre*. https://www.cochilco.cl/Mercado de Metales/Mercado_Internacional_del_Litio.pdf
- COCHILCO. (2020). *Oferta y demanda de litio hacia el 2030*. <https://www.cochilco.cl/Mercado de Metales/Produccion y consumo de litio hacia el 2030.pdf>
- CORFO. (2017). Estudio de un modelo conceptual ecológico para la cuenca de salar de Atacama. In *Comité de Minería No Metálica CORFO*. <https://corfo.cl/sites/Satellite?blobcol=urldata&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=147516724431>

4&ssbinary=true

- Cornellà, O., Salas, J., Aravena, R., Guzmán, E., Tore, C., Igel, V., & Fock, A. (2009). *Hidrogeología de los sistemas lagunares del margen E del Salar de Atacama*. 1–4. https://biblioserver.sernageomin.cl/OPAC/datafiles/12993_v2_S6_018.pdf
- DGA. (2010). *Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama. II Región*. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/6662/HUM2-0091.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- DGA. (2016). *Sistematización de información de los recursos hídricos del Salar de Atacama para un futuro plan de gestión*. <https://snia.mop.gob.cl/sad/ADM5675.pdf>
- Figueroa, L., Barton, S., Schull, W., Razmilic, B., Zumaeta, O., Young, A., Kamiya, Y., Hoskins, J., & Ilgren, E. (2012). Environmental Lithium exposure in the North of Chile-I. Natural water sources. *Biological Trace Element Research*, 149(2), 280–290. <https://doi.org/10.1007/s12011-012-9417-6>
- Flexer, V., Baspineiro, C. F., & Galli, C. I. (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. *Science of the Total Environment*, 639, 1188–1204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.223>
- Gajardo, A. (2014). *Potencial de litio en salares del norte de Chile* (p. 42). [http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Potencial-de-Litio-en-Salares-de-Chile\(AnibalGajardo\).pdf](http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Potencial-de-Litio-en-Salares-de-Chile(AnibalGajardo).pdf)
- Garcés, I. (1998). La industria del litio en Chile. *Revista De Minería*, 23, 1–26. <https://intranetua.uantof.cl/salares/litio-y-derivados.pdf>
- Garcés, I., Alvarez, G., & Marambio, Y. (2017). *Relevancia del Salar de Atacama frente al escenario Económico*. (Issue May).
- Gestión Ambiental Consultores. (2017). *Estudio para el análisis y preparación de un plan de trabajo en relación a las distintas RCA sobre el Salar de Atacama* (Issue Minería No Metalica Comité, CORFO). <http://www.minerianometalica.cl/wp-content/uploads/2018/02/Estudio-levantamiento-RCA-Salar-Atacama-Informe-final.pdf>
- Giegerich, T., Battes, K., Schwenzer, J. C., & Day, C. (2019). Development of a viable route for lithium-6 supply of DEMO and future fusion power plants. *Fusion Engineering and Design*, 149(October), 111339. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.111339>
- Grosjean, C., Herrera Miranda, P., Perrin, M., & Poggi, P. (2012). Assessment of world lithium resources and consequences of their geographic distribution on the expected development of the electric vehicle industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1735–1744. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.023>
- Gundermann, H., & Göbel, B. (2018). Indigenous communities, lithium companies and their relations in the salar de Atacama. *Chungara*, 50(3), 471–486. https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-73562018000300471
- Houston, J., Butcher, A., Ehren, P., Evans, K., & Godfrey, L. (2011). The evaluation of brine prospects and the requirement for modifications to filing standards. *Economic Geology*, 106(7), 1125–1239. <https://doi.org/10.2113/econgeo.106.7.1225>
- Jerez, B. (2018). Impacto socioambiental de la extracción de litio en las cuencas de los salares altoandinos del Cono Sur. *OCMAL*, 1–55. <https://www.ocmal.org/wp-content/uploads/2018/08/Impacto-Sociambiental-Litio.pdf>
- Kesler, S., Gruber, P., Medina, P., Keoleian, G., Everson, M., & Wallington, T. (2012). Global lithium resources: Relative importance of pegmatite, brine and other deposits. *Ore Geology Reviews*, 48, 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2012.05.006>
- Liu, W., Agusdinata, D. B., & Myint, S. W. (2019). Spatiotemporal patterns of lithium mining and environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 80(January), 145–156. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.04.016>

- López Steinmetz, R. L., & Fong, S. B. (2019). Water legislation in the context of lithium mining in Argentina. *Resources Policy*, 64(October). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101510>
- Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T. (2019a). Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example. *Science of the Total Environment*, 651, 668–683. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.190>
- Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T. (2019b). The effect of brine pumping on the natural hydrodynamics of the Salar de Atacama: The damping capacity of salt flats. *Science of the Total Environment*, 654, 1118–1131. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.196>
- Marazuela, M., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., & García-Gil, A. (2020). Towards more sustainable brine extraction in salt flats: Learning from the Salar de Atacama. *Science of the Total Environment*, 703(xxxx), 135605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135605>
- Ley 16319, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile 1 (1965). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=28393>
- Ministerio de Energía y Minería. (2017). *Panorama de Mercado de Rocas y Minerales Industriales*. http://informacionminera.produccion.gov.ar/assets/datasets/marzo_2017_-_informe_especial_litio_.pdf
- Ministerio de Minería. (2014). *Litio: Una fuente de energía una oportunidad para Chile*. <https://biblioteca.sernageomin.cl/opac/datafiles/95592-2.pdf>
- Ministerio de Minería. (2016). *Política del litio y la gobernanza de los salares*. <https://www.camara.cl/verDoc.aspx?prmID=56988&prmTIPO=DOCUMENTOCOMISION>
- Decreto 40, Biblioteca del Congreso Nacional de Chile 1 (2013). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1053563>
- Mohr, S., Mudd, G., & Giurco, D. (2012). Lithium resources and production: Critical assessment and global projections. *Minerals*, 2(1), 65–84. <https://doi.org/10.3390/min2010065>
- Munk, L. A., Boutt, D. F., Hynek, S. A., & Moran, B. J. (2018). Hydrogeochemical fluxes and processes contributing to the formation of lithium-enriched brines in a hyper-arid continental basin. *Chemical Geology*, 493, 37–57. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.013>
- Munk, L., Hynek, S., Bradley, D., Boutt, D., Labay, K., & Jochens, H. (2016). Lithium brines: A global perspective. *Reviews in Economic Geology*, 18, 339–365.
- Naturales, G. en R. (2016). *GESTIÓN AMBIENTAL | GRN*. <https://www.grn.cl/gestion-ambiental.html>
- OCMAL. (2019). Marco normativo del litio chileno. *Boletín N1*, 1–13. <https://www.ocmal.org/wp-content/uploads/2019/06/LITIO-BOLETÍN-VERSION-FINAL-1.pdf>
- Oliveira, L., Messagie, M., Rangaraju, S., Sanfelix, J., Hernandez Rivas, M., & Van Mierlo, J. (2015). Key issues of lithium-ion batteries - From resource depletion to environmental performance indicators. *Journal of Cleaner Production*, 108, 354–362. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.021>
- Opitz, A., Badami, P., Shen, L., Vignarooban, K., & Kannan, A. M. (2017). Can Li-Ion batteries be the panacea for automotive applications? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(April 2016), 685–692. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.019>
- Ortiz, C., Aravena, R., Briones, E., Suárez, F., Tore, C., & Muñoz, J. F. (2014). Origine des eaux de surface de l'écosystème du Soncor dans le bassin du salar d'Atacama (Nord du Chili). *Hydrological Sciences Journal*, 59(2), 336–350. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.829231>
- Poveda, R. (2020). Estudio de Caso sobre la gobernanza del cobre en Chile. In *Cepal* (Vol. 195). <https://www.cepal.org/es/publicaciones/44777-estudio-caso-la-gobernanza-cobre-chile>
- SEA Chile. (2018). *SEA Chile*. SEA. <https://www.sea.gob.cl/sea/declaracion-estudio-impacto-ambiental>
- SINIA. (2016). *Instrumentos para la gestión ambiental – SINIA*. Sistema Nacional de Información Ambiental. <https://sinia.mma.gob.cl/temas-ambientales/instrumentos-para-la-gestion-ambiental/>

- SQM. (1994a). *Descripción del proyecto EIA Proyecto para Producción de 300 mil Toneladas Anuales de Cloruro de Potasio*. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2012122002/EIA_906_Descripcion_del_proyecto.pdf
- SQM. (1994b). *Evaluación de Impacto Ambiental EIA Proyecto para Producción de 300 mil Toneladas Anuales de Cloruro de Potasio*. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2012122002/EIA_906_Evaluacion_de_impacto_ambiental.pdf
- SQM. (1994c). *Línea de base EIA Proyecto para Producción de 300 mil Toneladas Anuales de Cloruro de Potasio*. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2012122002/EIA_906_Linea_base_suelo.pdf
- SQM. (1994d). *Medidas de mitigación EIA Proyecto para Producción de 300 mil Toneladas Anuales de Cloruro de Potasio*. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2012122002/EIA_906_Anexos_bibliografia.pdf
- SQM. (1996a). *Descripción del proyecto EIA Producción de Sulfato de Potasio Ácido Bórico con ampliación de la capacidad productiva de Cloruro de Potasio*. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2012122002/EIA_313_Descripcion_del_proyecto.pdf
- SQM. (1996b). *Evaluación de Impacto Ambiental EIA Producción de Sulfato de Potasio Ácido Bórico con ampliación de la capacidad productiva de Cloruro de Potasio*. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2012122002/EIA_313_Evaluacion_de_impacto_ambiental.pdf
- SQM. (1996c). *Línea de base EIA Producción de Sulfato de Potasio Ácido Bórico con ampliación de la capacidad productiva de Cloruro de Potasio*. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2012122002/EIA_313_Linea_base_suelos.pdf
- SQM. (1996d). *Medidas de mitigación EIA Producción de Sulfato de Potasio Ácido Bórico con ampliación de la capacidad productiva de Cloruro de Potasio*. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2012122002/EIA_313_Medidas_de_mitigacion_y_o_compensacion_recomendadas.pdf
- SQM. (2005a). *Descripción del proyecto EIA Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama*. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2013102201/EIA_1040282_Descripcion_del_proyecto.pdf
- SQM. (2005b). *Evaluación de Impacto Ambiental EIA Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama*. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2013102201/EIA_1040282_Analisis_y_valoracion_de_impacto.pdf
- SQM. (2005c). *Línea de base EIA Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama*. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2013102201/EIA_1040282_Linea_base_introduccion.pdf
- SQM. (2005d). *Medidas de Mitigación EIA Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama*. https://seia.sea.gob.cl/archivos/EIA/2013102201/EIA_1040282_Medidas_de_mitigacion_reparacion_y_compensacion.pdf
- SQM. (2010). *Memoria Anual 2010*. https://s25.q4cdn.com/757756353/files/doc_financials/2010/ar/SQM-Memoria_Anual_2010_ES.pdf
- SQM. (2018a). *Memoria Anual 2018*. https://s25.q4cdn.com/757756353/files/doc_financials/2018/ar/Memoria-Anual-2018_esp.pdf
- SQM. (2018b). *Procesos Pozas de evaporación Solar*. <https://www.sqm.com/sqmeninfografias/procesos.html>
- SQM. (2018c). *Reporte de sustentabilidad 2018*. https://s25.q4cdn.com/757756353/files/doc_financials/2018/ar/REPORTE-DE-SUSTENTABILIDAD-2018.pdf
- USGS. (2010). *Mineral commodity summaries 2010*. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2010/mcs2010.pdf>
- USGS. (2020). *Mineral commodity summaries 2020* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Wilkomirsky, I. (2008). *Extracción Y Refinación De Metales No Ferrosos*. <https://es.scribd.com/doc/28821896/metalurgia-extractiva-del-litio-01-10-2009>
- Wolf von Igel Grisar. (2014). *Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama*. *Ministerio de Obras Públicas; Director General de Aguas; División de Estudios y Planificación, ICASS LTDA*, 323.

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

Zhang, Y., Hu, Y., Wang, L., & Sun, W. (2019). Systematic review of lithium extraction from salt-lake brines via precipitation approaches. *Minerals Engineering*, 139(July), 105868. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105868>



9. ANEXOS

9.1. Descripción de proyectos en el Salar de Atacama

Los proyectos 2, 14 y 15 de la tabla 4 fueron desistidos por lo que no son descritos, el número 3 fue no calificado así que no se encuentra su descripción en esta memoria.

1.- 2020 - Actualización Plan de Alerta Temprana y Seguimiento Ambiental, Salar de Atacama.

El Estudio de Impacto Ambiental se presentó en junio del año 2020, es el proyecto más reciente entrado al Servicio el cual se encuentra en estado de calificación. Considera una inversión de U\$ 450000 El objetivo general del Proyecto es introducir modificaciones al proyecto aprobado mediante RCA N°226/2006, de la Comisión Regional del Medio Ambiente de la Región de Antofagasta, en particular, las siguientes:

- a.- Soterramiento de la tubería de conducción de agua en el cruce de la quebrada Camar, en un tramo de 1.3 km, con el objeto de mitigar la afectación progresiva del estado de vitalidad de ejemplares de algarrobos localizados en el área del pozo Camar 2.
- b.- Definición de un Plan de Alerta Temprana para el Sistema Peine, acorde a las características de los planes de contingencia de los demás sistemas ambientales, que permita garantizar la mantención de las condiciones de funcionamiento natural del sistema.
- c.- Actualización del Plan de Alerta Temprana del sistema Soncor.
- d.- Actualización del Plan de Alerta Temprana de Vegetación Borde Este.

Adicionalmente, el presente Proyecto revisa los planes de seguimiento en las componentes suelo, flora, vegetación, fauna y ecosistemas acuáticos continentales, incorporando precisiones y mejoras metodológicas que permitan robustecer la confiabilidad las mediciones, monitoreos y análisis efectuados, así como la trazabilidad de los datos registrados.

4.- 2018 – Ampliación de la Planta de Carbonato de Litio a 180.000 ton/año

La Declaración de Impacto Ambiental fue ingresada en Julio del 2018, y fue aceptada en el año 2019 en el mes de marzo, contempla una inversión de U\$450000000. El presente proyecto contempla aumentar la producción de carbonato de litio de 70000 ton/año a 180000 ton/año en dos fases operacionales.

En la primera fase operativa se incrementará la producción a 110000 ton/año optimizando la operatividad real de los equipos y procesos que conforman las instalaciones construidas en el complejo Industrial.

En la segunda fase operativa, denominada ampliación Planta de Carbonato de Litio 3, se incrementará la producción hasta 180000 ton/año, para lo cual se requiere de nuevas instalaciones, así como de modificaciones de las instalaciones proyectadas y aprobadas mediante RCA N°262/2017.

6.- 2013 - Secador Planta Potasa Rockwood Litio Limitada

Presentado al SEIA en julio de 2013, aprobado en diciembre de 2013. Actualmente se encuentra operativo. El proyecto modifica la RCA 092/2000 y consiste en Construcción y operación de una Planta de Granulación y la operación de una Planta de Secado introducidas para la producción de Cloruro de Potasio (KCl) seco. Considera un monto de inversión de U\$ 17000000. Su vida útil era 20 años.

7.- 2012 - Ampliación Planta de Secado y Compactado de Cloruro de Potasio

El proyecto consiste en la ampliación de la capacidad de producción de la actual planta de secado y compactado de cloruro de potasio (KCl) de 1100000 a 1800000 toneladas anuales a través del reemplazo y repotenciamiento de algunos de sus equipos. Además, se automatizará el manejo de productos mediante la instalación de un *stacker* y un reclamador. El Proyecto considera las mismas 4 etapas del Proyecto original, a saber, secado y calentado, compactado, molienda y clasificación, y acondicionamiento.

8.- 2010 - Aumento de Capacidad de Procesamiento de Carnalita de Potasio

El proyecto consiste en aumentar la capacidad de procesamiento de sales de carnalita de potasio de 612000 a 2790000 toneladas anuales, en las instalaciones que actualmente opera SQM Salar S.A en el Salar de Atacama. Para ello se contempla la construcción de una nueva planta de carnalita de potasio (PC-3) y la optimización de la Planta de Carnalita N°1 existente (PC-1), siendo necesario para su operación la construcción de una nueva línea de transmisión eléctrica de 110 KV, paralela al tendido eléctrico actual, a lo largo de una extensión de 34 km entre las actuales S/E “OESTE” a la S/E “MINSAL”. Adicionalmente, a través del presente proyecto, se realizará una ampliación de la actual S/E “MINSAL”. Este proyecto no modifica los volúmenes de extracción de salmuera y agua ya aprobados.

9.- 2010 - Ampliación Planta SOP

El proyecto tiene como propósito introducir modificaciones en la Planta SOP Húmeda (SOP-H), actualmente existente dentro de las operaciones de SQM Salar S.A. en el Salar de Atacama, de manera de adecuar la alimentación de sales a ser procesadas en dicha planta.

Para esto se contempla implementar en la planta húmeda (SOP-H) una segunda línea de alimentación de sales paralela a la actual, que permita alimentar sales de Silvinita para producción de Cloruro de Potasio (KCl). Esta modificación hará posible la operación en paralelo de las dos modalidades actuales de funcionamiento, lo que permitirá la producción simultánea de Sulfato de Potasio y Cloruro de Potasio, o de solamente Cloruro de Potasio en ambas líneas productivas.

10.- 2010 - Nueva Planta de Secado y Compactado de Cloruro de Potasio

Se contempla la construcción de una nueva Planta de Secado y Compactado de Cloruro de Potasio en el Sector SOP de las operaciones de SQM Salar S.A en el Salar de Atacama. El proyecto tiene por objetivo el aumento de la capacidad de secado y compactado de cloruro de potasio (KCl) en el Sector SOP de las operaciones de SQM Salar S.A., para lo cual se contempla la construcción de una nueva Planta de Secado y Compactado con capacidad de producción máxima de 1100000 toneladas/año de Cloruro de Potasio Granular (compactado).

11.- 2009 - Aumento de Capacidad de Secado y Compactado de Cloruro de Potasio

El objetivo del proyecto consistirá en aumentar la producción de secado y compactado de KCl en el sector MOP (Muriato de Potasio), a través de:

- a.- Aumento de la producción de KCl Granulado (seco y compactado), de la actual planta de secado y compactado de KCl, en 20000 ton/año aprovechando la capacidad instalada que tiene la planta actual de 100000 ton/año a 120000 ton/año.
- b.- Construcción de una nueva planta de secado con capacidad de producción de 920000 ton/año de KCl Standard (seco).

13.-2009 - Modificación Planta SOP

El proyecto “Modificación Planta SOP” tiene por objetivo introducir modificaciones en la Planta Húmeda (SOP-H) y Planta de Secado y Compactado (SOP-SC) 3 de las operaciones de SQM Salar S.A., en el Salar de Atacama, de manera de:

- a.- Incorporar en la Planta Húmeda (SOP-H) una segunda forma de funcionamiento denominada “modalidad MOP” que permitirá la producción de Cloruro de Potasio mediante un cambio en las sales de alimentación y su procesamiento.
- b.- Incrementar la capacidad de secado en la actual Planta de Secado y Compactado (SOP-SC), permitiendo además indistintamente el procesamiento de Sulfato de Potasio y/o Cloruro de Potasio.

16.-2009 - Ampliación Producción Cloruro de Potasio Salar

El objetivo del proyecto consistirá en aumentar la producción de cloruro de potasio (KCl) de la planta de cloruro de potasio de 650000 ton/año a 2200000 ton/año, en las instalaciones que actualmente opera SQM Salar S.A., en el Salar de Atacama.

Adicionalmente, a través del presente proyecto, se modificará la distribución y localización de las áreas de canchas de acopio de sales y de pozas de evaporación solar, que ya cuentan con aprobación ambiental, en los sectores MOP (sector de producción de KCl) y SOP (sector de producción de sulfato de potasio), manteniendo la superficie total de 62 km².

18.-2002 - Producción de Cloruro de Potasio a partir de Sales de Carnalita de Potasio

El proyecto contempla una optimización del proceso de extracción de Cloruro de Potasio contenido en la sal de Carnelita de Potasio. El nuevo proceso involucra una nueva Planta de Lixiviación de Carnalita de Potasio.

19.-2000 - Construcción de Pozas de Evaporación Solar

Presentado al SEIA en enero de 2000, aprobado en mayo de 2000. Actualmente se encuentra operativo, modificado por las RCAs precedentes. El proyecto contempla la construcción de 10 pozas adicionales a las 17 ya existentes, comprendiendo una superficie total de 680000 m², las que estarán ubicadas al Oeste del sistema actual de pozas. El proyecto permitirá el aumento de producción de salmuera desde 60000 ton/año a 80000 ton/año, como consecuencia del aumento en la cantidad de salmueras tratadas, como resultado de la expansión del sistema de pozas, generando además un aumento en la cantidad de sales. Considera un monto de inversión de U\$ 2450000. Su vida útil es 30 años

20.-1999 - Reemplazo Parcial de Pozas de Evaporación Solar del Proyecto de producción de Sulfato de Potasio y Ácido Bórico

El proyecto consiste en la construcción de 3.3 millones de m² de área nueva de evaporación, que substituirán igual área actual de evaporación, y en la reparación de 1.1 millones de m² de área existente de evaporación. Los 3.3 millones de m² actuales han quedado fuera de servicio debido a la presencia de fugas en la impermeabilización de las pozas originales.

21.-1998 - Planta Secado y Compactado de Cloruro de Potasio

El proyecto consiste en la disminución de la humedad en piscinas de evaporación solar y en el aumento de la densidad de uno de los productos (cloruro de potasio o silvinita) de los proyectos

anteriores, para lo cual la empresa planea la construcción y posterior operación de una planta de secado y compactado del mismo.

9.2. Impactos Ambientales EIA y actividad que lo produce

Tabla 10 Impactos ambientales EIA

Medio	EIA	Impacto	Actividad que causa Impacto
Suelo	1994	Cambio topográfico.	Acopio de halita (545000 a 93500 m ³ /año).
Suelo	1994	Posible disminución en suelo ecológico (lagunas).	Bombeo de salmuera(220l/s) y agua fresca (22,5 l/s).
Suelo	1994	Posible disminución en suelos agrícolas.	Extracción de agua fresca (22,5 l/s).
Suelo	1994	Aumento en el nivel de las lagunas.	Retorno de la salmuera de cola al Salar.
Suelo	1994	Disminución en el nivel de la salmuera.	Extracción de salmuera y de agua fresca.
Suelo	1994	Aumento en el nivel de la salmuera.	Retorno de la salmuera de cola al Salar.
Suelo	1994	Cambio en la calidad de la salmuera.	Bombeo de salmuera y agua fresca, así como también por el retorno de salmuera de cola.
Suelo	1996	Disposición de RISES.	Estos Residuos Industriales Sólidos (RISES) corresponde al acopio de las sales de descarte, aproximadamente 212 toneladas/hora.
Suelo	1996	Potenciales problemas de estabilidad en pilas de acopio de sales de descarte.	El acopio de sales de descarte tiene el potencial de provocar problemas de estabilidad.
Suelo	1996	Posible disminución de suelos agrícolas, por disminución de agua dulce disponible.	Debido a la extracción de agua dulce.
Agua	1994	Disminución en la recarga de agua al salar.	Consumo humano y para la operación.
Agua	1994	Disminución en el nivel de las lagunas.	Instalación de población. También por la extracción de salmuera y agua fresca.
Agua	1994	Aumento en el nivel de las lagunas.	Retorno de la salmuera de cola al Salar.
Agua	1994	Cambio en la calidad del agua de las lagunas.	Instalación de población. También por la extracción de salmuera y agua fresca.

Agua	1994	Posible disminución de cantidad de agua disponible para otros usos.	Instalación de la población y por el bombeo de agua fresca.
Agua	1996	Aumento en nivel del acuífero de salmuera.	Las posibles variaciones en el nivel del acuífero de salmuera, producto del bombeo de salmuera fresca y de la reinyección de salmuera de cola.
Agua	1996	Disminución en el nivel del acuífero de salmuera.	La calidad química de la salmuera podría ser afectada por el bombeo de salmuera fresca y la reinyección de salmuera de cola.
Agua	1996	Aumento en nivel de agua en las lagunas.	Las posibles variaciones en el nivel del acuífero de salmuera podrían eventualmente producir una variación en el nivel de agua en las lagunas.
Agua	1996	Disminución en nivel de agua en las lagunas.	Debido al bombeo de salmuera fresca y la reinyección de salmuera de cola.
Agua	1996	Cambio en la calidad de agua de las lagunas.	Debido a la alimentación de agua dulce necesaria para la operación del proyecto.
Agua	1996	Disminución en la recarga de agua al salar.	Por la extracción del agua dulce para la operación.
Agua	1996	Disminución en nivel el acuífero de agua dulce.	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera e instalación de tuberías de transporte de salmuera.
Agua	2009	Alteración física puntual del núcleo de halita.	Bombeo de salmuera.
Agua	2009	Depresión del nivel de salmuera almacena en el núcleo en el entorno de la planta y en menor medida, su radio e influencia.	Bombeo de salmuera.
Agua	2009	Alteración funcionamiento hidráulico el Sistema Peine.	Bombeo de salmuera.
Agua	2009	Alteración de las características basales de Aguas Superficiales del Sistema de lagunas.	Bombeo de salmuera.
Aire	2005	Aumento del nivel de ruido.	Suministro de agua industrial, suministro de agua potable, transporte de personal, materiales e insumos, operación de maquinarias y equipos motorizados, bombeo de salmuera fresca, reinyección de salmuera "no usada" y operación del plan de contingencias.
Aire	2009	Aumento en la concentración de gases y material particulado (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera, instalación de tuberías de transporte de salmuera y transporte de insumos y personal.

Aire	2009	Aumento en la concentración de gases y material particulado.	Bombeo de salmuera, operación de pozas de evaporación, procesamiento de sales de litio, transporte de salmuera concentrada a Planta la Negra y transporte de insumos y personal.
Aire	2009	Incremento en la emisión de ruido (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera, instalación de tuberías de transporte de salmuera y transporte de insumos y personal.
Aire	2009	Incremento en la emisión de ruido.	Bombeo de salmuera, transporte de salmuera concentrada a Planta La Negra y transporte de insumos y personal.
Biota	1994	Cambio de conducta de mamíferos y aves.	Alimentación de agua fresca, construcción de campamento, construcción de vía férrea Chacance-Coya Sur, instalación de población durante la construcción y operación, y finalmente por el transporte requerido.
Biota	1994	Destrucción de hábitats, vegetación y animales.	Construcciones, transporte y la instalación de población. Mientras que representan un peligro mayor los bombeos de salmuera y de agua de alimentación.
Biota	1994	Perturbación antrópica (ruidos, caza, saqueo de nidos).	Instalación de población y transporte.
Biota	1994	Atracción de aves a lagunas de evaporación.	Pozas de evaporación de salmuera (pueden ser atraídas por las pozas).
Biota	1996	Cambio en conducta de mamíferos y aves.	Debido a la reparación de camino y construcción de cañería de agua dulce y línea de alta tensión, transporte en general, instalación de personal y finalmente operación y abandono de empréstitos y botaderos.
Biota	1996	Destrucción de hábitats.	Muestran potencial escaso el transporte, construcción e instalación de personal. La actividad con mayor potencial de destrucción de hábitats es la extracción de salmuera, por el riesgo de disminución en el nivel de agua en las lagunas que acarrearía.
Biota	1996	Perturbación antrópica (ruidos, caza, saqueos).	Debido a la instalación de población y también por el transporte.

Biota	1996	Alteración de vegetación.	La extracción de salmuera fresca y la reinyección de salmuera de cola tienen el potencial de producir una alteración de la vegetación de las lagunas como consecuencia de un virtual descenso en el nivel de éstas.
Biota	2009	Alteración de hábitat de especies de fauna en categoría de conservación (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera e instalación de tuberías de transporte de salmuera.
Biota	2009	Alteración de hábitat de especies de flora acuática micro y macro bentónicas (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera e instalación de tuberías de transporte de salmuera.
Biota	2009	Alteración de hábitat de especies de flora y vegetación en categoría de conservación.	Bombeo de salmuera.
Biota	2009	Alteración de hábitat de especies de fauna en categoría de conservación.	Bombeo de salmuera.
Biota	2009	Alteración de hábitat de especies de flora acuática micro y macro bentónicas.	Bombeo de salmuera.
Medio humano	1994	Cambios en el paisaje.	Apilamiento de sales de descarte.
Medio humano	1996	Aumento de población en pueblos aledaños.	Debido a la construcción y operación en el Salar.
Medio humano	1996	Mejoramiento económico y generación de fuentes de empleo.	Debido a la construcción y operación en el Salar.
Medio humano	1996	Cambio en el paisaje.	Debido a la construcción y operación del proyecto.
Medio humano	1996	Aumento del tránsito vehicular al exterior de las instalaciones.	El transporte de materiales, equipos y personal durante la construcción, y de insumos, productos y personal durante la operación.
Medio humano	1996	Aumento en los requerimientos de infraestructura vial actual.	Debido a las actividades relacionadas con el proyecto en sus distintas etapas.
Medio humano	1996	Aumento en infraestructura vial disponible.	
Medio humano	2005	Generación de empleos.	Contratación mano de obra.

Medio humano	2009	Generación de nuevos empleos (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera, instalación de tuberías de transporte de salmuera y transporte de insumos y personal.
Medio humano	2009	Generación de nuevos empleos.	Bombeo de salmuera, operación de pozas de evaporación, procesamiento de sales de litio, transporte de salmuera concentrada a Planta la Negra y transporte de insumos y personal.
Medio construido	2005	Aumento del tránsito vehicular.	Transporte de personal, materiales e insumos.
Medio construido	2009	Alteración del valor y singularidad paisajística(construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera, instalación de tuberías de transporte de salmuera y transporte de insumos y personal.
Medio construido	2009	Alteración el flujo de tránsito vehicular (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera, instalación de tuberías de transporte de salmuera y transporte de insumos y personal.
Medio construido	2009	Alteración el flujo de tránsito vehicular.	Transporte de insumos y personal, y transporte de salmuera concentrada a Planta La Negra.
Medio construido	2009	Alteración del valor turístico por emplazamiento y operación del proyecto en una ZOIT (construcción).	Construcción de pozas de evaporación, perforación de pozos de extracción de salmuera, instalación de tuberías de transporte de salmuera y transporte de insumos y personal.
Medio construido	2009	Alteración del valor turístico por emplazamiento y operación del proyecto en una ZOIT.	Transporte de salmuera concentrada a Planta La Negra.
Paisaje	2005	Alteración de las formas naturales el paisaje.	Operación de pozas de operación y manejo de residuos mineros sólidos.
Paisaje	2005	Efectos molestos para la percepción del paisaje.	Operación de pozas de operación y manejo de residuos mineros sólidos.
Paisaje	2009	Alteración del valor y singularidad paisajística.	Transporte de salmuera concentrada a Planta La Negra.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Análisis de antecedentes ambientales en la explotación de litio y sus perspectivas de futuro en Sudamérica. Caso de estudio, Salar de Atacama, Chile		
Nombre Memorista: Jaime Ernesto Barría Uribe		
Modalidad	Investigación	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	Excelente	 Prof. Ramón Díaz N.
Calificación	6.9	
Fecha	08-04-2021	
 Prof. FERNANDO PARADA		Ingeniero Supervisor:
		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
 Profª. Asieh Hekmat		Prof. Gonzalo Nelis S.
Resumen		
<p>El objetivo de este estudio es brindar una revisión detallada de la explotación de litio y los impactos ambientales generados a través del caso de estudio del Salar de Atacama. En los salares de Bolivia, Argentina y Chile se concentran alrededor del 58% de los recursos. La extracción se realiza por bombeo del subsuelo, luego se transporta a estanques de evaporación, y se concentra el litio en varias etapas.</p> <p>El Salar de Atacama es la mayor fuente activa y concentrada de litio. En base a las características ecológicas existen tres áreas protegidas en el salar.</p> <p>Se recopilaron los estudios de impacto ambiental. Se analizaron los aspectos relativos al área de Influencia, la identificación y predicción de impactos ambientales y, las medidas de mitigación, compensación y/o reparaciones.</p> <p>Se determinó que el medio físico y medio biótico son los más afectados. Las actividades que generan mayores impactos son el bombeo de salmuera, la extracción de agua fresca y la reinyección. Los proyectos definen medidas de mitigación enfocadas en prevenir los impactos. Es inconsistente que la explotación del salar no sea sustentable considerando que el uso del recurso tiene el objetivo final de contribuir con mejores prácticas ambientales en la industria energética.</p>		