


UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS
FACULTAD DE INGENIERÍA Y NEGOCIOS
ESCUELA DE MINAS



Aumento de Tasa de Evaporación en Pozas de Salmuera de Litio

Trabajo de título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el
Título de Ingeniero en Minas

Profesor guía: Carlos Espinoza Morales

Autor
Cristian Valenzuela Vergara

Santiago – Chile
2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mi profesor guía de proyecto de título Sr. Carlos Espinoza por sus valiosos consejos, su constante motivación, confianza y empuje durante el desarrollo de mi trabajo.

A toda mi familia, la mayoría sin saber en qué aventura me había embarcado, jamás me dejaron solo.

A mis compañeros de universidad, sobre todo con los que estoy llegando a esta etapa de estudio, por cada uno de los gratos momentos de clases.

A mis amigos y compañeros de trabajo que con algún consejo y/o ayuda profesional me apoyaron en los momentos que vieron que lo necesitaba.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESÚMEN EJECUTIVO	4
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES	10
1.1 Concentración de la salmuera de litio	10
1.2 Objetivos del proyecto	11
1.3 Hipótesis de trabajo	11
1.4 Justificación del tema	11
1.5 Alcances y limitaciones.....	12
CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL.....	13
2.1 Litio y su producción	13
2.1.1 Sales y sus usos.....	15
2.1.2 Producto Comercial	17
2.2 Pozas de Evaporación	18
2.2.1 Factores que afectan a la evaporación	19
2.2.2 Medición de la evaporación	20
2.2.3 Instrumentos.....	20
2.2.4 Evaporación y saturación de salmuera	21
2.3 Proceso explicativo.....	22
2.4 Ventajas y desventajas.....	24
CAPÍTULO 3. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	25
3.1 Clima en la región de Antofagasta	26
CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL PROYECTO	29
4.1 Temperaturas en San Pedro de Atacama.....	29
4.2 Sol y energía solar.....	30
4.3 Viento en San Pedro de Atacama.....	32
4.4 Evaporación en el Salar de Atacama.....	33
4.4.1 Relación evaporación mensual con temperatura mensual promedio	35

4.4.2 Relación evaporación mensual con horas luz y energía solar.....	36
4.4.3 Relación evaporación mensual con velocidad del viento	37
4.4.4 Relación evaporación y sus factores.....	38
4.5 Producción anual.....	39
4.6 Propuesta de infraestructura (Prueba de Concepto)	40
4.6.1 Cálculos estadísticos de temperatura, evaporación y producción	42
4.7 Evaluación Económica.....	44
4.7.1 Ingresos y Producción	44
4.7.2 Estudio de Costos Asociados	45
CAPÍTULO 5. Análisis DAFO CAME.....	48
5.2. Conclusiones	49
5.3. Recomendaciones o sugerencias	50
5.5. Referencias.....	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Reservas de Litio en el mundo.....	14
Tabla 2-2 Proyección demanda mundial de Litio 2017-2025.....	15
Tabla 2-3 Ventaja y desventaja del proceso de salmuera de litio.....	24
Tabla 3-1 Antecedentes climáticos de la región de Antofagasta.	27
Tabla 4-1 Antecedentes climáticos de San Pedro de Atacama 2018	29
Tabla 4-2: Estadística de evaporación media	34
Tabla 4-3: Relación tasa de evaporación y temperatura	35
Tabla 4-4: Relación tasa de evaporación, temperatura, horas luz y energía	36
Tabla 4-5: Relación tasa de evaporación y velocidad del viento	37
Tabla 4-6: Relación tasa de evaporación y otros factores.....	38
Tabla 4-7: Producción mensual	39
Tabla 4-8: Evaporación, temperatura y producción mensual.....	42
Tabla 4-9: Aumento de la temperatura en 1 grado.....	43
Tabla 4-10: Ingreso Promedio de producción.	45
Tabla 4-11: Costos asociados a la inversión del proyecto.....	46

Tabla 4-12: Flujo de caja – MM U\$	47
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Salar de Atacama (pozos de potasio y Litio)	10
Figura 2-1 Tanques Evaporímetros.....	21
Figura 2-2 Pozas de salmuera, SQM	22
Figura 2-3 Proceso salmuera de Litio	23
Figura 3-1 Ubicación Salar de Atacama.....	25
Figura 3-2 Pueblos originarios	26
Figura 4-1 Diseño de malla en forma de franja	41
Figura 4-2 Diseño de malla en forma de franja	41

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 2-1 Ranking de los principales países productores de litio a nivel mundial en 2017 (en toneladas métricas)	13
Gráfico N° 4-1 Horas de Luz natural y crepúsculo	30
Gráfico N° 4-2 Energía solar de onda corta incidente diaria promedio	31
Gráfico N° 4-3 Velocidad del viento promedio.....	32
Gráfico N° 4-4 Dirección del viento	33

RESÚMEN EJECUTIVO

El agotamiento natural de los combustibles fósiles, el aumento de la contaminación y el cambio climático, ha impulsado la investigación y desarrollo de fuentes de energías más limpias para el transporte. La electro-movilidad es una opción factible que requiere de baterías de larga duración basada en productos del litio. Esto ha generado un aumento de la demanda y precio del litio a nivel mundial. El mayor recurso conocido de litio se ubica en América del Sur, siendo Chile uno de los líderes en la producción de litio.

El proceso utilizado para la extracción de salmueras de litio desde cuencas endorreicas utiliza la concentración del litio por evaporación solar en piscinas o pozas en donde se concentra progresivamente la salmuera de litio. Este proceso de evaporación/concentración es lento y toma entre 12 a 14 meses hasta alcanzar una concentración de entre 5% a 6% de litio antes de ser enviada la salmuera a la planta de proceso.

El presente trabajo de título propone una prueba de concepto para acelerar el proceso de concentración de la salmuera mediante un aumento artificial de la temperatura en las pozas de evaporación solar.

Se propone la instalación de una malla eléctrica alimentada por un generador electro-voltaico que aumente la temperatura en 1°C sobre las pozas, acelerando el proceso de concentración y reduciendo el tiempo del ciclo evaporación/concentración lo que permitiría un aumento de la producción.

El análisis realizado, basado en las variables que inciden en un aumento de la tasa de evaporación, indica que se podría esperar un aumento de producción anual la cosecha de salmuera, eso significaría un aumento de concentrado de carbonato de litio del orden de 2%, unas 283 toneladas métricas de concentrado

de litio.

La evaluación económica de esta prueba de concepto indica que el proyecto tiene un valor presente de MM U\$ 3.5, lo que es motivo para continuar el estudio de esta propuesta de concepto.

ABSTRACT

The natural depletion of fossil fuels, the increase in pollution and climate change, has driven the research and development of cleaner energy sources for transport. Electro-mobility is a feasible option that requires long-life batteries based on lithium products. This has generated an increase in the demand and price of lithium worldwide. The largest known lithium resource is located in South America, with Chile being one of the leaders in the production of lithium.

The process used for the extraction of lithium brines from endorheic basins uses the concentration of lithium by solar evaporation in pools or ponds where the lithium brine is progressively concentrated. This evaporation / concentration process is slow and takes between 12 to 14 months to reach a concentration of between 5% to 6% lithium before the brine is sent to the process plant.

The present work of title proposes a proof of concept to accelerate the process of concentration of the brine by means of an artificial increase of the temperature in the pools of solar evaporation.

It is proposed the installation of an electric grid powered by an electro-voltaic generator that increases the temperature by 1°C over the pools, accelerating the concentration process and reducing the time of the evaporation / concentration cycle, which would allow an increase in production.

The analysis carried out, based on the variables that affect an increase in the rate of evaporation, indicates that one could expect an increase in annual production of the brine crop, that would mean an increase in lithium carbonate concentrate of the order of 2%, about 283 metric tons of lithium concentrate.

The economic evaluation of this proof of concept indicates that the project has a present value of US \$ 3.5 million, which is a reason to continue studying this concept proposal.

INTRODUCCIÓN

El litio es un metal que se encuentra principalmente en salmueras naturales, pozos petrolíferos, campos geotermales y agua de mar. Este metal tiene una densidad que es la mitad de la densidad del agua y presenta buenas condiciones para la conducción del calor y la electricidad.

Chile es el segundo productor de litio en el mundo, según el ranking 2017 de los principales países productores de litio con una producción de 14.100 toneladas anuales. Australia es el país que lidera este ranking con 18.700 toneladas anuales. El abastecimiento actual de litio proviene principalmente de cinco países: Australia (de minerales como el espodumeno), Chile (salmueras), Argentina (salmueras), China (minerales y salmueras) y EE.UU. (salmueras). Chile, a través de las empresas SQM y Albemarle, abastece a alrededor del 38% a 39% del mercado mundial del litio¹.

En relación a las reservas mineras de litio, Chile posee en el Salar de Atacama en torno a 8,3 millones de toneladas de litio, que representan el 22% a escala global. Las salmueras de este salar son consideradas las de más altas concentraciones en litio y potasio en el mundo. Estas reservas poseen alta valoración dado que permite la fabricación de baterías para laptops, celulares y automóviles eléctricos, aplicaciones médicas para problemas nerviosos, purificación del aire ambiental, en aleaciones para aeronáutica, etc. y en el futuro podría usarse en la construcción de reactores de Litio, para generar energía eléctrica.

Es importante destacar que la propiedad minera que ampara estas reservas de litio pertenece al Estado, la cual cubre una superficie de 1.638 km². En la actualidad operan dos empresas privadas, Albemarle y SQM en el Salar de Atacama, ligadas a contratos suscritos con la CORFO² en 1980 y 1993 respectivamente. Hacia 2025 la situación proyectada de estas dos compañías

¹ Minería Chilena: El litio en Chile y en el mundo, Proyecciones hacia el 2025.

² CORFO: Corporación de Fomento a la Producción, agencia del gobierno de Chile, dependiente del ministerio de Economía Fomento y Turismo.

sería la siguiente:

- a) Albemarle: tendría una capacidad de producción entre 100.000 y 120.000 ton/año LCE (carbonato de litio equivalente) para producir carbonato de litio (Li_2CO_3), cloruro de litio (LiCl) e hidróxido de litio (LiOH) en una superficie de operación de 167 km^2 con una operación comprometida con los acuerdos con la CORFO hasta el año 2044.
- b) SQM: tendría una capacidad de producción entre 105.000 y 115.000 ton/año LCE para producir carbonato de litio (Li_2CO_3) e hidróxido de litio (LiOH) en una superficie de operación de 819 km^2 con una operación comprometida con los acuerdos con la CORFO hasta el año 2030.

Dado lo anterior, este proyecto pretende aportar en el mejoramiento de la producción del litio en Chile, entendiendo que las proyecciones presentadas al 2025 permitirían que nuestro país se posicione en uno de los productores más importantes de este mineral en el mundo.

CAPÍTULO 1. ASPECTOS GENERALES

1.1 Concentración de la salmuera de litio

La extracción de la salmuera de litio se realiza mediante bombeo de ésta desde el acuífero del Salar de Atacama y su concentración se produce en una serie de pozas de evaporación en donde cristalizan otras sales y se obtiene una salmuera con un contenido de 6% de litio que es enviada a la planta de proceso para obtener carbonato de litio, cloruro de litio o hidróxido de litio. La figura 1-1, muestra la magnitud de las piscinas en las cuales se almacena la salmuera de litio. La evaporación³ además de elevar la concentración de las sales, hace que al saturarse algunas de estas se vayan precipitando⁴.

La economía del proceso de concentración está determinada por la composición química de la salmuera y por las condiciones ambientales. Las características químicas claves son la concentración de litio (inicialmente 0.16%Li), la concentración de potasio y la razón magnesio a litio presente en la salmuera. Los factores ambientales claves son la radiación solar, la temperatura del aire, la velocidad del viento y la humedad ambiental, lo que impactan la duración del ciclo de evaporación/concentración.

Figura 1-1 Salar de Atacama (pozos de potasio y Litio)



Fuente: Empresa SQM

³ La evaporación es el proceso por el cual las moléculas en estado líquido (por ejemplo, el agua) se hacen gaseosas espontáneamente (ej.: vapor de agua).

⁴ Proceso de obtención de un elemento o un compuesto a partir de una solución que lo contiene, por efecto de un cambio en sus condiciones termodinámicas (temperatura, fusión, composición).
Guía de Buenas prácticas en Seguridad Minera para la Pequeña Minería.

Dada estas características, surge la necesidad de profundizar en este tema y ver mecanismos que permitan acelerar la tasa de evaporación y así reducir el tiempo del ciclo de evaporación/concentración.

1.2 Objetivos del proyecto

Objetivo general

Aumentar la tasa de evaporación en pozas de salmuera y reducir el tiempo del ciclo evaporación/concentración y con ello aumentar la producción.

Objetivos específicos

En relación a los objetivos específicos se plantea lo siguiente:

1. Revisar proceso actual de la evaporación en pozas de extracción de salmuera.
2. Crear un método efectivo y posible de implementar.
3. Evaluar el aumento de la tasa de evaporación en pozas de salmuera y mantener una temperatura constante en las pozas de decante de sales.

1.3 Hipótesis de trabajo

Proponer que mediante el uso de una malla metálica eléctrica se puede generar calor en la parte superior de las pozas y aumentar la tasa de evaporación en pozas de salmuera y disminuir el tiempo de la cosecha.

1.4 Justificación del tema

El actual método de evaporación de la salmuera, es un proceso que se genera de forma natural, en el cual solo depende de factores ambientales como por ejemplo

la radiación solar, el clima y la ubicación geográfica. En la actualidad la zona norte del país reúne las condiciones ideales para que el proceso de evaporación de la salmuera se realice de forma natural, no obstante, el tiempo que se necesita para que la evaporación se efectúe son alrededor de 10 a 14 meses considerando desde la extracción de la salmuera desde el acuífero hasta la obtención del compuesto químico deseado. Dado lo anterior, surge la necesidad de evaluar alternativas que permita acelerar la tasa de evaporación y con ello disminuir los tiempos de espera y de producción de los minerales deseados.

1.5 Alcances y limitaciones

- El trabajo es una prueba de concepto y se desarrolla sobre una propuesta nueva y no probada.
- La ubicación geográfica. Aplica a la zona del Salar de Atacama
- Condiciones técnicas de las pozas.
- Se requieren datos de la empresa, que señala que algunos datos son estratégicos.

CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL

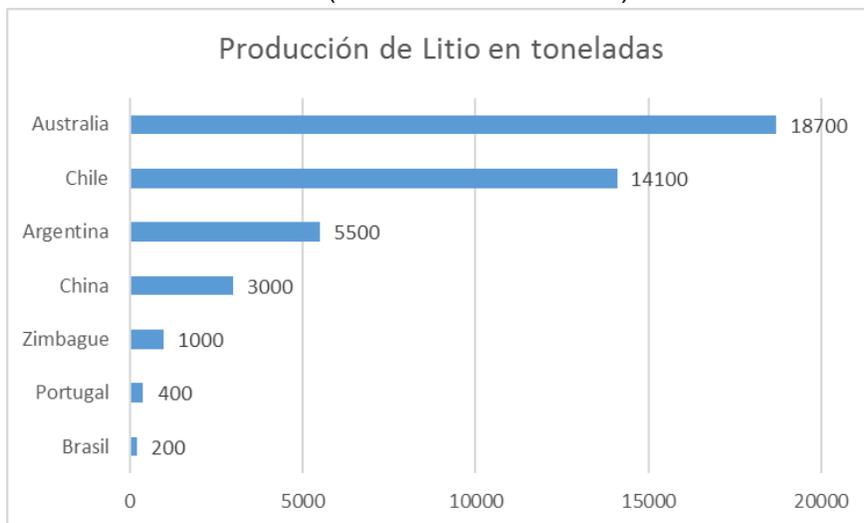
2.1 Litio y su producción

Chile, Argentina y Bolivia concentran más de la mitad de los 40 millones de toneladas de litio que, se estima, subyacen en el planeta, algo que llevó a la revista estadounidense Forbes a denominar a la región como la "Arabia Saudita del litio".

A pesar de que Bolivia tiene el yacimiento más grande, en el salar de Uyuni, el país que más ha explotado el litio es Chile, que tiene la segunda reserva del mundo en el salar de Atacama y es actualmente, junto con Australia, el principal productor internacional.

A continuación, el siguiente gráfico muestra el ranking 2017 de los principales productores de litio a nivel mundial

Gráfico N° 2-1 Ranking de los principales países productores de litio a nivel mundial en 2017 (en toneladas métricas)



Fuente: USGS Minerals information, febrero 2019

Australia genera 18.700 toneladas métricas litio, Chile produce en el 2017 14.100 toneladas métricas de Litio, Argentina produce 5500 toneladas. Brasil, es el país que produce menos litio en el en Sudamérica con 200 toneladas anuales.

Respecto a las reservas para la producción de Litio la siguiente tabla muestra los países productores del metal y sus reservas.

Tabla 2-1 Reservas de Litio en el mundo

Pais	Reserva (millones de ton de litio)
Bolivia	10,7
Chile	10,3
Argentina	4,5
China	4,3
Estados Unidos	3,8
Zaire	2,4
Australia	1,6
Canadá	0,6
Zimbabwe	0,11
Portugal	0,06
Brasil	0,05
Finlandia	0,02
Total Salmuera y Minerales	38,44

Fuente: U.S.G.S, January 2017; Keith Evans, Lithium Reserves and Resources, 1978 and 2006

Bolivia es el país con mayor reserva con 10,7 millones de toneladas, luego Chile con 10,3 toneladas. Finlandia y Brasil son los países con menor reserva de este mineral con 0,05 y 0,02 millones de toneladas.

La Tabla N°2-2 muestra la tendencia de la demanda mundial de litio para el período 2017-2025, del cual se deduce que el consumo mundial de litio metálico aumentaría desde 37.000 ton/año en 2017 a cerca de 91.000 ton/año para 2025, siendo el consumo en el sector pilas y baterías de 64.000 ton/año de litio metálico equivalente. Para 2025 se estima una producción anual de 7.500.000 de autos eléctricos, que demandarían alrededor de 50.000 ton/año de litio metálico.

Tabla 2-2 Proyección demanda mundial de Litio 2017-2025

Años	Demanda de Litio en Baterías de ion – Litio y pilas primarias	Demanda Litio en otros usos (vidrios, cerámicas, fármacos, lubricantes, químicos) (ton)	Demanda total litio metálico (ton)	Demanda total como LCE (tons)
2017	18,000	19,000	37,000	197,000
2018	20,700	19,800	40,500	215,000
2020	28,000	21,800	49,800	265,000
2025	64,000	27,000	91,000	484,000

Fuente: Bloomberg Businessweek, april and september 2017, Benchmark mineral intelligence, 28 february 2017.

2.1.1 Sales y sus usos

El ciclo de evaporación/concentración genera sales intermedias que son residuos del proceso. Estas sales son las siguientes: halita, silvinita, bischofita y carnalita.

- ✓ La halita: sal gema o sal de roca es un mineral sedimentario, el cual se puede formar por la evaporación de agua salada, en depósitos sedimentarios y domos salinos. Está asociada con silvita, carnalita y otros minerales. Su composición química es cloruro de sodio (NaCl).

En relación a los usos, estos se utilizan como condimento alimentario, conservantes y en la industria química para el procesado de la sosa, del bicarbonato sódico, del sodio metálico y del ácido clorhídrico.

- ✓ La silvinita: Es un mineral que cristaliza concretamente como la sal gema y pertenece al grupo de los haluros. Se trata de un mineral de origen sedimentario que surge como resultado de la evaporación del agua del mar, así como la halita, la carnalita y también otros minerales. En la mayoría de casos se presenta en camas de extensión irregular y se puede localizar en fumarolas volcánicas y en depósitos salinos.

Este mineral se utiliza como fuente principal de los principios de potasio que

se utilizan como fertilizantes. Además, es conocida como la principal mena de potasio y se utiliza, como ya se ha explicado, tanto en la fabricación de fertilizantes como en la fabricación de explosivos. Además, en aleación líquida con el sodio se utiliza en los intercambiadores de calor. Se trata de un mineral que es utilizado para la elaboración de perfumes, en fotografía y también en la producción de fertilizantes. También se utiliza para la fabricación de adobes en algunas partes del mundo.

- ✓ Bischofita: Es un elemento con alta presencia en la naturaleza y el tercero más abundante en el agua de mar. Gracias a las condiciones climáticas únicas en el Salar de Atacama (Chile) permite obtener la Bischofita en estado seco, algo que no es posible de lograr en otro lugar del mundo. Este se utiliza para el control y mitigación de polvo en caminos no pavimentados, ya sea en el formato de estabilización o riego superficial, La prevención y control de hielo en carreteras, Otros usos industriales y alimenticios.
- ✓ Carnalita: cloruro de magnesio y de potasio hidratado de Cardona. La carnalita cristaliza en sistema rómbico y tiene dureza 2,5, la misma que la uña. Normalmente se presenta en forma granular. Puede ser incolora, rosada o de color rojo carne, con un brillo vítreo grasoso. La carnalita es deliquescente, se disuelve incluso en la humedad del aire. Su gusto es salado, picante por el potasio y amargo por el magnesio. En la secuencia de la formación Cardona, la carnalita se encuentra más arriba que la silvita y, por tanto, es el primer mineral de potasio que aparece, aunque su presencia es poco constante. Hace tiempo se la consideraba material de desecho, junto con otras sales no utilizables, como la sal gema para fines alimenticios, y se amontonaba fuera de las minas, dejando que se estropeará. Con la llegada de la industria química, la carnalita se convirtió en un material aún más interesante que la sal gema de ella se obtienen fertilizantes, cloro y cantidades considerables de bromo, siendo ésta una de las fuentes principales. Aunque este elemento no aparezca representado en la fórmula,

puede sustituir al cloro en proporciones relativamente importantes.

2.1.2 Producto Comercial

El producto final del ciclo evaporación/concentración es una salmuera con un contenido del 6% Li. Esta salmuera es enviada a la planta de proceso para obtener productos comerciales como el carbonato de litio, el cloruro de litio y el hidróxido de litio. El producto comercial que se produce en mayor escala es el carbonato de litio. El carbonato de litio es el compuesto más importante, porque constituye el producto de mayor volumen de transacción comercial. Además, el carbonato es la materia prima para obtener todos los demás compuestos de litio. Su uso es principalmente en la Industria del aluminio, Industria del vidrio y cerámica, al agregar óxido de litio Li_2O como aditivo se disminuye el punto de fusión, se mejora las propiedades de escurrimiento del material fundido y se reduce el coeficiente de expansión térmica del producto terminado. Grasas lubricantes, sistema de aire acondicionado y control de humedad, el bromuro de litio LiBr y el cloruro de litio LiCl en forma de salmueras, se usan en sistemas industriales de acondicionamiento y deshumidificación de aire, aprovechando que ambos compuestos tienen propiedades altamente higroscópicas que le permiten absorber la humedad del aire, Uso medicinal, el carbonato de litio se usa en el tratamiento de síndromes depresivos (en pequeñas dosis). Caucho sintético, se usan compuestos órgano-litio (butillitio) como catalizadores de polimerización. Este compuesto es un catalizador específico en la polimerización iónica del isopreno, estireno y butadieno para la obtención de cauchos especiales empleados en la manufactura de neumáticos de alta duración. Pilas de litio, la utilización de litio metálico (99,9% pureza) como ánodo en baterías primarias (pilas no recargables) ha tenido un rápido crecimiento, aunque el consumo es relativamente bajo por las pequeñas cantidades requeridas. Las pilas tipo botón, usadas en equipos miniaturizados (marcapasos, relojes, audífonos, calculadoras, etc.) han tenido un gran crecimiento. También se

usa en pilas y/o baterías secundarias (pilas recargables) de celulares, etc. Las pilas de litio entregan una cantidad de energía mucho mayor que las baterías comunes.

2.2 Pozas de Evaporación

La evaporación es un proceso físico que consiste en el pasaje lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, en función de un aumento natural o artificial de la temperatura, lo que produce influencia en el movimiento de las moléculas, agitándolas. Con la intensificación del desplazamiento, las partículas escapan hacia la atmosfera transformándose en vapor.

El movimiento térmico de una molécula de líquido debe ser suficiente para vencer la tensión superficial y evaporar, esto es, su energía cinética debe exceder el trabajo de cohesión aplicado por la tensión superficial a la superficie del líquido. Dado lo anterior, la evaporación acontece más rápidamente a altas temperaturas, a altos caudales entre las fases líquidas y vapor y en líquidos con bajas tensiones superficiales (esto es, con presión de vapor más elevadas).

Con solamente una proporción pequeña de moléculas localizada cerca de la superficie y moviéndose en la dirección correcta para escapar del líquido en un cierto instante, la tasa de evaporación es limitada. Además, como las moléculas de mayor energía escapan y las que quedan tienen menor energía cinética media, la temperatura del líquido se reduce. Este fenómeno también es llamado de enfriamiento evaporativo. Un ejemplo para dicho fenómeno es la transpiración (sudor).

En la evaporación desde una superficie libre los principales factores son la radiación solar, que es la energía para suministrar el calor latente de vaporización, la velocidad del viento requerida para transportar el vapor lejos de la superficie evaporante y el gradiente de humedad específica del aire sobre la superficie.

2.2.1 Factores que afectan a la evaporación

Existen diversos factores que afectan o determina la evaporación. Desde el punto de vista de la evaporación de la atmósfera, está influido directamente por la radiación solar, ya que es la principal fuente de energía para el proceso.

Otro factor no menor, es el viento, ya que renueva el aire próximo a la superficie de evaporación que está saturado. La combinación de humedad atmosférica baja y viento resulta ser la que produce mayor evaporación. El viento también produce un efecto secundario que es el enfriamiento de la superficie del líquido y la consiguiente disminución de la evaporación.

Es necesario considerar además la humedad del aire, ya que, a menor humedad, mayor es la evaporación). Asimismo, la temperatura y su aumento en el aire facilita la evaporación, debido a que, crea una convección térmica ascendente, que facilita la aireación de la superficie del líquido; y por otra parte la presión de vapor de saturación es más alta.

Otros factores de la superficie evaporante es el tipo de superficie evaporante (la máxima evaporación ocurriría en una superficie de agua libre poco profunda), temperatura (a mayor temperatura mayor evaporación) y composición química del agua (cuanto menor sea la mineralización mayor será la evaporación).

La evaporación crece al decrecer la presión atmosférica, manteniendo constantes los demás factores. Por el contrario, al aumentar la altitud, decrece la evaporación. Esta aparente contradicción se explica por la mayor influencia de otros factores (temperatura del aire y del agua) en el ritmo de evaporación que la producida por el decrecimiento con la altitud de la presión atmosférica. Otro grupo de factores influyentes, surgen al considerar la naturaleza y forma de la superficie evaporante: una superficie de agua libre presenta el mínimo de dificultades a la evaporación. Esta dependerá de su extensión y profundidad. Si ambas son pequeñas, los cambios atmosféricos y el terreno, tendrán una gran influencia. En superficies extensas y profundas hay menor influencia del terreno adyacente. La radiación

solar calienta las capas superiores de agua, pero, no todo este calor se emplea en producir evaporación. Una parte, calienta capas más profundas y en ellas se produce un almacenaje de calor, que cuando cesa la radiación o se enfrían las capas superiores, pasa de nuevo a ellas e incrementa la posibilidad de evaporación. La evaporación de la humedad de un suelo sin vegetación se produce en la capa superficial. Al disminuir la humedad de ésta, se produce un desequilibrio y hay una atracción de humedad subyacente, que asciende por capilaridad a la superficie, prosiguiendo la evaporación hasta que esta agua capilar se agota. El agua higroscópica en equilibrio con la humedad atmosférica no se evapora.

2.2.2 Medición de la evaporación

La unidad que generalmente se emplea para evaluar la precipitación es el milímetro (mm) de altura de lámina de agua evaporada. Esta unidad se emplea con el objeto de homogeneizar las medidas de las magnitudes que intervienen en el ciclo hidrológico. Las equivalencias en el sistema métrico decimal no son las mismas que las del mm como unidad de medida de precipitación.

2.2.3 Instrumentos

Evaporación de superficies de agua libre. Se mide con los evaporímetros, también conocidos como atmómetros o atmidómetros. A continuación, la siguiente figura muestra los tanques evaporímetros que miden el volumen de agua necesario para mantener el nivel constante, en la unidad de tiempo, que puede ser 6, 12 o 24 horas. El volumen de agua consumido se transforma en mm de agua evaporada por unidad de tiempo.

Figura 2-1 Tanques Evaporímetros



Fuente: Gustavo Zavala Grundy, abril 2014

2.2.4 Evaporación y saturación de salmuera

El proceso por el cual se debe tratar una salmuera para la obtención de sales trata de concentrar diferentes elementos por medio de la evaporación hasta el punto de sobresaturación de algún elemento o alguna sal para así poder precipitar dicho elemento o sal. La evaporación es un proceso por el cual se elimina agua en forma de vapor que puede darse por aumento de temperatura, baja de presión atmosférica, cambios de humedad ambiental, entre otros factores asociados. En el proceso actual de evaporación se realiza utilizando la energía solar por medio de pozas que son afectadas en mayor medida a la temperatura ambiental, radiación solar, masas de aire (vientos), humedad ambiental.

Saturación y sobresaturación de sales se entiende como saturación de sales en una solución (salmuera) al límite soportable de soluto (sal) por el solvente (agua), por ende la sobresaturación se produce cuando la cantidad de soluto no puede ser “sostenido” por el solvente y es justo en este punto donde se produce la precipitación de sales. En el proceso actual de concentración de salmueras la precipitación de sales se lleva a cabo en diferentes pozas dependiendo al tipo de sal que se quiera precipitar.

Para visualizar como es el proceso actual de la salmuera en el Salar de Atacama y ver el tamaño de las pozas de evaporación, a continuación se muestra una foto

aérea de las instalaciones de SQM y en la siguiente sección se explica este proceso.

Figura 2-2 Pozas de salmuera, SQM

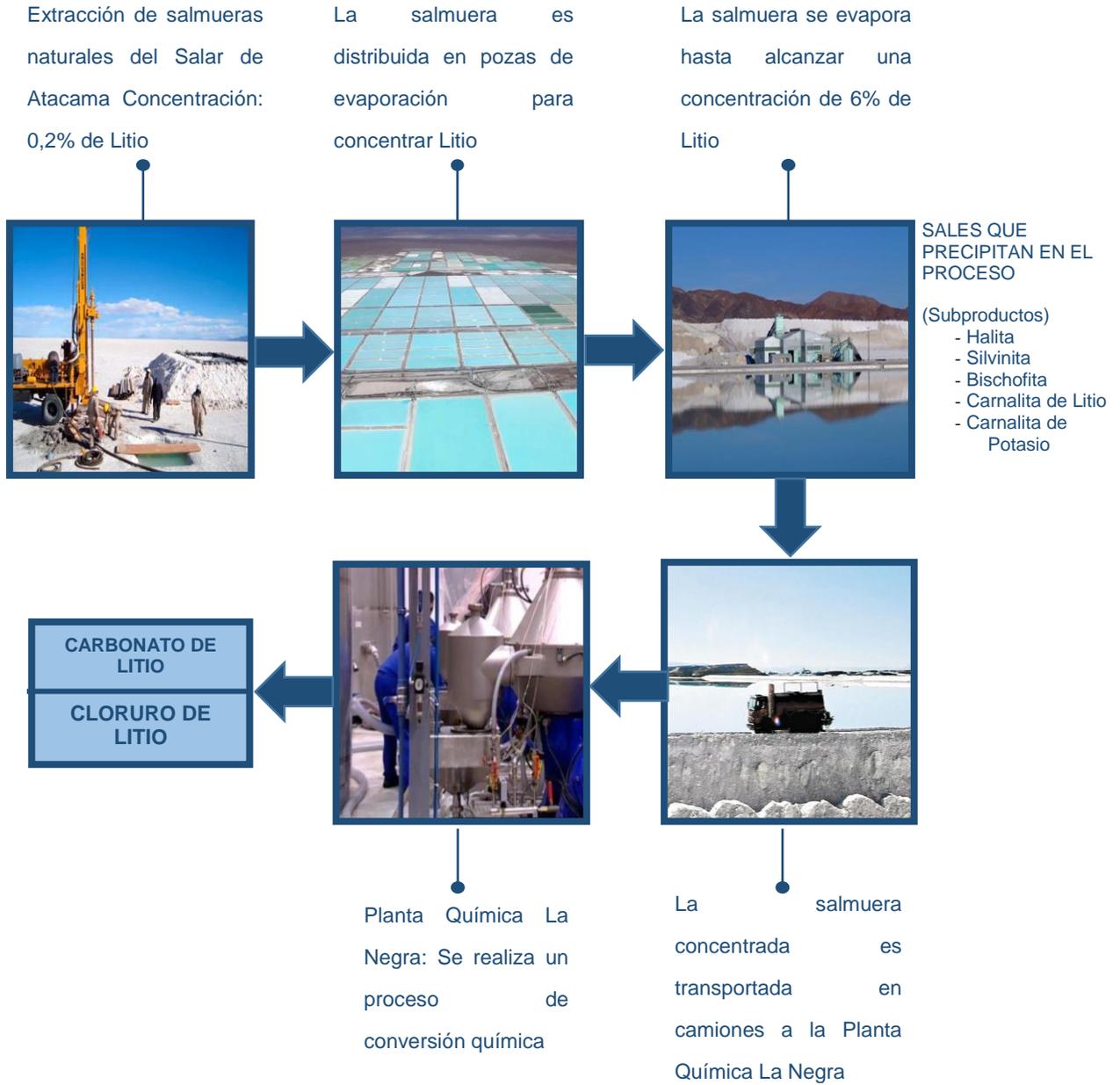


Fuente: Karina Palma, noviembre 2017

2.3 Proceso explicativo

Las salmueras son bombeadas desde el acuífero en dos áreas diferentes del salar. En una de ellas, la salmuera extraída contiene niveles de concentración de potasio y litio. En la otra, las salmueras obtenidas contienen altas concentraciones de sulfato y boro. Luego de su extracción, las salmueras son ubicadas en las lagunas de evaporación solar que cubren una gran superficie de sobre 1.700 hectáreas. El desierto de Atacama es el lugar más seco de la tierra, con un índice de evaporación solar de 3.200 milímetros y precipitaciones promedio de sólo 15 milímetros al año. Esto se traduce en un proceso previo de concentración de energía solar extremadamente eficiente. De las soluciones resultantes y tras una serie de procesos, se produce cloruro de potasio, carbonato de litio, sulfato potásico, ácido bórico y cloruro magnésico. A continuación, la siguiente figura muestra gráficamente el proceso descrito anteriormente.

Figura 2-3 Proceso salmuera de Litio



Fuente: Rockwood

2.4 Ventajas y desventajas

El proceso actual de evaporación natural por medio de pozas de evaporación a estado vigente por varios años en la industria chilena, desde un punto de vista comparativo. A continuación, la siguiente tabla muestra las ventajas y desventajas del proceso actual.

Tabla 2-3 Ventaja y desventaja del proceso de salmuera de litio

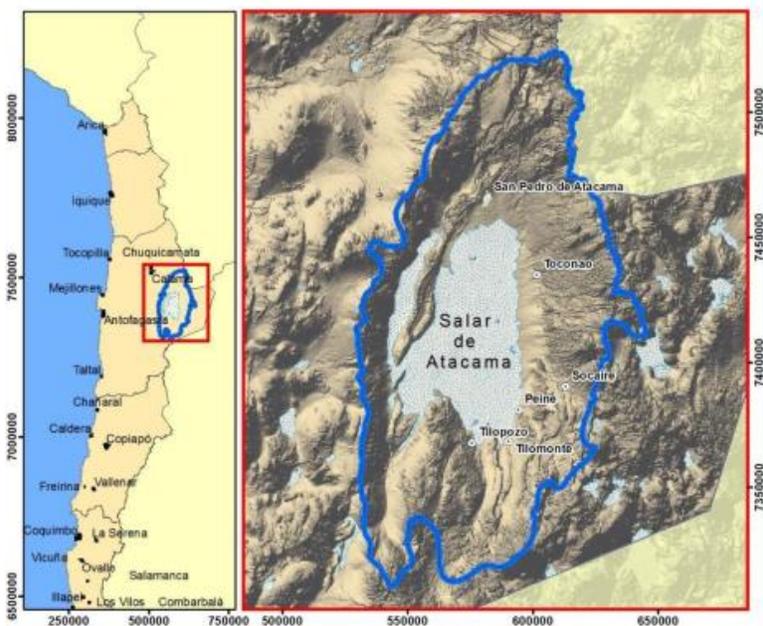
Ventaja	Desventaja
<ul style="list-style-type: none">➤ Bajo costo de operación➤ Bajo consumo de energía➤ Proceso simple en cuanto a la medición de concentraciones y control de pozas	<ul style="list-style-type: none">➤ Alto tiempo de procesamiento➤ Baja posibilidad de mecanizar el proceso➤ Volúmenes definidos de salmuera a tratar➤ Bajo control técnico del proceso (Temperatura, tasa de evaporación, humedad ambiental, etc.)➤ Baja respuesta a las variaciones del mercado

CAPÍTULO 3. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del salar de Atacama se ubica en la Región de Antofagasta, aproximadamente a 150 kilómetros al sureste de la ciudad de Calama, entre los 22°57' y 23°47' latitud sur. La cuenca corresponde a una cuenca endorreica donde el Salar de Atacama se ubica en la parte más baja de la cuenca homónima, tiene forma elipsoidal con un eje mayor de 85 km y una anchura máxima de 50 km. La parte central se encuentra a 2300 m.s.n.m. (Muñoz et al., 2004).

En las cercanías del Salar de Atacama se encuentran los poblados de San Pedro de Atacama en el norte y Toconao y Peine en el margen este. En la Figura 3-1 se destaca la ubicación del Salar de Atacama y su cuenca en color azul.

Figura 3-1 Ubicación Salar de Atacama



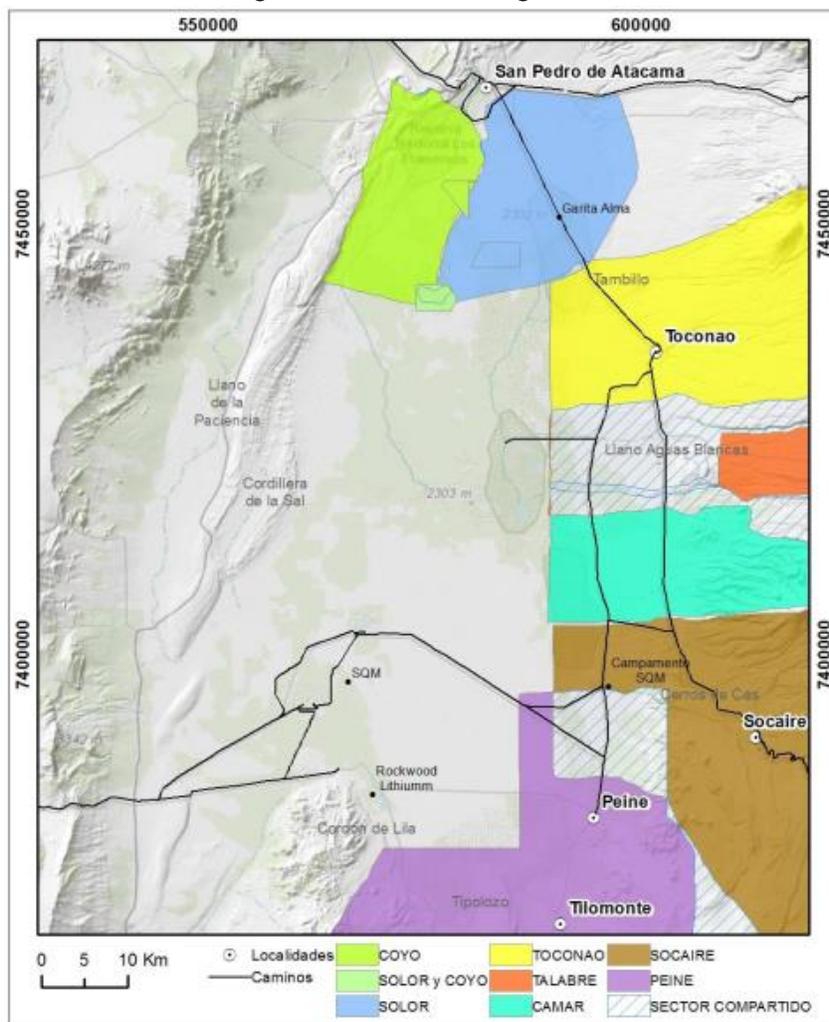
Fuente: Dirección General de Aguas

Cabe destacar que en toda la comuna de San Pedro de Atacama existe una fuerte presencia de pueblos originarios, entre los cuales se encuentran 8 comunidades con terrenos en el sector del Salar de Atacama.

Además, existen reservas naturales del Servicio Nacional Áreas Silvestres

(CONAF). La ubicación de estos y de los accesos principales se presenta en la Figura 3-2.

Figura 3-2 Pueblos originarios



Fuente: Dirección General de Aguas

3.1 Clima en la región de Antofagasta

En la región de Atacama, las características del clima son de una marcada aridez. El desierto se manifiesta plenamente hacia la zona intermedia, donde la influencia marítima, propia del relieve, pierde importancia. La situación de extrema aridez en la Depresión Intermedia y la escasa vegetación existente definen un paisaje natural conocido como Desierto de Atacama. En esta región se localizan cuatros

subtipos climáticos desérticos, localizados en franjas longitudinales⁵.

A lo largo de la costa se localiza el clima desértico costero nuboso. Sus efectos se manifiestan hasta 20 kilómetros al interior donde la sequedad atmosférica es mayor, debido a que por causas del relieve la influencia marítima es retenida en los cerros de la Cordillera de la Costa. Las características principales de este subtipo climático se traducen en un efecto modelador de las temperaturas producido por la corriente fría de Humboldt, la presencia de abundante humedad, neblinas matinales y la ausencia de precipitaciones. Las lluvias registran un leve aumento hacia el sur del litoral, de igual manera lo mismo ocurre hacia el interior del altiplano.

A continuación, la tabla N° 3-1 muestra antecedentes climáticos de la región de Antofagasta de los últimos 5 años.

Tabla 3-1 Antecedentes climáticos de la región de Antofagasta.

Datos	2014	2015	2016	2017	2018
Temperatura media anual	16.4°C	17.4°C	17.3°C	17.2°C	16.5°C
Temperatura máxima media anual	19.5°C	20.5°C	20.1°C	20.1°C	19.4°C
Temperatura mínima media anual	14.2°C	15.3°C	15.1°C	15.1°C	14.5°C
Humedad media anual	70.9%	70.7%	72.9%	73.4%	71.6%
Precipitación total anual	1.27 mm	14.98 mm	4.57 mm	21.59 mm	3.05 mm
Visibilidad media anual	12.2 Km	12.4 Km	11 Km	11.3 Km	11.4 Km
Velocidad media anual del viento (Km/h)	13.1 km/h	13.0 km/h	13.0 km/h	13.6 km/h	13.6 km/h
Días computados de mediciones	364	361	364	364	358

Fuente: Elaboración Propia

La temperatura promedio de los últimos 5 años es de 16,96 C° presentando en el 2014 la temperatura más baja en esta serie con 16,4C°. En cuanto a las temperaturas media máxima registrada en durante el año es de 19,2C° en el cual,

⁵ Biblioteca del Congreso.

en el año 2015 supera este promedio con 20,5C°. No obstante, la temperatura media mínima registrada es de 14,2C° en el 2014.

Respecto a la humedad media anual es de 71,9% relativa en el ambiente, en el cual los últimos 3 años se ha acercado a este promedio.

En cuanto a las precipitaciones, en general son bajas presentando un promedio en la serie de 9,09mm de agua caída. Sólo en el año 2016 y 2018 fueron años que estuvieron bajo este promedio con 4.57 mm y 3.05 mm respectivamente.

Finalmente, las velocidades del viento bordean en promedio los últimos 5 años los 13,26 km/hrs. Esta velocidad se mantiene relativamente constante durante este periodo.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL PROYECTO

En esta sección se describe las características que inciden en la tasa de evaporación de la salmuera, como son la temperatura, el sol y su energía y los vientos.

4.1 Temperaturas en San Pedro de Atacama

El clima en San Pedro de Atacama es un clima desértico y clasificada como BWk⁶ por Köppen⁷. La temperatura media anual es 13,3 °C en San Pedro de Atacama y las precipitaciones en promedios son 3,5 mm. A continuación, la siguiente tabla muestra los datos del 2018 en relación al comportamiento climático de San Pedro de Atacama y sus precipitaciones.

Tabla 4-1 Antecedentes climáticos de San Pedro de Atacama 2018

San Pedro de Atacama	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Temperatura media (°C)	17.1	16.8	15.9	13.9	11	8.2	8.4	9.8	12.4	14.1	15.5	16.4
Temperatura min. (°C)	10	9.9	8.9	6.5	3.2	0.3	0.5	1.7	4.3	6.2	7.8	9
Temperatura máx. (°C)	24.3	23.7	23	21.3	18.8	16.2	16.4	17.9	20.6	22	23.2	23.9
Temperatura media (°F)	62.8	62.2	60.6	57.0	51.8	46.8	47.1	49.6	54.3	57.4	59.9	61.5
Temperatura min. (°F)	50.0	49.8	48.0	43.7	37.8	32.5	32.9	35.1	39.7	43.2	46.0	48.2
Temperatura máx. (°F)	75.7	74.7	73.4	70.3	65.8	61.2	61.5	64.2	69.1	71.6	73.8	75.0
Precipitación (mm)	22	5	2	2	1	0	0	0	3	3	1	3

Fuente: Climate data ORG.

Como se mencionó anteriormente, la temperatura media anual es de 13,3C° en el cual, 7 meses del año las temperaturas medias están sobre el promedio. En cuanto a las temperaturas mínimas, en promedio bordean los 5,7 C° presentando 5 meses datos menores al promedio anual. Los meses de junio y julio se registraron 0,3 y 0,5 grados promedio. En cambio, las temperaturas máximas son

⁶ BWk - Árido frío: La temperatura media anual está por debajo de los 18 °C.

⁷ Consiste en una clasificación climática natural mundial que identifica cada tipo de clima con una serie de letras que indican el comportamiento de las temperaturas y precipitaciones que caracterizan dicho tipo de clima.

de 20,9 C° que se registran 7 meses temperaturas superiores al promedio.

Finalmente, las precipitaciones promedio son de 3,5mm. Este promedio se produce principalmente por el mes de enero que se registró 22 mm de agua caída. Entre los meses de junio al mes de agosto no se registró precipitaciones.

4.2 Sol y energía solar

La duración del día en San Pedro de Atacama varía durante el año. En un año normal, el día más corto es el *21 de junio*, con *10 horas y 44 minutos* de luz natural; el día más largo es el *22 de diciembre*, con *13 horas y 33 minutos* de luz natural.

Gráfico N° 4-1 Horas de Luz natural y crepúsculo



Fuente: Weather Spark

La cantidad de horas durante las cuales el sol está visible (línea negra). De abajo (más amarillo) hacia arriba (más gris), las bandas de color indican: luz natural total, crepúsculo y noche total.

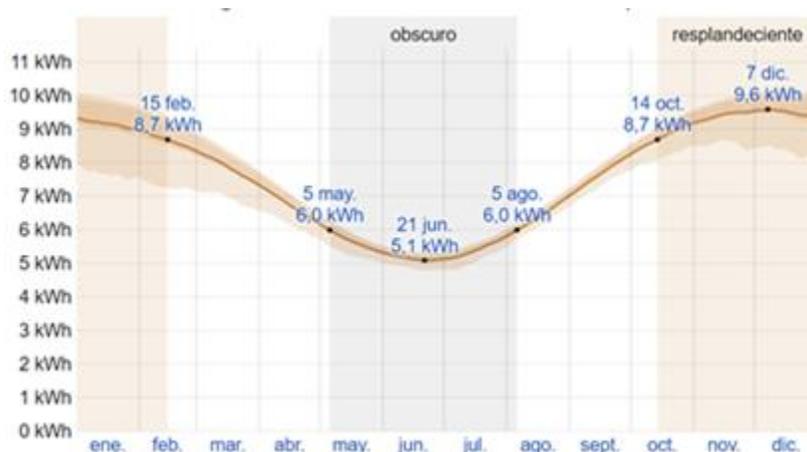
La salida del sol más temprana es a las 6:38 el 29 de noviembre, y la salida del sol más tardía es 1 hora y 22 minutos más tarde a las 8:00 el 11 de agosto. La puesta del sol más temprana es a las 17:54 el 7 de junio, y la puesta del sol más tardía es 2 horas y 29 minutos más tarde a las 20:23 el 14 de enero.

En cuanto a la energía solar, el siguiente gráfico muestra la energía solar de onda corta incidente diario total que llega a la superficie de la tierra en un área amplia,

tomando en cuenta las variaciones estacionales de la duración del día, la elevación del sol sobre el horizonte y la absorción de las nubes y otros elementos atmosféricos. La radiación de onda corta incluye luz visible y radiación ultravioleta.

La energía solar de onda corta incidente promedio diaria tiene variaciones estacionales considerables durante el año.

Gráfico N° 4-2 Energía solar de onda corta incidente diaria promedio



Fuente: Weather Spark

El período más resplandeciente del año dura 4,0 meses, del 14 de octubre al 15 de febrero, con una energía de onda corta incidente diaria promedio por metro cuadrado superior a 8,7 kWh. El día más resplandeciente del año es el 7 de diciembre, con un promedio de 9,6 kWh.

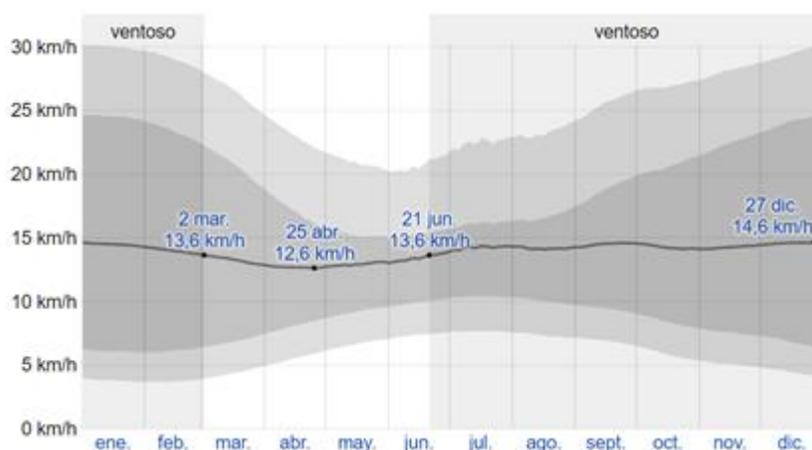
El periodo más obscuro del año dura 3,0 meses, del 5 de mayo al 5 de agosto, con una energía de onda corta incidente diaria promedio por metro cuadrado de menos de 6,0 kWh. El día más obscuro del año es el 21 de junio, con un promedio de 5,1 kWh.

4.3 Viento en San Pedro de Atacama

Esta sección trata sobre el vector de viento promedio por hora del área ancha (velocidad y dirección) a 10 metros sobre el suelo. El viento de cierta ubicación depende en gran medida de la topografía local y de otros factores; y la velocidad instantánea y dirección del viento varían más ampliamente que los promedios por hora.

La velocidad promedio del viento por hora en San Pedro de Atacama tiene variaciones estacionales leves en el transcurso del año. A continuación, el siguiente gráfico muestra la velocidad del viento promedio.

Gráfico N° 4-3 Velocidad del viento promedio



El promedio de la velocidad media del viento por hora (línea gris oscuro), con las bandas de percentil 25º a 75º y 10º a 90º.

Fuente: Weather Spark

La parte más ventosa del año dura 8,4 meses, del 21 de junio al 2 de marzo, con velocidades promedio del viento de más de 13,6 kilómetros por hora. El día más ventoso del año es el 27 de diciembre, con una velocidad promedio del viento de 14,6 kilómetros por hora.

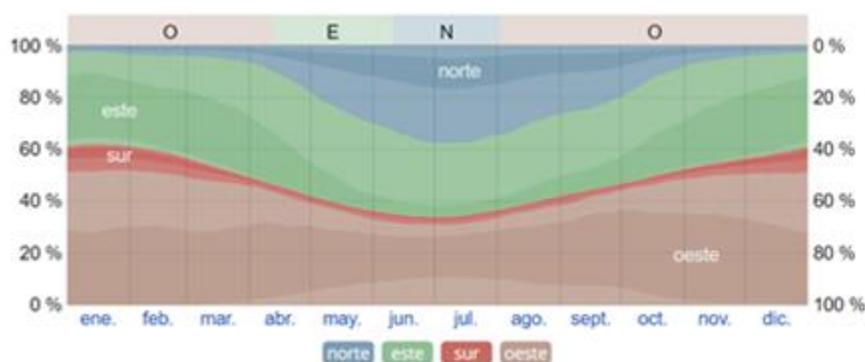
El tiempo más calmado del año dura 3,6 meses, del 2 de marzo al 21 de junio. El día más calmado del año es el 25 de abril, con una velocidad promedio del viento

de 12,6 kilómetros por hora.

La dirección predominante promedio por hora del viento en San Pedro de Atacama varía durante el año.

El viento con más frecuencia viene del este durante 1,9 meses, del 12 de abril al 10 de junio, con un porcentaje máximo del 44 % en 12 de abril. El viento con más frecuencia viene del norte durante 1,7 meses, del 10 de junio al 2 de agosto, con un porcentaje máximo del 38% en 10 de julio. El viento con más frecuencia viene del oeste durante 8,3 meses, del 2 de agosto al 12 de abril, con un porcentaje máximo del 52 % en 1 de enero.

Gráfico N° 4-4 Dirección del viento



El porcentaje de horas en las que la dirección media del viento viene de cada uno de los cuatro puntos cardinales, excluidas las horas en que la velocidad media del viento es menos de 1,6 km/h. Las áreas de colores claros en los límites son el porcentaje de horas que pasa en las direcciones intermedias implícitas (noreste, sureste, suroeste y noroeste).

Fuente: Weather Spark

4.4 Evaporación en el Salar de Atacama

De acuerdo a la información presentada en el EIA “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” (DICTUC, 2004), la tasa de evaporación de bandeja tiene un comportamiento cíclico, registrándose tasas mayores en los meses de verano que en los meses de invierno, y siendo hasta

ahora una constante.

Para determinar la evaporación mensual, se calculó la incidencia de cada mes en el valor anual a partir de los promedios de las estadísticas medidas en las estaciones Chaxas, Peine y Salar. Lo anterior según estudios de DICTUC, 2004.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Estadística de evaporación media

Evaporación (mm/mes)			
Estación	Chaxas	Peine	Salar
Enero	334,80	315,58	393,70
Febrero	271,32	373,56	329,28
Marzo	256,37	275,90	287,06
Abril	207,90	209,70	230,70
Mayo	141,98	159,03	151,28
Junio	110,70	132,00	110,10
Julio	126,79	143,53	120,59
Agosto	163,99	175,77	173,60
Septiembre	221,40	234,60	234,90
Octubre	282,41	291,09	314,65
Noviembre	326,70	307,80	340,80
Diciembre	359,60	325,81	380,06
Total	2.803,96	2.844,37	3.066,72

Fuente: DICTUC, 2004

En relación a las estadísticas, el Salar es el lugar con mayor evaporación durante el año con 3066,72 mm. El mes con mayor tasa de evaporación es el mes de enero y diciembre con 393,70 y 380,06 mm/mes respectivamente. En relación a Peine, el mes de febrero y diciembre son las estaciones en las cuales la tasa de evaporación aumenta a 373,56 y 325,81 mm/mes respectivamente. Finalmente, Chaxas durante el mes de diciembre y enero son los meses con mayor evaporación con 359,60 y 334,80 mm/mes.

4.4.1 Relación evaporación mensual con temperatura mensual promedio

Dado el proceso de evaporación es necesario corroborar que a mayor temperatura mayor es el proceso de evaporación. A continuación, la siguiente tabla muestra la relación de la tasa de evaporación extraída del sector salar de con la temperatura Media mensual de San Pedro de Atacama en el periodo 2018.

Tabla 4-3: Relación tasa de evaporación y temperatura

Mes	Evaporación (mm/mes)	Máxima (°C)
Enero	393,7	24,3
Febrero	329,28	23,7
Marzo	287,06	23
Abril	230,7	21,3
Mayo	151,28	18,8
Junio	110,1	16,2
Julio	120,59	16,4
Agosto	173,6	17,9
Septiembre	234,9	20,6
Octubre	314,65	22
Noviembre	340,8	23,2
Diciembre	380,06	23,9
Promedio	255,6	20,9

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la tabla 4-3, existe coincidencia entre la temperatura y la tasa de evaporación. Entre los meses de octubre hasta marzo, tanto la tasa de evaporación como la temperatura están sobre el promedio (255,6mm/mes y 20,9C° respectivamente), no obstante, entre los meses de abril y septiembre estos indicadores están por debajo del promedio, presentando los meses de junio y julio los valores más bajos de esta serie con 110,1mm/mes y 16,2C°.

4.4.2 Relación evaporación mensual con horas luz y energía solar

En cuanto a la relación de la tasa de evaporación con la temperatura, la luz solar y la energía solar, la tabla 4-4 muestra la relación entre estos factores:

Tabla 4-4: Relación tasa de evaporación, temperatura, horas luz y energía

Mes	Evaporación mm/mes	Máxima (°C)	Horas de Luz (Hrs)	Energía Solar (KWH)
Enero	393,7	24,3	13:22	9,2
Febrero	329,28	23,7	12:53	8,7
Marzo	287,06	23	12:15	7,9
Abril	230,7	21,3	11:35	6,7
Mayo	151,28	18,8	11:01	5,7
Junio	110,1	16,2	10:45	5,1
Julio	120,59	16,4	10:51	5,4
Agosto	173,6	17,9	11:18	6,4
Septiembre	234,9	20,6	11:54	7,6
Octubre	314,65	22	12:34	8,8
Noviembre	340,8	23,2	13:10	9,4
Diciembre	380,06	23,9	13:30	9,3
Promedio	255,6	20,9	12:06	7,5

Fuente: Elaboración Propia

En relación a estos 4 factores, se puede observar que existe relativa coincidencia entre los meses de mayo a septiembre respecto a que estos valores están por debajo del promedio en cada uno de los factores. En relación al resto de los meses, existe mayor coincidencia entre las horas luz y la energía solar que se emite, a mayor cantidad de horas luz, mayor es la energía solar que se emite. Estos dos factores se mueven, en el caso de las horas luz, entre 10:45 horas y las 13:30 hrs y en el caso de los KWH que se emiten entre 5,1 y 9,4 hrs.

Es necesario destacar para el año 2018, existe una anomalía en el mes de noviembre, en el cual se produce menos evaporación (340,8) a 23,2C° con 13:10 de luz que se genera una radiación de 9,4 KWH, ya que 1KWH menos produjo

40,8 mm/mes de evaporación en comparación al mes de diciembre y enero del mismo año.

4.4.3 Relación evaporación mensual con velocidad del viento

En cuanto a la tasa de evaporación y la velocidad del viento, a continuación, la siguiente tabla muestra la existencia de correlación.

Tabla 4-5: Relación tasa de evaporación y velocidad del viento

Mes	Evaporación mm/mes	Velocidad del Viento Km/Hrs
Enero	393,7	14,5
Febrero	329,28	14,0
Marzo	287,06	13,3
Abril	230,7	12,8
Mayo	151,28	12,9
Junio	110,1	13,4
Julio	120,59	14,2
Agosto	173,6	14,2
Septiembre	234,9	14,4
Octubre	314,65	14,3
Noviembre	340,8	14,3
Diciembre	380,06	14,5
Total	255,6	13,9

Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la velocidad del viento la velocidad promedio es de 13,9 km/hrs, en el cual el mes de diciembre y enero se presenta con 14,5 km/hrs, no obstante, a lo anterior, en los meses de abril y mayo los vientos disminuyen a 12,8 km/hrs y 12,9 km/hrs. La diferencia que existe entre el mínimo y el máximo son de 1.6km/hrs por tanto se concluye que la velocidad del viento no debería incidir en la tasa de evaporación.

4.4.4 Relación evaporación y sus factores

Dado lo expuesto en las secciones anteriores, a continuación, la siguiente tabla muestra resumidamente la relación que existe entre los factores.

Tabla 4-6: Relación tasa de evaporación y otros factores

Mes	Evaporación (mm/mes)	Máxima (°C)	Horas de Luz (Hrs)	Energía Solar (kwh)	Velocidad del Viento (Km/hrs)
Enero	393,7	24,3	13:22	9,2	14,5
Febrero	329,28	23,7	12:53	8,7	14,0
Marzo	287,06	23	12:15	7,9	13,3
Abril	230,7	21,3	11:35	6,7	12,8
Mayo	151,28	18,8	11:01	5,7	12,9
Junio	110,1	16,2	10:45	5,1	13,4
Julio	120,59	16,4	10:51	5,4	14,2
Agosto	173,6	17,9	11:18	6,4	14,2
Septiembre	234,9	20,6	11:54	7,6	14,4
Octubre	314,65	22	12:34	8,8	14,3
Noviembre	340,8	23,2	13:10	9,4	14,3
Diciembre	380,06	23,9	13:30	9,3	14,5
Total	255,56	20,9	12:06	7,5	13,9

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar existe correlación entre la tasa de evaporación y el resto de los factores entre los meses de abril y septiembre, ya que los valores expresados están por debajo del promedio, a excepción de la velocidad del viento que los valores aumentan levemente al pasar de los meses.

Otro aspecto importante destacar, que de todos los factores que inciden en la tasa de evaporación, la temperatura es el factor que posee una correlación directa.

4.5 Producción anual

El tiempo de cosecha toma un promedio de 20 a 28 días, para después volver a llenar la poza.

Según una entrevista efectuada a la empresa SQM (Sociedad Química y Minera), en la extracción de sales o cosecha se obtiene alrededor de 14 millones de m³ al año, lo que equivale a 35.000 – 40.000 m³ de sales diarios. Según las características de concentración obtenidas en las sales de cada poza, será su destino, de acuerdo a los requerimientos de producción de las distintas plantas.

A continuación, la siguiente tabla muestra el nivel de producción mensual, basado en la producción obtenida en el año 2017 y la tasa de evaporación del sector que produce más evaporación con el objeto de conocer la distribución de la producción.

Tabla 4-7: Producción mensual

Mes	Evaporación (mm/mes)	Cosecha (m ³)
Enero	393,7	1.810.133
Febrero	329,28	1.513.946
Marzo	287,06	1.319.829
Abril	230,7	1.060.700
Mayo	151,28	695.547
Junio	110,1	506.212
Julio	120,59	554.442
Agosto	173,6	798.169
Septiembre	234,9	1.080.011
Octubre	314,65	1.446.681
Noviembre	340,8	1.566.912
Diciembre	380,06	1.747.419
Total	3066,72	14.100.000

Como se observa a menor tasa de evaporación, menor es la producción. Asimismo, entre los meses de abril y septiembre posee una producción que está por debajo del promedio (1.175.000m³).

4.6 Propuesta de infraestructura (Prueba de Concepto)

Dado lo expuesto anteriormente, el aumento o disminución de la producción, está en directa relación con la tasa de evaporación y esta a su vez, directamente relacionado con el aumento o disminución de la temperatura, se propone de la generación de un mecanismo que permita subir la temperatura a lo menos en 1 grado en los meses de abril a septiembre con el objeto de aumentar la producción que claramente tendrá un impacto positivo en la producción. Para lo anterior, se propone un constructo que imparta calor, mediante resistencia eléctrica sobre la superficie de alguna de las pozas de evaporación, especialmente en las pozas finales del proceso dado su tamaño.

A continuación, la siguiente figura, visualiza la ubicación de una malla eléctrica que permita generar el calor suficiente para el aumento en un grado la temperatura.

Figura 4-1 Diseño de malla en forma de franja



Fuente: Diseño propio

Para la generación de esta energía por medio de ductos de resistencia, se propone que la alimentación sea por medio de paneles solares, instalando un temporizador para monitorear el tiempo y un termómetro digital con el objeto de controlar el aumento de temperatura. Es recomendable considerar adicionalmente baterías eléctricas de respaldo en caso de no contar con lo kWh necesarios para el aumento de grado.

A continuación, la siguiente imagen visualiza la instalación de estos aparatos.

Figura 4-2 Diseño de malla en forma de franja



Fuente: Diseño propio

Como se observa, la malla eléctrica estaría conectada con los paneles solares y con la batería eléctrica de respaldo. La ubicación estos paneles debe estar en un Angulo de 45 grados de frente a la luz solar.

4.6.1 Cálculos estadísticos de temperatura, evaporación y producción

Dado los análisis presentados anteriormente, la solución de la malla eléctrica viene apoyar el aumento de temperatura en aquellos meses que están por debajo de la producción promedio anual que corresponde a los meses de abril a septiembre, es decir:

Tabla 4-8: Evaporación, temperatura y producción mensual

Mes	Evaporación (mm/mes)	Máxima (°C)	Cosecha (m³)
Enero	393,7	24,3	1.810.133
Febrero	329,28	23,7	1.513.946
Marzo	287,06	23	1.319.829
Abril	230,7	21,3	1.060.700
Mayo	151,28	18,8	695.547
Junio	110,1	16,2	506.212
Julio	120,59	16,4	554.442
Agosto	173,6	17,9	798.169
Septiembre	234,9	20,6	1.080.011
Octubre	314,65	22	1.446.681
Noviembre	340,8	23,2	1.566.912
Diciembre	380,06	23,9	1.747.419
Total	3066,72	20,9	14.100.000

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa en la tabla el nivel de producción está por debajo de los 1.175.000 lo demarcado con rojo, por tanto, a continuación, se presenta en la tabla 4-9 el aumento en 1 grado la temperatura en los meses de abril a septiembre se

genera un 2% de aumento en la producción mensual promedio.

Tabla 4-9: Aumento de la temperatura en 1 grado

Mes	Máxima °C	C° Aumenta 1 grado	Evaporación mm/mes	Evaporación aumentada	Delta aumento Evaporación	Cosecha m ³
Enero	24,3	24,3	393,7	393,7	0%	1.810.133
Febrero	23,7	23,7	329,3	329,3	0%	1.513.946
Marzo	23	23	287,1	287,1	0%	1.319.829
Abril	21,3	22,3	230,7	241,5	5%	1.124.409
Mayo	18,8	19,8	151,3	159,3	5%	737.324
Junio	16,2	17,2	110,1	116,9	6%	536.616
Julio	16,4	17,4	120,6	127,9	6%	587.744
Agosto	17,9	18,9	173,6	183,3	6%	846.109
Septiembre	20,6	21,6	234,9	246,3	5%	1.144.879
Octubre	22	22	314,7	314,7	0%	1.446.681
Noviembre	23,2	23,2	340,8	340,8	0%	1.566.912
Diciembre	23,9	23,9	380,1	380,1	0%	1.747.419
Total	20,9	21,4	3066,72	3120,84838	2%	14.382.000

Fuente: Elaboración propia

Al aumentar en 1 grado la temperatura, el promedio de temperatura sube en un 2%, pasando de 20,9C° a 21,4C°, esto implica un aumento entre un 5% a un 6% en la evaporación en promedio entre los meses de abril y mayo, lo que genera un 2% igualmente de aumento. Dado lo anterior, la producción podría llegar a 14.382.000.

4.7 Evaluación Económica

Dado los resultados presentados anteriormente, en esta sección se presentará un estudio de costo de la propuesta presentada para la malla eléctrica y un análisis del beneficio económico que se tendría considerando aumento de la producción al aumentar en un grado la temperatura entre los meses de abril a septiembre.

4.7.1 Ingresos y Producción

Precio del Litio

El litio ha sido uno de los metales con mejor performance en términos de precios en el 2016 y 2017. El valor del carbonato de litio (grandes contratos, CIF Asia), como lo declara la Comisión Chilena del Cobre en su documento “Mercado Internacional del Litio y su potencial en Chile” del 2017, ha evidenciado alzas significativas en los dos últimos años, pasando desde un precio promedio el 2015 de US\$ 5.851/ton a un valor de US\$ 13.719/ton en el periodo enero-noviembre del 2017.

Es necesario destacar que el mercado del litio es relativamente pequeño en comparación al de otros metales, por lo que éste se negocia directamente entre productores con clientes y no existe una bolsa de metales donde se pueda transar públicamente. Además, existen diversos productos, calidades y especificaciones lo cual hace complejo la estandarización de su precio, generando niveles de opacidad en el mercado. Los precios que publican consultoras son referenciales y tienen como fuente las cifras de comercio internacional de los exportadores e importadores.

Ingresos Promedios

Considerando que la cosecha de salmuera, genera un incremento de 282 toneladas métricas, genera un ingreso adicional de 3.868.758 Dólares si se vende

al precio promedio de 13.719 dólares la tonelada. A continuación, la siguiente tabla muestra estos valores.

Tabla 4-10: Ingreso Promedio de producción.

Ítems	Producción Carbonato de Litio	US/ton	Ingresos (MM US)
Sin Aumento Temperatura	14.100	\$ 13.719	\$ 193.4
Con Aumento	14.382	\$ 13.719	\$ 197.4
Incremento	282	\$ 13.719	\$ 3.9

Fuente: Elaboración propia

4.7.2 Estudio de Costos Asociados

Costos Asociados al Proyecto

Para el desarrollo del estudio de costos se establecen los siguientes supuestos:

- Los pozos poseen una dimensión de 6 metros de ancho por 12 metros de ancho.
- La temperatura promedio utilizada es de 21 °C
- Los paneles solares poseen una duración de 10 años
- Las baterías eléctricas poseen una vida útil de 4 años con recambio cada 3 años.
- Los conversores poseen una duración de 15 años.
- Los espacios entre las rendijas 0,01 metros de distancia

Asimismo, los costos asociados a este proyecto se dividen en 2 grandes áreas:

- Costos de adquisición de insumos y material específico: que se requiere para la confección del Malla eléctrica y contempla: Paneles solares, baterías eléctricas, temporizador, termómetro digital, inversor, batería, y el desarrollo de la malla eléctrica.

- Costos asociados al Diseño: que contempla principalmente los estudios para la implementación de la malla eléctrica

La tabla 4-11 presenta los costos estimados asociados a la inversión del proyecto:

Tabla 4-11: Costos asociados a la inversión del proyecto

Concepto	Inversión - MM CLP\$
Costos de adquisición de insumos y material	7,8
Paneles solares	3,5
Confección malla eléctrica	1,5
Otros	2,8
Costos asociados al diseño	20
Estudio de Ingeniería	40
Estudio red eléctrica	10
Estudio de estructuras (cálculo)	10
Estudio de ingeniería de detalle	20
Operación y Mantenimiento anual (20% Inversión)	1,6
Subtotal – Inversión	69,4
Contingencia 30%	20,8
Total, Inversión - MM CLP\$	90,2
Total, Inversión - MM US\$	<u>\$ 0,14</u>
Tasa cambio %CLP/US\$	661

Fuente: Elaboración Propia

En relación a los costos de adquisición de insumos y material se presupuesta para un malla eléctrica que abarca un pozo de 6 metros de ancho por 12 metros de largo. Estos costos ascienden a \$ 7.8 millones para el desarrollo de energía eléctrica que permite el aumento de temperatura de la malla eléctrica.

En cuanto a la confección de la malla eléctrica, se considera principalmente los recursos humanos y el acero. Esto no considera externalizar el proceso de soldadura de CLP\$ 1.5 millones que contempla alrededor de MM CLP\$ 0.30 en material que debe ser procesado (cortado) ya que los perfiles son 6 metros de

largo y 5 centímetro de ancho. Asimismo, se considera el desarrollo y la instalación de la parrilla por separado.

Finalmente se considera costos de operación y mantención como un 20% de la inversión en \$1.6 millones anual para el desarrollo de capacitación al personal de la operación como el seguimiento y control de la temperatura homogénea de la malla eléctrica en los periodos que se activa.

A partir de la estimación de la inversión y el costo de operación para una poza de prueba, se estimó el costo unitario de la inversión y operación por unidad de superficie de pozas en que se aplicaría este concepto. Las pozas seleccionadas son aquellas ubicadas en la etapa final del proceso de concentración/evaporación que tienen una superficie estimada en 2.1 hectáreas cada una, existiendo, a nivel industrial, tres pozas de este tipo. La superficie total a cubrir con la grilla propuesta es de 6,3 Ha.

La tabla 4-12 presenta el flujo de caja estimado para el caso de aplicar este concepto a nivel industrial en tres pozas del sistema de evaporación/concentración de salmuera de litio.

Flujo de Caja

Tabla 4-12: Flujo de caja – MM US\$

Flujo de caja											
Período		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inversión	-\$8,62										
Operación/mantención		\$ 2,07	\$ 2,07	\$ 2,07	\$ 2,07	\$ 2,07	\$ 2,07	\$ 2,07	\$ 2,07	\$ 2,07	\$ 2,07
Ingresos		\$ 3,9	\$ 3,9	\$ 3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
FC	-\$ 8,43	\$ 1,83	\$ 1,83	\$ 1,83	\$ 1,83	\$ 1,83	\$ 1,83	\$ 1,83	\$ 1,83	\$ 1,83	\$ 1,83
VP (i = 8%)	\$ 3,37										

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO 5. Análisis DAFO CAME

Debilidades	capacidad deficiente	Corregir	Capacidad continua
Amenazas	Uso de electricidad, implementar el uso de dispositivos sobre las pozas	Afrontar	Mayor conocimiento en relación electricidad y calor, manejo de nuevas tecnologías en energía solar
Fortalezas	Evaporación en menor tiempo, uso de energía solar.	Mantener	Uso de energía solar
Oportunidades	Mayor cosecha de salmuera, aumento de producción	Explotar	Aumentar oferta, optimizar recursos, manejo medio ambiental

5.2. Conclusiones

- En los últimos años, el uso del litio ha crecido considerablemente, producto de las diversas aplicaciones de este mineral y sobre todo por el aumento en la demanda de baterías en electrónica portátil y por su practicidad tecnológica. También es posible evidenciarlo, gracias a las fuertes inversiones y exploraciones en el sector. Chile junto con Australia son los países productores de este mineral más importante a nivel mundial. El 85% de las reservas de Litios están en forma de salmueras y estas se encuentran en América del Sur. En el caso de Chile, el Salar de Atacama está en torno a los 8,3 millones de toneladas de litio, que representa el 22% a escala global. Dado lo anterior, Chile posee un gran potencial de crecimiento en las empresas que extraen este mineral y por tanto, se debe buscar la mejor forma de incrementar la producción al menor costo.
- La prueba de concepto permitió analizar distintas variables que inciden en el proceso de evaporación natural de la salmuera para la obtención de Carbonato de Litio equivalente (LCE), llegando a la conclusión que solo la temperatura es el factor preponderante al momento de la evaporación.
- El diseño de la malla eléctrica debe ser tal que no signifique agregar un cuello de botella al ciclo de evaporación/concentración.
- Al aplicar una malla eléctrica que permita aumentar en un grado la temperatura en los meses más fríos del Salar de Atacama, se obtiene en promedio un 2% de aumento en la cosecha lo que permitiría un aumento de 282 toneladas de carbonato de litio adicionales de producción anual, lo que se traduce en un valor presente de MM US\$ 3.37 para el proyecto aplicado a escala industrial.

- Una restricción a considerar es conocer si la planta está en condiciones de procesar el volumen adicional de salmuera.
- El proceso de evaporación/concentración de sales actual es un proceso natural. La adición de mayor energía al proceso podría impactar la secuencia de precipitación de las diferentes sales.

5.3. Recomendaciones o sugerencias

- Dado que este trabajo es una prueba de concepto, queda por resolver algunos antecedentes, tal como, en el diagrama de fase y tener un mayor antecedente sobre la relación temperatura y cambio de estado de la materia.
- Se recomienda realizar pruebas a escala de laboratorio para evaluar la incidencia del aumento de temperatura y evaluar en cual poza de evaporación sería más factible aplicar el aumento de temperatura restringido al período del año especificado en este trabajo.

5.5. Referencias

- 1) Informe: HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA SALAR DE ATACAMA, auto: CPH CONSULTORES LIMITADA
- 2) Ampliación Faena Salar del Carmen <http://seia.sea.gob.cl/>
- 3) Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama
http://documentos.dga.cl/EVAPO5550_Resumen_Ejecutivo.pdf
- 4) Como se obtiene el Litio, Agosto 2017, <http://www.mch.cl/reportajes/se-obtienen-los-productos-emblema-sqm/>
- 5) Estadísticas, <https://si3.bcentral.cl/estadisticas>
- 6) Proyecciones y estadísticas, febrero 2018, <http://www.mch.cl/reportajes/litio-chile-mundo-proyecciones-hacia-2025/>
- 7) <http://biblioteca.sernageomin.cl/opac/datafiles/14827.pdf>
- 8) https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-73562018000300471
- 9) <https://es.weatherspark.com/>
- 10) <https://es.statista.com/estadisticas/600308/paises-lideres-en-la-produccion-de-litio-a-nivel-mundial/>