



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



**ESTUDIO COMPARATIVO DE YACIMIENTOS DE LITIO DE CHILE, BOLIVIA,
ARGENTINA Y PERÚ**

Trabajo de titulación Presentado en
conformidad a los requisitos para el título de
ingeniero en minas.

Profesor guía: Carlos Espinoza.

Autor

Jose Manuel Marti Moscoso

Santiago- Chile.

2019.

AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo de título lo dedico a mi familia y a mi hija quienes creen día a día en mis conocimientos. Todo mi esfuerzo está dedicado a cada uno de ellos.

A mi profesor guía Carlos Espinoza que me orientó cada minuto en la realización de mi proyecto de título y me ayudó a explicar cada paso con la mayor disposición. Quien me guió pasó a paso para el desarrollo y objetivo de este informe.

Contenido

RESÚMEN.	5
ABSTRACT.....	7
INTRODUCCIÒN.....	9
CAPÍTULO 1.- Antecedentes del estudio.	10
1.3.- Objetivos del estudio.	10
1.3.1.- Objetivo específico:.....	10
1.4.- Justificación del estudio.	10
1.5.- Importancia del estudio.	11
1.6.- Alcance del estudio.	11
CAPÍTULO 2.- Marco Teórico.....	12
2.1.- El Litio.	12
2.2.- Recursos y Reservas del litio.	13
2.3.- Parámetros para una estimación de recursos y reservas de salmueras de litio.....	14
2.3.1.- Tipos de salar	15
2.3.2.- Volumen de la salmuera	16
2.3.3.- Morfología del Salar.....	17
2.3.4.- Hidrología de salmuera y balance hídrico.....	18
2.3.5.- Porosidad, permeabilidad, conductividad hidráulica, transmisividad, anisotropía y resistencia	18
2.3.6.- Química de la salmuera.....	21
2.3.7.- Propiedades vecinas.....	22
2.3.8.- Efectos temporales.	22
CAPÍTULO 3.- Descripción de los yacimientos de litio en Chile, Argentina, Bolivia y Perú.	22
3.1.- Yacimientos de litio en Chile	23
3.1.1.- Salar de Atacama.	24
3.1.2.- Salar de Maricunga	25
3.2.- Yacimientos de Litio en Argentina	26
3.2.1.- Salar Hombre Muerto	26
3.2.2.-Salar de Olaroz.	27

3.3.-Yacimientos de litio en Bolivia	28
3.3.1.- Salar de Uyuni.	28
3.4.- Yacimiento de litio en Perú.....	29
CAPÍTULO 4.- Descripción del proceso de obtención y concentración de litio.....	30
4.1.- Obtención:.....	30
4.2. Concentración:	31
CAPÍTULO 5.- Variables críticas del proceso de concentración de las salmueras.....	33
5.1.-Superficie del yacimiento.....	33
5.2.-Reserva de litio.....	33
5.3.-Concentración de litio.....	33
5.4.-Tasa de evaporación	34
5.5.-Relación potasio/litio.....	34
5.6.-Relación magnesio/litio.	34
CAPÍTULO 6.- Ranking de los yacimientos según variables críticas.	35
6.1.- Superficie (km ²)......	36
6.2.- Reserva de litio (toneladas).	36
6.3.- Concentración de litio (ppm).	37
6.4.- Tasa de evaporación (mm/año).	37
6.5.- Razón K/Li.....	37
6.6.- Razón Mg/Li.	37
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	39
Conclusiones Comerciales.....	39
Conclusiones Técnicas.....	40
Recomendaciones.	42
GLOSARIO.....	43
BIBLIOGRAFIA.....	45
ANEXO.....	46

Índice de tablas.

Tabla 6.1.yacimientos a estudiar y sus variables crítica.....	35
Tabla 6.2.Ranking del puntaje obtenido por yacimientos.	38

Índice de figuras.

Figura 2.1. Fuentes de litio.....	12
Figura 2.2. Reservas de litio.....	14
Figura 2.3. Recursos de litio.....	14
Figura 3.1 Principales prospectos y yacimientos de litio en Sudamérica.....	23
Figura 3.2. Salar de Atacama y Empresas mineras.....	25
Figura 3.3.Salar de Maricunga y distribución de Lithium power.....	26
Figura 4.1.Proceso de extracción de salmuera de litio.....	32

RESÚMEN.

El agotamiento progresivo de los combustibles fósiles, la evidencia de la contaminación que generan y el consecuente calentamiento global, han llevado a la investigación de energías más limpias y que tengan una marca ambiental menos negativa. La electromovilidad ha sido una respuesta de la industria que requiere de baterías de larga vida basada en productos generados a partir del litio. Lo anterior ha aumentado la demanda por estos productos, lo que ha aumentado los precios de los productos del litio, generando una oleada de proyectos e interés por ingresar en el negocio del litio. El cono sur de Sudamérica contiene una de las mayores reservas de litio conocidas. El presente trabajo describe estos yacimientos y las variables que son consideradas críticas para estimar la importancia técnico – económica de los yacimientos de origen endorreicos que extraen salmueras de litio desde acuíferos ubicados en salares andinos.

El presente trabajo presenta los principales yacimientos de litio en Chile, Perú, Argentina y Bolivia. Se exponen las variables críticas a estudiar, las cuales son las superficies de los yacimientos, reserva de litio, concentración de litio, tasa de evaporación, relación magnesio/litio y la relación potasio/litio. Se realiza un ranking de estos yacimientos, basado en variables técnicas y morfológicas, para determinar la importancia relativa técnico – económica y así determinar su potencial. El resultado del estudio entregó el siguiente ranking:

País.	Ubicación.	Posición.
Chile	Salar De Atacama.	1
Bolivia	Salar de Uyuni.	2
Argentina	Hombre Muerto.	3
Argentina	Salar de Olaroz.	4
Chile	Maricunga.	5

Se concluye que los yacimientos ubicados en Chile y Bolivia son los de mayor potencial por presentar los valores de variables críticas más favorables para el procesamiento de las salmueras de litio.

El análisis de la información disponible permite concluir, además, que no hay un estándar aprobado internacionalmente para la declaración de recursos y reservas de litio extraído a partir de salmueras, por lo que las reservas declaradas deben ser revisadas con la debida cautela.

ABSTRACT.

The progressive depletion of fossil fuels, the evidence of the pollution they generate and the consequent global warming, have led to the investigation of cleaner energy and have a less negative environmental mark. Electromobility has been an industry response that requires long-life batteries based on products generated from lithium. This has increased the demand for these products, which has increased the prices of lithium products, generating a wave of projects and interest in entering the lithium business. The southern cone of South America contains one of the largest known lithium reserves. The present work describes these deposits and the variables that are considered critical to estimate the technical - economic importance of the reservoirs of endorheic origin that extract lithium brines from aquifers located in the Andean salt pans.

This paper presents the main lithium deposits in Chile, Peru, Argentina and Bolivia. The critical variables to study are exposed, which are the surfaces of the deposits, lithium reserve, lithium concentration, evaporation rate, magnesium / lithium ratio and the potassium / lithium ratio. A ranking of these deposits is made to determine the technical-economic relative importance and thus determine their potential the result of the study delivered the following ranking:

Country.	Location.	Position.
Chile	Salar De Atacama.	1
Bolivia	Salar de Uyuni.	2
Argentina	Hombre muerto.	3
Argentina	Salar de Olaroz.	4
Chile	Maricunga.	5

It is concluded that the deposits located in Chile and Bolivia are the ones with the greatest potential because they present the values of the most favorable critical variables for the processing of the lithium brines.

The analysis of the available information allows us to conclude, moreover, that there is no internationally approved standard for the declaration of resources and reserves of lithium extracted from brines, so the declared reserves must be reviewed with due caution.

INTRODUCCIÒN.

Actualmente existe una demanda creciente por litio a nivel mundial para la fabricación de baterías de larga vida que permitan la implementación de la electromovilidad como alternativa energética al agotamiento natural de los combustibles fósiles. La mayor demanda por productos basados en el litio generada por la electro-movilidad hace necesario un aumento de producción de este mineral. Actualmente la mayor fuente de recursos de litio se ubica en Sudamérica y específicamente en Chile, Argentina y Bolivia en el denominado “triángulo del oro blanco”. En el último tiempo se agregó Perú con el descubrimiento de recursos de litio.

Por lo tanto, es importante conocer las características de los yacimientos y las variables que podrían determinar la factibilidad de extracción desde los salares, el proceso y finalmente la rentabilidad de cada yacimiento para así estimar ritmos y costos de producción.

El presente trabajo tiene como objetivo describir estos yacimientos y evaluar los principales parámetros técnicos que determinan su potencial como fuente de recursos mediante un ranking de ellos.

CAPÍTULO 1.- Antecedentes del estudio.

El presente trabajo busca analizar los yacimientos de litio ubicados en Sudamérica. Estos yacimientos de litio presentan variables críticas de producción las cuales deben ser identificadas, evaluadas y analizadas. Esto podría permitir estimar el potencial del yacimiento y evaluar la importancia relativa de un yacimiento con respecto a otro estableciendo un ranking entre ellos.

1.3.- Objetivos del estudio.

Describir los principales yacimientos de litio ubicados en Chile, Argentina y Bolivia y los parámetros que inciden en la producción de la salmuera de litio y realizar un ranking del potencial de los yacimientos.

1.3.1.- Objetivo específico:

- Describir de los yacimientos de litio en Chile, Perú, Argentina y Bolivia.
- Describir el proceso de concentración de litio.
- Identificar y describir las variables críticas del proceso de concentración de las salmueras.
- Analizar los yacimientos en función de las variables críticas.
- Establecer un ranking de los yacimientos.
- Estimar reservas y recursos de salmuera de litio.

1.4.- Justificación del estudio.

Este estudio se enfoca en realizar un aporte al conocimiento de la industria extractiva del litio, donde la información que se aporta al estudio será sobre las variables críticas tales como la concentración litio/potasio y magnesio/litio; ubicación del yacimiento (variación térmica), concentración inicial del litio, la tasa de evaporación entre otras, con el fin de analizar y comparar los yacimientos.

Además, este estudio contara con una guía práctica para la estimación de recursos y reservas de salmuera de litio.

1.5.- Importancia del estudio.

La importancia de este estudio es generar una herramienta comparativa de los yacimientos de litio de origen salino, con los cuales se pueda comparar alguno de sus factores más relevante para estimar el potencial de producción y concentración.

Se busca, además, analizar los nuevos yacimientos y nuevas formas de obtención de este mineral analizando las diversas características de producción.

Finalmente se entregará una guía sobre la estimación de recursos y reserva de litio enfocando en los puntos más importantes para así ampliar el conocimiento sobre este mineral.

1.6.- Alcance del estudio.

El desarrollo continuo de nuevos proyectos limita este estudio y se restringe a los cuatro países a estudiar, Chile con el Salar de atacama. Bolivia con el salar de Uyuni, Argentina con el salar de Hombre Muerto, y Perú con un proyecto de exploración, en los cuales se indaga y recolecta información sobre las variables críticas ya mencionados.

Este estudio se afronta de forma que el lector podrá ir comparando valores técnicos entre países, desarrollando una pequeña conclusión en cada factor, además recomendando posibles mejoras en estos procesos con la final de aportar nuevas herramientas y posibles técnicas a emplear.

Este documento contempla información disponible mediante diversos autores hasta la fecha de septiembre del 2018.

CAPÍTULO 2.- Marco Teórico.

2.1.- El Litio.

El litio es el primer metal presente en la tabla periódica siendo de la familia de los metales alcalinos. Presenta un color desde el plateado hasta el blanco y sus características lo convierten en el metal más liviano y con menor densidad, posee un bajo punto de fusión y elevada reactividad electroquímica. Sus propiedades físicas lo caracterizan por ser un metal con una alta conductividad eléctrica, alta capacidad térmica, baja viscosidad y un coeficiente bajo de expansión térmica.

Según el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), las principales fuentes de litio son los salares en cuencas cerradas (58%), rocas pegmatitas y granitos (26%), arcillas enriquecidas en litio (7%), salmueras de yacimientos petroleros (3%), Salmueras geotermales (3%) y zeolitas enriquecidas con litio (3%).



Figura 2.1. Fuentes de litio.

Fuente: Elaboración Propia en base a datos de la USGS, 2018.

Este mineral no se encuentra de forma natural debido a su elevada reactividad, por lo contrario existen más de 100 minerales que contienen litio, pero solo algunos son económicamente factibles para extraer, dentro de estos se encuentran los siguientes: espudomeno, lepidolita, petalita, hectorita, jadarita, ambligonita y eucryptita, siendo el espudomeno el mineral más abundante y que se encuentra en cristales de granito y pegmatitas generalmente mezcladas con cuarzo (British Geological Survey, 2016).

Las pegmatitas son un tipo de roca ígnea de composición granítica caracterizada por granos gruesos o grandes cristales interconectados. Algunas pegmatitas se denominan LCT las cuales contienen significativamente minerales de litio, cesio y tántalo.

En la actualidad el litio se extrae mediante dos fuentes principales: mineral de roca (pegmatita) y salmueras.

La extracción mediante salmueras se produce a partir de depósitos continentales, los cuales ocurren en cuencas endorreicas donde fluyen aguas superficiales y subterráneas que están enriquecidas en litio. Estas cuencas generalmente contienen lagos de sal o salinas y el litio normalmente se encuentra con otros minerales como potasio o boro” (British Geological Survey, 2016).

2.2.- Recursos y Reservas del litio.

Según el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) estima la reserva en 14.469.000 toneladas y los recursos alcanzan a las 47.000.000 toneladas, pero estos datos incluyen la existencia en el océano, donde la baja concentración (0,18 ppm) no permiten que sea económicamente factible la extracción.

Las reservas de litio se encuentran distribuidas con 7.500.000 toneladas en Chile, 3.200.000 toneladas en China, 2.000.000 toneladas en Argentina, 1.600.000 en

Australia y 169.000 toneladas en Otros países. Los recursos por otra parte se distribuyen con 9.000.000 de toneladas para Argentina y Bolivia, 7.500.000 toneladas para Chile, 7.000.000 toneladas en China, 2.000.000 toneladas para Australia y Canadá, y 3.600.000 en otros países.

Existen países con abundantes recursos pero su explotación no es factible debido a diversas variables críticas como los altos niveles de impurezas como el magnesio y el boro.

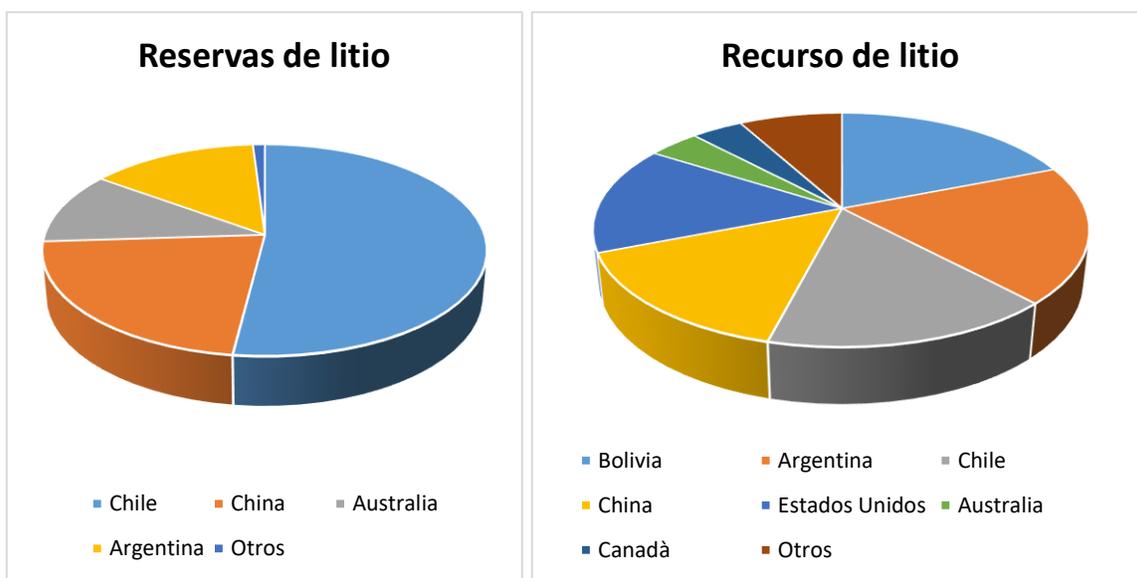


Figura 2.2 y 2.3. Reservas y recursos de litio.

Fuente: Elaboración propia con información de USGS, 2018.

2.3.- Parámetros para una estimación de recursos y reservas de salmueras de litio.

Dada la naturaleza de los yacimientos de litio de origen endorreico, la determinación de recursos y reservas no es similar a aquella de los yacimientos metálicos, por lo tanto hasta 2011 no existía estándar internacional para declarar recursos y reservas

de litio provenientes de salmueras. Actualmente uno de los estándares aceptados es aquel emitido por la Canadian Securities Administration (CSA) a través del documento NI-43-101 para la declaración de recursos y reservas y que es la considerada en el presente estudio. De este instrumento se pueden inferir los siguientes parámetros para una correcta declaración de recursos y reservas de salmueras de litio.

2.3.1.- Tipos de salar

Existen generalmente dos tipos de salares; salares de halita maduros y salares clásticos inmaduros.

Los salares maduros presentan una secuencia de halita pura de gran potencia en ocasiones con zonas de yeso.

Los salares inmaduros presentan una secuencia de gran potencia de material clástico con menores cantidades de halita y yeso.

Estas secuencias evaporitas o clásticas tienden a depositarse en una secuencia típica concéntrica similar a una cáscara, con grava en el exterior, arena, limo y arcilla, seguido de carbonato, yeso y finalmente la halita en el centro. Esta secuencia podría estar modificada, interrumpida o repetida dependiendo de la historia tectónica o climática de la cuenca.

El relleno de la cuenca (salar) está necesariamente compuesto por uno o más acuíferos los cuales podrían estar separados por barreras impermeables del tipo de un acuitardo o acuícludo. La salmuera está alojada en los acuíferos, los cuales pueden estar no confinados, semi-confinados o confinados. Potencialmente la salmuera se ubicará en lo que se denomina el núcleo del salar.

Las condiciones en el límite entre el relleno del salar y las capas yacentes y que rodean el núcleo que contiene la salmuera son de gran importancia para comprender las condiciones hidrológicas existentes y como el volumen de la salmuera reaccionará durante la extracción.

2.3.2.- Volumen de la salmuera

La salmuera de interés queda definida por su mayor densidad, la que es mayor (generalmente mayor a $1,1 \text{ g/cm}^3$) que cualquier fluido que se encuentran a su alrededor, y generalmente existe una variación de densidad rápida entre el agua casi fresca y la salmuera en el límite de contacto y en profundidad. Es esencial que la extensión del cuerpo de la salmuera quede definido por este gradiente de densidad y su variación con la profundidad alrededor de los márgenes del salar. El cuerpo de la salmuera generalmente puede considerarse como agua fósil con respecto a las condiciones hidrológicas actuales, ya que la rotación entre el volumen de la salmuera y el agua "fresca" circundante (que entró más tarde) es controlada y limitada por las pérdidas por evaporación en la superficie del núcleo, las que son ordenes de magnitud menores que las pérdidas por evaporación del agua marginal fresca. La extensión del cuerpo de la salmuera se puede determinar mediante métodos geofísicos y de perforación con muestreos apropiados.

Dentro de la salmuera, se puede esperar variaciones químicas de los fluidos, especialmente si la salmuera proviene de más de una fuente. La obtención de muestras no contaminadas por fluidos de la perforación y/o fluidos de salmueras ubicadas arriba o abajo del punto de muestreo, puede ser particularmente difícil, y el muestreo repetido siempre se debe usar para evaluar la procedencia de al menos una selección de la muestra. Se debe considerar técnicas adicionales de muestreos, como la instalación y extracción de double packer, la extracción del fluido de los poros del núcleo, el muestreo de bajo flujo, la instalación de piezómetro y la purga.

El uso de múltiples técnicas, obviamente aumenta la confiabilidad de la estimación de los recursos o reservas.

La estimación de los recursos y reservas requiere la distribución de la química del acuífero en la salmuera, el cual es dependiendo de la forma del acuífero como de los límites de este, donde afectan las posibles interacciones entre la salmuera y las aguas subterráneas circundantes.

Los límites de los cuerpos de la salmuera serán controlados por la transición al agua dulce. Este límite se puede determinar aproximadamente mediante un estudio de magneto-telúrico, electromagnético o un audio con timedomain. Los estudios sísmicos reflexivos también pueden ser una herramienta para determinar la presencia de capas dentro del cuerpo de la salmuera y la profundidad de salar, especialmente en el caso de los salares clásticos. Los estudios de micro gravedad proporcionan datos útiles sobre la dimensión del salar. Los estudios de resistividad pueden ser útiles para definir zonas de acuíferos, aunque la técnica es más aplicable a salares clásticos con horizonte intermedios de agua dulce (donde se pueden observar diferentes conductividades) y salmueras de halita (donde la alta conductividad abruma la respuesta).

2.3.3.- Morfología del Salar

Si se consideran iguales todos los demás factores, los salares más grandes y circulares son más capaces de soportar la extracción a largo plazo que los salares más pequeños o alargados. La relación entre el volumen de extracción y el volumen de almacenamiento es un determinante clave de la vida de producción, ya que, en general, solo se puede recuperar aproximadamente un tercio del volumen total de salmuera, quedando el resto dentro de los poros de la matriz del salar o no extraídos por el bombeo.

La topografía basal del salar puede afectar la hidrología, el balance hídrico, la porosidad y la permeabilidad del depósito de salmuera. Se requiere la determinación del impacto que podrían tener las fallas geológicas y otras características estructurales y topográficas en el movimiento y calidad de la salmuera dentro del salar.

2.3.4.- Hidrología de salmuera y balance hídrico.

Una comprensión de la hidrología de la salmuera y del balance hídrico del acuífero y de la salmuera en sí es necesaria para la evaluación adecuada de los recursos y las reservas de la salmuera. La entrada de la cuenca de captación, la evaporación del agua dulce cargada con sal diluida y las corrientes de convección impulsadas por la densidad (potencial) dentro del cuerpo de salmuera afectan la composición química y la disposición de la salmuera a lo largo del tiempo.

2.3.5.- Porosidad, permeabilidad, conductividad hidráulica, transmisividad, anisotropía y resistencia

Las salmueras del salar, están contenidas dentro de una matriz en la que la porosidad, la permeabilidad, la composición de la salmuera y las características hidroestratigráficas como la conductividad, la transmisividad, la anisotropía y la resistencia pueden variar con el paso del tiempo. Estos parámetros están influenciados por el tipo de salar y la naturaleza de la matriz. Es esencial que estas relaciones se comprendan y midan con un grado suficiente de detalle para permitir la correcta estimación de los recursos y reservas de salmuera.

Las mediciones de la porosidad que se deben realizar son:

- Porosidad total (Pt): Volumen total de poros dentro de volumen unitario de material del acuífero.

- Porosidad efectiva (P_e): Volumen de poros interconectados drenable de material del acuífero; $P_e < P_t$.
- Rendimiento específico (S_y): Rendimiento del fluido drenable obtenido en condiciones de flujo gravitacional a partir del volumen de poros interconectado; $P_e = S_y + S_r$.
- Retención específica (S_r): líquido retenido en el material del acuífero; $S_y < 0 > S_r$
- Permeabilidad (conductividad hidráulica).
- Transmisividad.
- Almacenabilidad.
- Difusividad.

El parámetro Rendimiento específico debe utilizarse como la medida del recurso de salmuera y de la reserva de salmuera. Al estimar el rendimiento específico, se debe ser consciente de la relevancia de lo siguiente:

La permeabilidad y la conductividad hidráulica son factores relacionados que proporcionan una medida cuantitativa de la facilidad de movimiento de un fluido a través de una matriz cuando se somete a un gradiente hidráulico. La permeabilidad se define cualitativamente como la facilidad con que los líquidos o gases penetran o pasan a través de una matriz. La permeabilidad intrínseca (K_i) es una propiedad cuantitativa de un material poroso y está controlada por la geometría de poros del medio poroso.

La conductividad hidráulica es una medida de un material para transmitir un fluido cuando se lo somete a un gradiente hidráulico.

La transmisividad se define como la conductividad hidráulica multiplicada por el espesor del acuífero y es una medida de la disponibilidad de fluido dentro de un intervalo de tiempo y espesor determinado. Un acuífero puede consistir en múltiples capas con diferentes transmisividad en las dimensiones horizontal y vertical. Estas

diferencias deben ser consideradas cuando se desarrollan estimaciones de recursos y reservas.

La conductividad y la transmisividad de un acuífero se pueden determinar a partir de pruebas de bombeo. Los sedimentos clásticos de grano fino, como la arcilla, tienen baja permeabilidad y baja transmisividad. Lo contrario es cierto para los clastos de grano grueso. Los salares clásticos pueden tener zonas de alta y baja permeabilidad y transmisividad que pueden cambiar rápidamente con los cambios en la litología. En consecuencia, se requiere un muestreo lo suficientemente espaciado para establecer la relación entre la litología, el rendimiento específico, la permeabilidad y la transmisividad. El uso de empacadores u otros dispositivos para aislar horizontes específicos generalmente se requiere para un muestreo efectivo. En los salares de halita maduros, los valores de permeabilidad y transmisividad pueden ser muy altos en los horizontes superiores debido a la presencia de grietas y fisuras, pero generalmente disminuyen significativamente con la profundidad debido a la compactación y el crecimiento del cristal.

La resistencia juega un papel importante en los acuíferos, donde se produce una secuencia de capas con una permeabilidad horizontal variable, de modo que el flujo horizontal se encuentra principalmente en las capas con una alta permeabilidad horizontal, mientras que las capas con una baja permeabilidad horizontal transmiten el agua principalmente en sentido vertical.

Un acuífero se denomina semi-confinado cuando una capa saturada con una conductividad hidráulica horizontal relativamente pequeña (la capa semiconfinadora o aquitard) cubre una capa con una conductividad hidráulica horizontal relativamente alta, de modo que el flujo de agua subterránea en la primera capa es principalmente vertical y en la segunda capa principalmente horizontal.

La resistencia de una capa superior semi-confinada de un acuífero se puede determinar a partir de pruebas de bombeo. Al calcular el flujo de los desagües o a

un campo de pozos en un acuífero con el objetivo de controlar el nivel freático, se debe tener en cuenta la anisotropía; de lo contrario, el resultado puede ser erróneo.

La conductividad hidráulica (K) es una de las propiedades más complejas e importantes de los acuíferos ya que los valores que se encuentran en la naturaleza:

- Varían en muchos órdenes de magnitud (la distribución a menudo se considera log normal),
- Varían una gran cantidad a través del espacio (a veces se considera aleatoriamente distribuida espacialmente o de naturaleza estocástica),
- Son direccionales (en general, K es un tensor de segundo rango simétrico; por ejemplo, los valores verticales de K pueden ser varios órdenes de magnitud más pequeños que los valores horizontales de K),
- Son dependientes de la escala (la prueba en un m³ de acuífero generalmente producirá resultados diferentes a los de una prueba similar en una muestra de un cm³ del mismo acuífero)
- Debe determinarse indirectamente a través de pruebas de bombeo de campo, pruebas de flujo de columna de laboratorio o simulación por computadora inversa, (a veces también a partir de análisis de tamaño de grano), y
- son muy dependientes (de forma no lineal) del contenido de agua, lo que dificulta la resolución de la ecuación de flujo no saturado. De hecho, el K variable saturado para un solo material varía en un rango más amplio que los valores K saturados para todos los tipos de materiales.

2.3.6.- Química de la salmuera.

La química de la salmuera tiene un impacto directo y significativo en el potencial económico de un depósito de salmuera y, por lo tanto, en la determinación de los recursos de salmuera y las reservas de salmuera. Es esencial que los profesionales

a cargo comprendan la química de la salmuera está en términos de concentración y distribución tanto de forma lateral y vertical, además se debe comprender que los cambios de la salmuera a lo largo del tiempo se deben a la entrada de dos flujos al sistema.

2.3.7.- Propiedades vecinas.

Los salares pueden ser de un tamaño considerable y múltiples operadores pueden estar presentes en cualquier salar de forma individual. Los derechos de propiedad en depósitos de salmuera están definidos por planos nominalmente verticales entre las coordenadas de superficie. Sin embargo, debido a la naturaleza dinámica de las salmueras, las operaciones de extracción de salmuera pueden tener efectos más allá de los límites de propiedad correspondientes.

2.3.8.- Efectos temporales.

La composición de las salmueras está sujeta a efectos temporales debido a los cambios en los flujos de fluidos que resultan de los efectos externos (cuenca de captación) y los efectos internos (inducidos por extracción). Como se señaló anteriormente, la composición de la salmuera cambiará en respuesta a los cambios en el balance hídrico de la cuenca de captación y la hidrología de la cuenca. Estos cambios generalmente son lentos si el cuerpo de salmuera no se coloca bajo presiones dinámicas como las asociadas con el bombeo.

CAPÍTULO 3.- Descripción de los yacimientos de litio en Chile, Argentina, Bolivia y Perú.

La figura siguiente presenta las principales fuentes de litio en Chile, Argentina y Bolivia. En el presente capítulo se describen los más importantes.

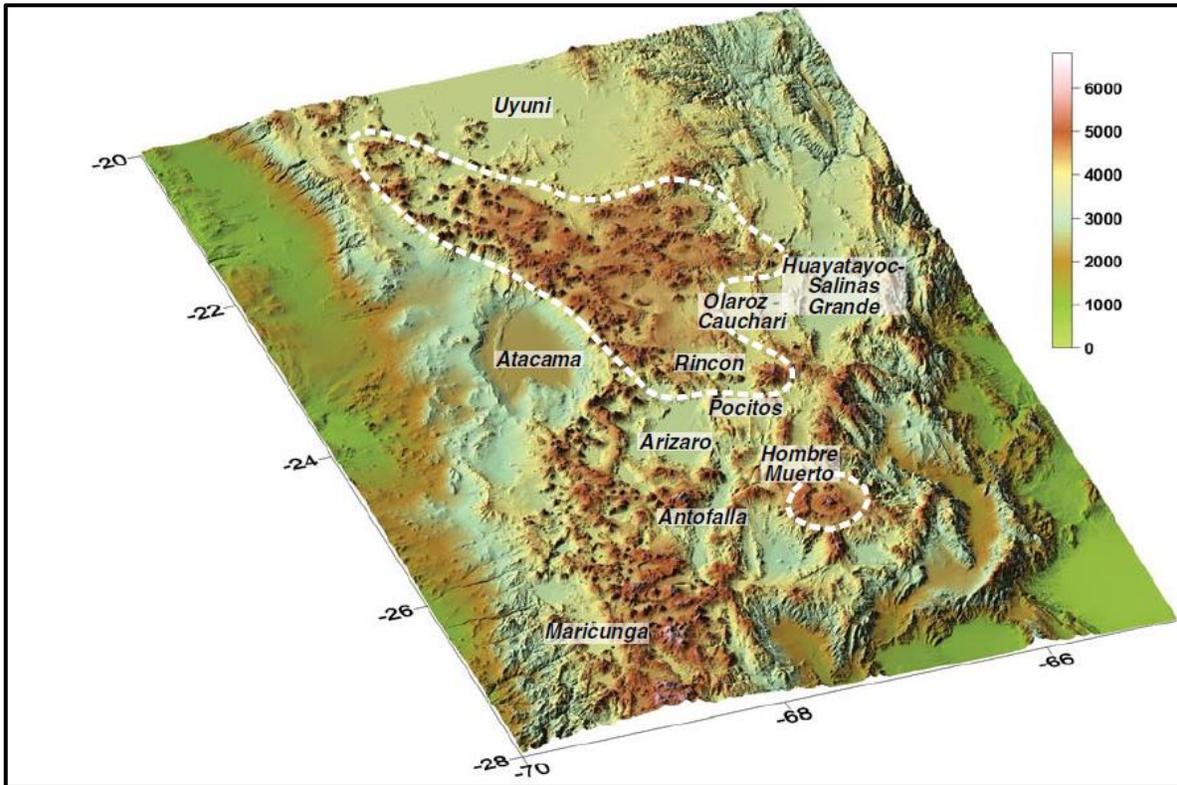


Figura 3.1 Principales prospectos y yacimientos de litio en Sudamérica.

Fuente: Elaboración con información de obtenida por Google Maps, 2018.

3.1.- Yacimientos de litio en Chile

3.1.1.- Salar de Atacama.

Ubicado en la Región de Antofagasta, a 2305 msnm, con una superficie de 3000 Km². siendo el yacimiento más importante de litio a nivel mundial es trabajado (explotado) a concesión por dos grandes Empresas; Sociedad Química y Minera (SQM) y Albemarle, bajo la tutela de la Corporación de fomento a la producción (Corfo), que regula la cuota de extracción de estas empresas, supervisa y controla la venta y exportación de este mineral. Está salmuera natural cuenta con una concentración de litio de 0,2% Li y que por un proceso de concentración mediante evaporación solar alcanza 6% de litio en su concentración. Durante este proceso de evaporación/concentración precipitan distintos tipos de sales como subproductos.

Albemarle y SQM procesan esta salmuera natural en las diversas Plantas en el Salar de Atacama mediante pozas de evaporación, siendo la salmuera concentrada transportada mediante camiones aljibes a la planta química La negra ubicada en a 27 Km al sureste de Antofagasta en el caso de Albemarle y SQM a la planta química el Carmen ubicada en Antofagasta. En estas plantas se realiza el proceso de purificación y conversión química que da origen a los productos de carbonato de litio, cloruro de litio e hidróxido de litio en grado técnico y grado batería.

Albemarle cuenta con una cuota autorizada de extracción de 442 litros por segundo de salmuera desde el Salar de Atacama, en diversos pozos, además cuenta con una cuota de producción entre 120.0000 a 140.000 toneladas anuales de carbonato de litio.

SQM, cuenta con su cuota de producción de 48.000 toneladas por año de carbonato de litio, siendo la cuota de extracción para el caso de SQM de 349.553 toneladas de litio metálico hasta el año 2030.

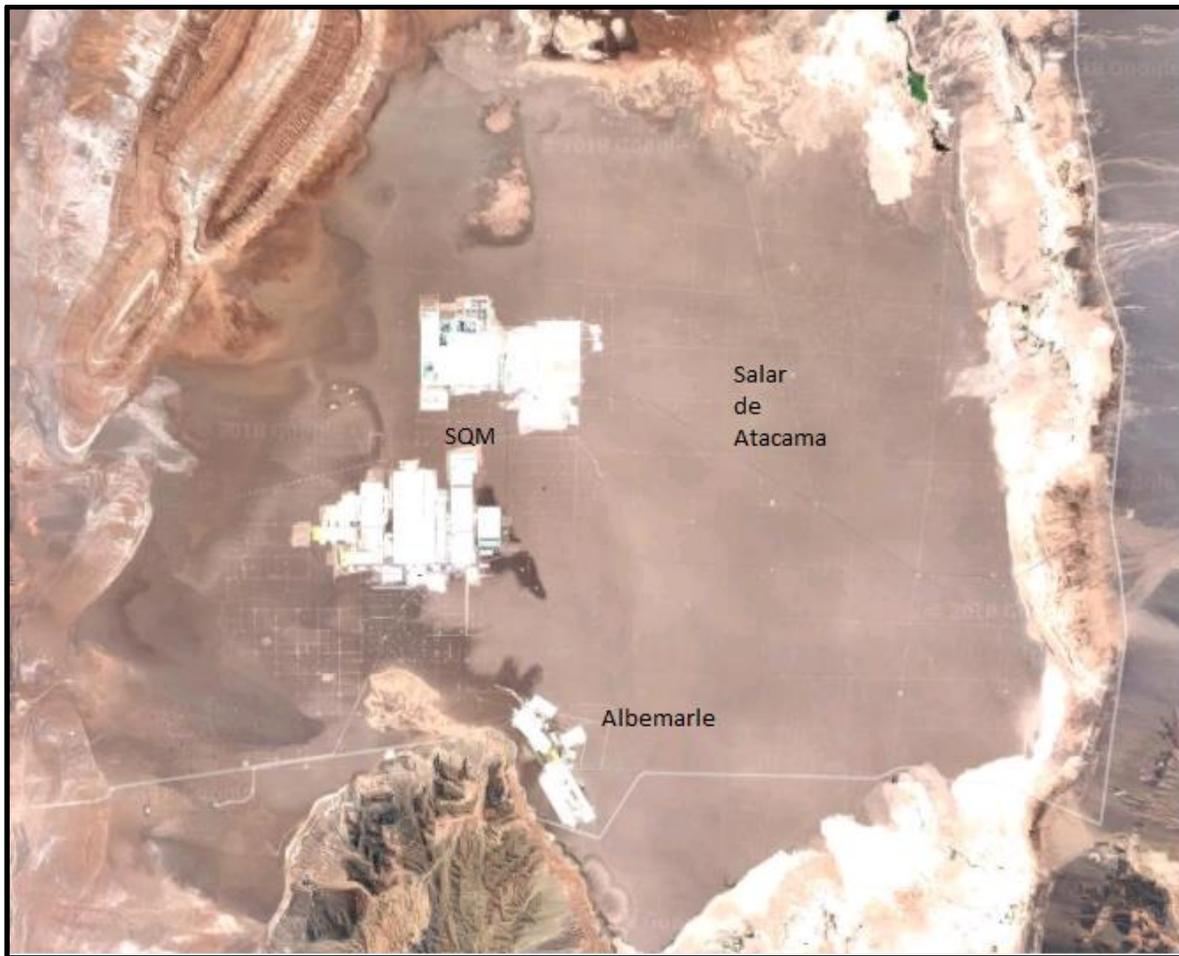


Figura 3.2. Salar de Atacama y Ubicación de Empresas mineras.

Fuente: Elaboración propia con información de obtenida por Google Maps, 2018.

3.1.2.- Salar de Maricunga

Ubicado en la región de Atacama, a 3756 msnm, con una superficie de 80 km², existe un proyecto de explotación por la empresa Lithium Power Internacional: la exploración ha identificado 2,15 millones de toneladas de carbonato de litio y 5,7 millones de toneladas de cloruro de potasio con una concentración de 1,05 gr/L El proyecto considera la concentración de la salmuera mediante pozas de evaporación

solar, en una planta piloto en el salar de Maricunga durante 12 meses y posterior traslado hasta el laboratorio GEA en Duisburg, Alemania para su purificación y precipitación del carbonato de litio donde la pureza del producto es superior al 99,4 %El financiamiento del proyecto está previsto en 2019 y el inicio de la construcción en 2020.

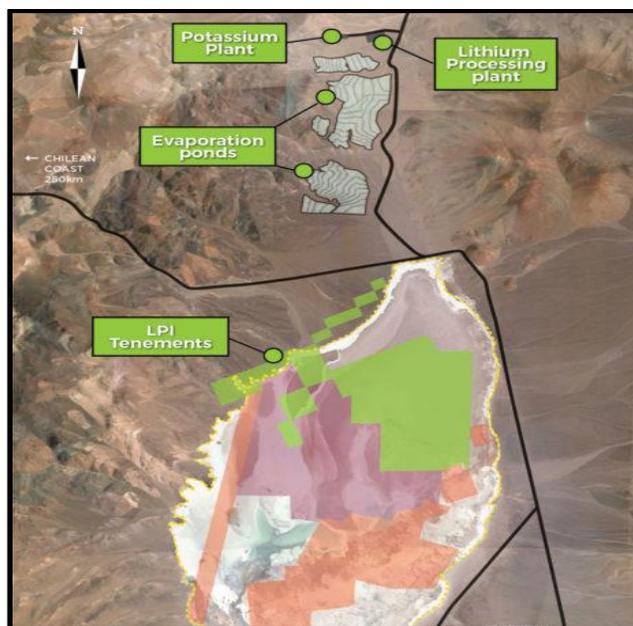


Figura 3.3.Salar de Maricunga y distribución de Lithium Power.

Fuente: Lithium power international LTD, 2018.

3.2.- Yacimientos de Litio en Argentina

3.2.1.- Salar Hombre Muerto

Ubicada al sur de la puna de Atacama y al occidente de la provincia de Catamarca en el límite con la provincia de Salta se encuentra en el departamento Antofagasta de la sierra a 4000 m.s.n.m. con una superficie de 588 Km², este yacimiento es trabajado por la empresa multinacional FMC Lithium. La explotación se realiza por

bombeo y la salmuera es tratada en una planta de absorción selectiva totalmente automatizada para extraer el litio, donde se retorna el resto de la solución al salar.

Luego de ser sometido a un procesamiento elemental para su conversión en carbonato de litio, una parte del mineral extraído de Salar del Hombre Muerto es exportada, en tanto que el resto es enviado a la planta salteña de General Güemes para la obtención de cloruro de litio. En ambos casos, la producción es embarcada en Pocitos (Salta) y transportada por ferrocarril hasta el puerto chileno de Antofagasta.

Se usa un método de procesamiento que re-inyecta toda la salmuera. Si bien este método reduce algunas pérdidas de agua y ayuda a re-nutrir el salar, también necesita mucha energía y consume agua dulce en un promedio de 78,4 l/s (Anlauf, 2015).

Tiene capacidad para producir anualmente unas 12.000 toneladas de carbonato de litio y unas 6.000 toneladas de cloruro de litio. Toda la producción se destina a la exportación. A esa tasa de extracción, su vida útil se calcula en 70 años. En los últimos años FMC planifica expandir su producción. En 2017 produjo 15.153 toneladas de carbonato de litio, y ha realizado un acuerdo con la provincia de Catamarca, para llevar adelante un proyecto de expansión de las operaciones, por lo cual llegaría a producir 19.000 toneladas de carbonato de litio; y posteriormente podrá duplicar esa capacidad, llegando a las 40.000.

3.2.2.-Salar de Olaroz.

Ubicado en el departamento Susques, al suroeste de la Provincia de Jujuy, se encuentra a 270 km de la ciudad de San Salvador de Jujuy, a unos 3.900 m.s.n.m. con una superficie 278 Km², el Proyecto Ithium Olaroz es trabajado por la empresa

Orocobre Limitad. Los recursos indicados y medidos se estiman de 1.752 millones de m³ de salmuera natural en 690 mg/L de litio, 5730 mg/L de potasio y 1050 mg/L de boro el cual corresponde a 6,4 toneladas métricas de carbonato de litio y 19,3 millones de toneladas de cloruro de potasio, Lo cual equivale a 1 tonelada de litio por 1.91 tonelada de potasio.

Según algunos modelamientos independientes se consideran una mejora de la salmuera llegando a 825 mg/L, esto indica que la producción proyectada anualmente aumentó el carbonato de litio. Siendo la relación entre Mg/ Li baja de aproximadamente 2,8 lo cual es un factor deseable para el procesamiento.

La salmuera se extrae a través de pozos de bombeo, donde esta salmuera es bombeada a diversas pozas de evaporación en donde se concentra mediante la evaporación. Tras este proceso es enviada a una planta de encalada donde precipita el magnesio, donde son distribuidas a pozos de evaporación libres de magnesio. La salmuera es circulada a la planta de carbonato de litio, en la cual mediante diversos procesos de concentración, micronizado y secado llega a un valor de 99,5% de carbonato de litio en grado de batería.

3.3.-Yacimientos de litio en Bolivia

3.3.1.- Salar de Uyuni.

Ubicado al suroeste de Bolivia, en la provincia de Daniel Campos, en el departamento de Potosí a unos 3.650 m.s.n.m. y una superficie de 10.582 Km², el cual es trabajado por la empresa GNRE y COMIBOL. Este salar cuenta con una relación de magnesio/ litio sobre 19 esto quiere decir que su procesamiento y división de estos mineral es más complejo, por lo cual mediante un proceso de “encalado” el cual consiste en incorporar hidróxido de calcio en la primera etapa, donde la salmuera es bombeada a los pozas de evaporación y el encolado ayuda a

la separación de estos minerales. Este proceso por cada porción de cal introducida a los pozos, genera alrededor de cuatro porciones equivalentes de lodo residual con grandes porcentajes de magnesio, el cual es un pasivo ambiental.

3.4.- Yacimiento de litio en Perú

Durante 2018 se declaró el descubrimiento de un importante yacimiento de litio en Perú asociado a mineralización de uranio. El proyecto exploratorio está bajo la responsabilidad de la empresa Falchani Lithium Project y está ubicado aproximadamente a 650 km al sureste de Lima y a unos 220 km por carretera de Juliaca y a 25 km de la ciudad de Macusani. El yacimiento descubierto es del tipo de mineral en roca por lo que su potencial explotación sería mediante minería tradicional.

Este depósito se encuentra asociado con litio y uranio, dentro de los cuales para Perú se encuentran en un proceso legislativo para poder extraer uranio ya que es considerado un mineral radiactivo.

Este yacimiento actualmente se encuentra en proceso de exploración por la empresa Macusani Yellowcake, junto con su filial Plateau Energy pero además se encuentra buscando socios para realizar una inversión de alrededor de US\$800 millones donde hallaron 2,5 millones de toneladas de litio de “alta Ley “de recursos equivalente, en este depósito subterráneo en el cual solo se ha perforado un 15% de la superficie, se han encontrado 124 millones de libras de uranio. La campaña de exploración y el estudio factibilidad se estima finalice a fines de 2019.

CAPÍTULO 4.- Descripción del proceso de obtención y concentración de litio.

4.1.- Obtención:

Actualmente existen 2 formas en las cuales se puede presentar el mineral de litio:

a) Salmuera de Litio.

Esta se generan a través del contacto de los diversos líquidos a través de mucho siglos formando el acuíferos con diversos minerales de interés, los cuales son extraídos mediante el proceso de bombeo y trasladados a pozos de potasio/litio, previamente pre acondicionados con geo membranas y geotextiles, los cuales tiene el fin de retener las salmueras bombeadas para la etapa de evaporación.

b) Mineral de litio.

Estos yacimientos se encuentra de forma sólida por lo cual se debe generar una minería tradicional para su extracción, esto quiere decir que se debe generar un

proceso de perforación, tronadura, carguío y traslado a las diversas plantas de concentración.

4.2. Concentración:

En el caso de la concentración de litio este se debe dividir en las dos formas ya mencionadas.

a) Salmuera de litio.

Las pozas de evaporación se encuentran ubicado cerca de la planta concentradora, los cuales, mediante la evaporación solar son concentrados, este proceso pasa por diversos pozas donde la salmuera va obteniendo una concentración que parte del 0,2% hasta un 6% Li, Este proceso dependiendo la ubicación geográfica y las diversas variables a estudiar puede demorar de 10 a 12 meses por lote.

Las salmueras no utilizadas en los procesos posteriores son reinyectada hacia los salares. En donde se extrae mayormente carbonato de litio y cloruro de potasio.

Tras el proceso de extracción se generan sales en forma de cristales las que son trasportadas hasta las plantas procesadoras, es aquí donde comienza el proceso de obtención del mineral de litio mediante los siguientes procesos:

1) Planta de carbonato de litio.

En este proceso se puede obtener 3 productos:

a) Carbonato de litio. (Li_2CO_3).

Compuesto químico que se presenta de forma de polvo blanco el cual es utilizado en la industria farmacéutica. Además, es uno de los minerales de litio que se comercializa en el mercado en distintos grados esto hace referencia a la pureza que presenta.

b) Carbonato de sodio (Na_2CO_3).

Este se presenta de forma de sal blanca y translúcida, y se utiliza en el área de jabones, vidrios y tintas.

c) Hidróxido de litio (LiOH).

Sólido cristalino de color blanco que es conducido hacia una segunda planta para obtener el mineral de litio.

2) Planta de Hidróxido de litio.

En esta planta se purifica el hidróxido de litio llegando a distintos porcentajes de pureza para su posterior venta hacia el mercado de los minerales de litio, produciendo óxido de sodio (Na_2O) el que se utiliza en la industria de la cerámica.

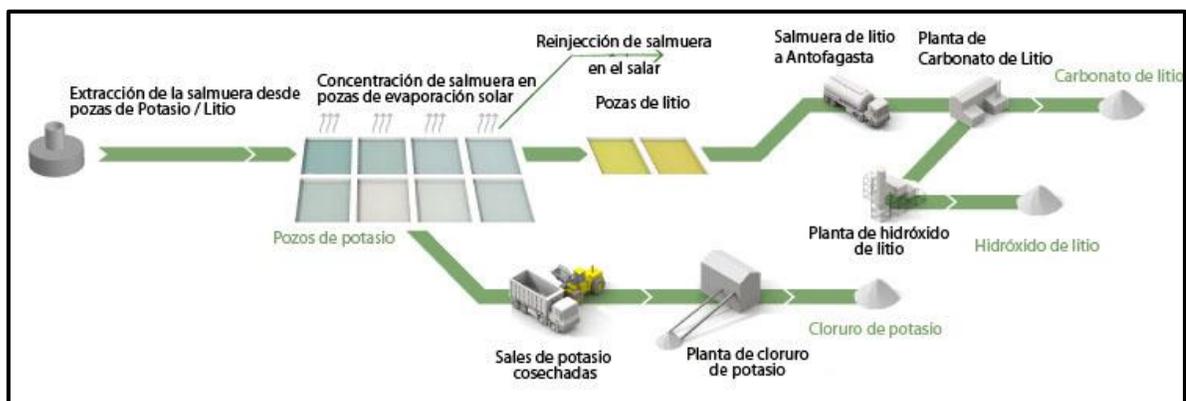


Figura 4.1. Proceso de extracción de salmuera de litio.

Fuente: Sociedad Química y Minera, 2018.

b) Mineral de litio.

El proceso de concentración de mineral de litio que se ha delineado para el proyecto Falchani, de la minera canadiense Plateau Energy y ubicado en Mucasani, Puno

(Perú) sería mediante lixiviación con ácido sulfúrico a temperatura de 90°C y un consumo estimado de 153 Kg de ácido por tonelada procesada y un costo estimado de proceso de U\$35/t procesada.

CAPÍTULO 5.- Variables críticas del proceso de concentración de las salmueras.

En este capítulo se identifican seis variables críticas para el proceso de concentración en el caso de la extracción de salmuera de litio.

5.1.-Superficie del yacimiento

Esta variable crítica hace referencia a la dimensión física del yacimiento.

5.2.-Reserva de litio.

Reservas aproximadas de la cantidad disponible de litio en cada yacimiento, es aquí donde se expresa la cantidad in situ del yacimiento en toneladas.

5.3.-Concentración de litio.

Es la cantidad de sales recuperables que podemos extraer de los yacimientos.

5.4.-Tasa de evaporación

Factor climatológico el cual a mayor índice el proceso de concentración de la salmuera es reducción en tiempo y menor instancia en los diversos pozos de evaporación.

5.5.-Relación potasio/litio.

Esta relación es directa con la producción de los diversos minerales ya que la producción de litio lleva consigo la coproducción de potasio la cual reduce los gastos operacionales dependiendo de que esta relación sea más cerca de 1 es a 1, es decir que cada 1 tonelada de litio se extraerá 1 tonelada de potasio como producto final.

5.6.-Relación magnesio/litio.

Esta relación hace referencia al proceso extractivo del magnesio el cual es un mineral que genera grandes pasivos mineros por lo cual no es rentable que esta razón sea superior ya que incrementa el costo de producción al tener que generar un plan de pasivos mineros para este mineral. Además dificulta el proceso de concentración de las partículas de litio.

CAPÍTULO 6.- Ranking de los yacimientos según variables críticas.

El ranking de los yacimiento fue elaborado en base a las variables críticas que condicionan las reservas extraíbles desde el salar, la química de la salmuera y las condiciones climáticas que afectan el proceso de concentración. El caso de Perú se presenta a modo de referencia ya que es un yacimiento diferente y no es comparable con el caso de extracción de salmueras. El caso de los yacimientos ubicados en Australia es similar al de Perú pues el litio es extraído desde mineral en roca. A cada variable se asignó un puntaje entre 1 y 7, siendo 7 la mejor condición. En la siguiente tabla se presentan los valores de las variables críticas de cada yacimiento.

		Superficie	Reservas de litio	concentración de litio	Tasa de Evaporación.	Relación	Relación
País.	Ubicación.	km ²	(ton)	(ppm)	(mm/Año)	K/Li	Mg/Li
Chile	Salar de Atacama.	2800	7,514,000	1500	3200	12.8	6.4
	Maricunga.	145	500,000	876	2400	9.1	8.2
Argentina	Hombre Muerto.	590	800,000	700	2740	9.7	1.3

	Salar de Olaroz.	260	550,000	700	2600	8	2.6
Bolivia	Salar de Uyuni.	10500	9,000,000	444	1800	21.8	23.6
Perú	Puno Macusani	910	2,500,000	3,700	No aplica.	Sin dato.	Sin dato.

Tabla 6.1 Yacimientos de litio y sus variables críticas.

Fuente: Recursos minerales argentina, 1999.
 Consejo Minero: Litio, Informe Especial, 2011.
 Seminario El Significado del Litio para el Desarrollo del País, 2016.

La asignación de puntaje a cada ítem será detallada a continuación siendo en todo los casos evaluados desde la nota inferior “1” mala hasta la nota superior “7” Excelente.

6.1.- Superficie (km²).

En este ítem se analiza de forma que al presentar una mayor superficie está obtendrá una mejor calificación con nota 7 (excelente), ya que en esta se podrán desarrollar más proyectos a futuro, la construcción de la planta y otros requerimientos se podrán emplazar dentro de los límites de los yacimientos.

6.2.- Reserva de litio (toneladas).

La reserva estimada del yacimiento se considera en comparación de 9.000.000 toneladas con una nota 7 (excelente), siendo este dato presentado por el salar de Uyuni, con el cual será comparado con los demás yacimientos.

6.3.- Concentración de litio (ppm).

La concentración de litio se estudia en consideración de partes por millón y se genera con un rango máximo de 1500 ppm, siendo esta la calificación con nota 7 (excelente).

6.4.- Tasa de evaporación (mm/año).

Este parámetro es considerado mediante diversos métodos de obtención los cuales se encuentra en el Anexo 1 generado principalmente en mm/año, pero en este estudio se genera como nota 7 (Excelente) de 3500 mm/año donde se evalúa en comparación a los demás yacimientos.

6.5.- Razón K/Li.

La razón potasio/litio influye de forma positiva ya que se genera un subproducto, pero mediante este estudio nuestro principal objetivo es la implementación de la extracción de litio por lo cual si esta es más cerca al valor 1 está obtendrá una mejor calificación.

6.6.- Razón Mg/Li.

La razón magnesio/litio influye de forma negativa ya que al tener una relación mayor a 1, la generación de residuos de magnesio es negativa para los procesos de concentración, donde aumenta el costo del proceso y además genera residuos mineros de gran impacto en el medio ambiente.

La estimación de puntaje para cada yacimiento, como se es mencionado anteriormente en 4 de los 6 parámetros se evalúa con nota máxima 7 (excelente) el yacimiento que cuente con mejor valor será el margen máximo comparativo para

los demás yacimientos, es decir que si el yacimiento salar de atacama cuenta con 1500 ppm en su concentración, esté será el parámetro comparador con nota máxima 7 y los demás yacimientos serán comparados con este límite.

Siendo en el caso de las razón de Mg/li y K/Li estos deben ser lo más cercano a 1 en su parámetro para obtener una nota 7 (Excelente), el cual mediante un formulación matemática de máximos y mínimos se le otorga un porcentaje de esta nota dependiente de sus valores en el parámetro, siendo calificado como nota 1 (nula) los yacimientos que cuenten con un razón más alejada de 1.

Evaluación de la dimensión	Nota.
Excelente	7
Buena	6
Regular	5
Menos que regular	4
Mala	3
Muy mala	2
Nula	1

En la siguiente tabla se puede apreciar el puntaje otorgado para cada país en su respectiva variable crítica, la cual esta explicada previamente y con qué parámetros fue evaluada;

País	Ubicación.	Superficie.	Reservas de litio.	Concentración de litio.	Tasa de evaporación.	Razón K/Li.	Razón Mg/li.	Total puntaje.	Ranking .
Chile	Salar De Atacama.	1.8	5.8	7.0	6.4	3.6	5.6	30.2	1
	Maricunga.	0.1	0.4	4.1	4.8	4.7	5.1	19.2	5
Argentina	Hombre Muerto.	0.4	0.6	3.3	5.5	4.5	6.9	21.2	3
	Salar de Olaroz.	0.2	0.4	3.3	5.2	5.0	6.6	20.7	4
Bolivia	Salar de Uyuni.	6.7	7.0	2.1	3.6	1.1	1.1	21.6	2

Tabla 6.2. Ranking del puntaje obtenido por yacimientos.
Fuente: Elaboración propia, 2018.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones Comerciales

- La demanda de productos que requieren litio para su manufactura crecerá de manera significativa en la próxima década, considerando el impulso que tiene actualmente la electro – movilidad y la industria de la telefonía celular entre otros productos.
- La demanda actual supera a la oferta por lo que se ha visto un incremento importante en los precios de carbonato e hidróxido de litio.
- El aumento de precio ha generado interés por aumentar el gasto en exploración por minerales de litio por lo que han surgido muchos proyectos que aumentarán la oferta de litio y el precio debería tender a la estabilidad.

- Los países ubicados en el triángulo del oro blanco tiene la oportunidad de maximizar su rentabilidad en este período, antes que la oferta aumente y se estabilicen los precios.

Conclusiones Técnicas

- La tecnología de concentración de la salmuera de litio desde pozas de evaporación solar requiere de una inversión alta, presenta una curva de producción (ramp up) con bajo crecimiento y es vulnerable a las condiciones climáticas.
- Se están desarrollando tecnologías como las de intercambio iónico, que reducen el tiempo de proceso de obtención de carbonato de litio, lo que es una amenaza para los actuales productores de salmueras desde salares.
- La producción de litio desde salmueras está limitada por una serie de variables que dependen de las características del acuífero, lo que reduce el potencial de aumento de la producción. La estimación es que se puede extraer hasta un 30% de la salmuera contenida en un salar.
- La evaluación del potencial de extracción de salmueras que contiene litio desde depósitos del tipo endorreico es crítica para evaluar la factibilidad técnico comercial del yacimiento.
- Tras los resultados obtenidos en el ranking se puede inferir que el Salar de Atacama es el yacimiento más óptimo para la extracción de litio, pero a raíz de que este estudio no genera un envolvente económico en el área productiva, si podemos saber a primera impresión que la extracción de este mineral será de menor costo de producción en comparación a los otros

salares considerando que las relaciones de potasio/ litio ayudan a disminuir el costo de operación, y que la relación de magnesio/litio aumenta el costo al tener que mitigar el impacto del pasivo minero que genera.

- El costo de producción de este ranking es mínimo debido a que su formulismo cuenta con una fácil introducción de futuros datos de otros yacimientos a estudiar, pero se debe tener en consideración que la obtención de estas variables es un trabajo arduo y el cual involucra tiempo, presupuestos y profesionales calificados.
- La declaración de recursos y reservas de yacimientos de litio de origen endorreico no está definida claramente a nivel de la industria y genera un espacio de incertidumbre en cuanto al real potencial de un yacimiento. La guía preparada por la Canadian Securities Commission es un intento por normar la declaración de recursos y reservas de esta industria.
- Este ranking considera diversas variables críticas las cuales mediante el cambio ambiental se puede ver expuestas a cambios mediante el pasar del tiempo, además con posibles mejoras y la implementación de nuevas tecnologías.
- La electromovilidad si viene tiene un factor el cual depende del almacenaje de energía es aquí donde se encuentra un papel fundamental para el litio , en el cual debe ser de un menor costo y con grandes márgenes de seguridad, actualmente la empresa tecnológica y automotriz Tesla en su modelo S las baterías de litio pesan 45 kg, la cual genera una autonomía de 600 km en condiciones normales aproximadamente, esto quiere decir que las baterías de litio deben ser de gran almacenabilidad fundamentalmente para los futuros vehículos.

- La fabricación de batería de litio para el uso en vehículo dependerá de la autonomía de este, en el modelo Tesla S modelo 85 kW contiene 7104 celdas de carbonato de litio grado batería el cual cuenta con un peso 325 kg (el paquete de almacenamiento de energía) esto quiere decir que cada celda cuenta con un peso aproximado de 46,5 gramos con una eficiencia normal de 2950 mAh, por lo tanto la cantidad de carbonato de litio será directamente proporcional a la autonomía de cada vehículo, siendo una relación aproximada de por cada kg de litio este producirá 0,01 kWh.
- Según la última cuenta realizada en el periodo 2016 – 2017 por Bloomberg New Energy Finance, ubica a la empresa Panasonic/Tesla como la principal productora de baterías de litio para el uso en vehículos con un 14.890 MWh de baterías vendidas dentro de un top 10 en ventas de vehículos eléctricos, considerando lo anterior el aumento de la demanda de litio se ve netamente proporcional a extracción y producción de carbonato de litio dejando en posición un aumento notable de esta.
- Siendo Australia el principal productor de litio con una mejor oferta y eficiencia productiva, este país cuenta con más de 10 empresas dedicadas a la explotación de roca de litio , teniendo en consideración que este país cuenta con tan solo un 11 % de las reservas del mundo y un 4% de los recursos de litio. Se proyecta que para el año 2021 Australia producirá el 45% total de la demanda mundial de litio.

Recomendaciones.

- Generar próximos ranking considerando valores económicos tales como precio de producción, costo de implementación, entre otros.

- Agregar más variables críticas con la finalidad de obtener más parámetros comparativos.
- Generar una cultura e información sobre el desarrollo de baterías de litio a nivel nacional, ya que esta se encuentra al alza.

GLOSARIO.

- Electro movilidad: Es la implementación de tecnología eléctrica en los procesos productivos, maquinaria, motores, etc.
- Reactividad electroquímica: reacción entre la transformación entre la energía eléctrica y la energía química.
- Espudomeno: Mineral de litio del grupo silicatos , con una composición química de 64,5% SiO₂, un 27,4% Al₂O₃, y un 8,1% Li₂O
- Lepidolita: Mineral de litio del grupo de las micas, con una composición química es (KLi₂Al(Al,Si)₃O₁₀(F,OH)₂).
- Pentalita: Mineral de litio del grupo de los silicatos, su composición química es LiAlSi₄O₁₀.
- Hectorita: Mineral de litio del grupo de las esmécticas, su composición química es Na_{0.4}Mg_{2.7}Li_{0.3}Si₄O₁₀ (OH)₂.
- Ambigonita: Mineral de litio del grupo de los fosfatos, su composición química es LiAlPO₄F.
- Eucryptita: Mineral de litio del grupo de los Neso silicatos, su composición química es LiAlSiO₄.

- Time domain: Es una señal la cual se rige por tiempos de dominios, la cual se utiliza para realizar estudios con repetición de onda.
- Permeabilidad (conductividad hidráulica): Es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna.
- Transmisividad: Es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro.
- Almacenabilidad: Término referido a almacenaje de un objeto, mineral u otro.
- Difusividad: Son los problemas de transferencia de calor, entre una partícula y otra.

BIBLIOGRAFIA.

Vicente, D. ;(2012). Optimización del proceso de evaporación de lixiviados en el relleno sanitario Santiago poniente. Santiago: UChile.

Hains, H.; (s.f.) CIM Best Practice Guidelines for Resource and Reserve Estimation for Lithium Brines.

NI, 43-704.; (2011) OSC Staff Notice 43-704, Mineral Brine Projects and National Instrument 43-101 Standards of Disclosure for Mineral Projects.

Garay, V.; Cantallop, J.; (2017). Mercado internacional del litio y su potencial en Chile. Santiago: CORFO.

PLU.; (2018).Macusani Project Lithium & Uranium in Peru Moving Towards 2020-21 Production. Peru: PLU.

Osses, L.; (2016). Seminario El Significado del Litio para el Desarrollo del País. Santiago: USS.

Gajardo, A.; (2014).Potencial de litio salares del norte de Chile. Chile: Sernageomin.

Kunasz, I.; (2013) Brines Resource and reserves.USA: A Kunasz and TRU Group inc.

NI, 43-101.; (s.f.). National instrument 43-101 standards of disclosure for mineral Project.

ANEXO.

Anexo 1: Fórmulas para el cálculo de tasas de evaporación.

cercana, con ubicación fisiográfica semejante, en la que se pudo aplicar Penman.

A continuación se describe brevemente los métodos de estimación de la ETP utilizados en este estudio y se muestra ordenadamente, en forma creciente, la exigencia de información meteorológica, para establecer los cálculos de la ETP.

- **Método de la Bandeja de Evaporación.**

$$ETP_{(mm/día)} = Ev \times Kp$$

Ev : evaporación de bandeja (mm/día)

Kp : Coeficiente de Bandeja. Doorenbos y Pruitt (FAO Nº24) proponen un coeficiente de ajuste dependiente de la humedad relativa media, de la velocidad del viento y de las condiciones de instalación de la bandeja, en cuanto a si el evaporímetro está rodeado por cultivo verde y corto o, si está rodeado por terreno seco y no cultivado, además, de la cantidad de metros de terrenos que tienen esa condición entre el borde de ataque del viento y el evaporímetro.

- **Fórmula de Ivanov .**

$$ETP_{(mm/mes)} = 0,0018 (25 + T)^2 \times (100 - HR)$$

T : temperatura media del aire, °C

HR : humedad relativa media, %

- **Fórmula de Turc.**

$$ETP_{(mm/día)} = 0,013 \times T / (T + 15) \times (RG + 50) \times \{ 1 + (65 - HR)/120 \}$$

T : temperatura media del aire, °C

RG : radiación global, (cal/cm²/día)

HR : humedad relativa media, %

El último término toma valores 1 para HR > 65%. Turc se adapta bien en climas áridos y semiáridos.(1)

(1) F. Santibáñez Q. En: Balance Hídrico y Demandas de Riego. Curso Interamericano Diseño de Obras Menores de Riego. U. de Chile. 1993.

- **Método de Blaney y Criddle modificado.**

$$ETP_{(mm/mes)} = a + b \times P (0,46 T + 8,13)$$

T : temperatura media mensual, °C

P : fracción diaria de las horas de luz anuales, %

a y b : coeficientes de ajuste de la función, en que Doorenbos y Pruitt (FAO N°24) los hacen depender de la humedad relativa mínima media mensual (HRmin), de la heliofanía relativa (n/N) y de la velocidad del viento a 2 m de altura (U2).

n : duración real del día (insolación)

N : duración máxima teórica del día para la latitud en cuestión.

Los valores de los coeficientes a y b están en la siguiente tabla:

TABLA 1
COEFICIENTES DE AJUSTE PARA LA ECUACIÓN DE BLANEY-CRIDDLE

HR min	n/N	U2 m/seg	a	b
< 20 %	< 0,6	> 5	-1,6	1,40
		2 - 5	-1,8	2,28
		< 2	-2,0	1,15
	0,6 - 0,8	> 5	-1,8	1,73
		2 - 5	-2,05	1,15
		< 2	-2,3	1,35
	> 0,8	> 5	-2,8	2,06
		2 - 5	-2,3	1,82
		< 2	-2,6	1,55
20 - 50 %	< 0,6	> 5	-1,7	1,25
		2 - 5	-1,85	1,15
		< 2	-2,0	1,05
	0,6 - 0,8	> 5	-2,1	1,52
		2 - 5	-2,15	1,38
		< 2	-2,2	1,2
	> 0,8	> 5	-2,55	1,82
		2 - 5	-2,5	1,61
		< 2	-2,4	1,37
> 50 %	< 0,6	> 5	-1,65	0,98
		2 - 5	-1,55	0,88
		< 2	-1,45	0,80
	0,6 - 0,8	> 5	-1,70	1,16
		2 - 5	-1,75	1,06
		< 2	-1,80	0,97
	> 0,8	> 5	-1,70	1,31
		2 - 5	-1,95	1,22
		< 2	-2,15	1,14

- **Fórmula de Penman.**

$$ETP_{(mm/día)} = 0,017 \times RN \times W + (1 - W) 0,265 \times (1 + 0,0062 U_2) \times (e_s - e_a)$$

RN : radiación neta en cal/cm²/día. Resulta de un balance de radiación de onda larga y de onda corta entre la atmósfera y la cubierta vegetal. Para ello es necesario estimar la emisión de radiación de onda larga y corta de ambos cuerpos, donde intervienen el coeficiente de emisividad de dichos cuerpos y su temperatura.

U₂ : recorrido del viento, Km./día.

e_s-e_a : déficit de saturación del aire, mb

e_s : presión de vapor a saturación = 6,11 exp {17,4 T/(T +239)}, mb

T : temperatura del aire, °C

e_a : presión de vapor actual = e_s x (HR / 100)

HR : humedad relativa, %

W : factor de ponderación por temperatura y altitud, interviene la constante psicrométrica, el calor específico del aire a presión constante y el calor latente de vaporización. Para este factor existe una linealización en la que se deja constante la altitud y se hace función sólo de la temperatura; $W = 0,414 + 0,0125 \times T$

Es una fórmula que se basa en el balance de energía del cultivo; donde el primer término evalúa el aporte de la radiación a la evapotranspiración y el segundo término evalúa el aporte advectivo.

Doorenbos y Pruitt (FAO N°24), proponen una corrección empírica al método de Penman mediante la introducción de un par de coeficientes, de la siguiente forma:

$$ETP_{\text{corregida}} = a + b (ETP_{\text{calculada}})$$

Los coeficientes de corrección dependen de la velocidad del viento, del cociente entre el viento diurno y nocturno, de la humedad relativa máxima y de la magnitud de la radiación solar. Estos coeficientes están en la siguiente tabla :

TABLA 2
COEFICIENTES DE AJUSTE PARA LA ECUACIÓN DE PENMAN

Viento (m/seg.)	Viento (día/noche)	HR máx	Radiación	a	b
>= 4	>= 4	= 100	alta (>8 mm/d)	0,30	1,15
<= 4	>= 4	>= 75	todas las condiciones	0,47	0,99
0 - 5	= 2	>= 60		-0,03	0,98
< 4	<= 1,5	<= 40	moder./alta	-0,71	0,98
5 - 8			en verano	-1,30	0,85
> 8			baja invierno	-1,30	0,70
				-0,70	0,40

El programa computacional utilizado, para aplicar los 5 métodos recién descritos se muestra en el ANEXO III.

Luego de aplicar cada uno de estos 5 métodos en cada estación meteorológica, de acuerdo a su disponibilidad de información, se realizó diversos análisis de regresión, para evaluar la correlación entre el método de Penman y los otros. De esta manera se obtuvo los coeficientes para corregir los otros métodos, consiguiendo así, un valor de Penman estimado con Blaney o con Turc o con Ivanov.

Observando los análisis de regresión y la matriz de correlación se concluyó en la conveniencia de utilizar como métodos auxiliares, el de Turc en primer lugar y al de Ivanov en segundo lugar. El método de Blaney se dejó de lado porque donde se puede aplicar este método, también se puede aplicar el de Turc. Los análisis de regresión fueron hechos por estación y zona geográfica.

En la Tabla 9 del ANEXO I se muestra los valores de ETP mensual y anual para cada estación meteorológica considerada. En ella se indica el método utilizado para estimar el valor equivalente a Penman.

Por último, se realizó un análisis de "cluster" (agrupamiento), para identificar las estaciones que tienen un comportamiento similar en cuanto a la distribución mensual de la ETP. Con ello se definió las áreas geográficas que tienen una distribución mensual semejante, de tal modo que, conociendo la ETP anual y el coeficiente correspondiente a cada mes, se obtiene la ETP mensual para cualquier mes del año.

La áreas o “zonas de distribución semejante” están identificadas con un número romano en la cartografía de la ETP anual. Entonces, de acuerdo a este número, se utilizará uno de los conjuntos de coeficientes indicados en la siguiente tabla:

TABLA 3
DISTRIBUCIÓN MENSUAL DE LA ETP
PARA CADA ZONA GEOGRÁFICA IDENTIFICADA (%)

ZONA	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
I	8,99	8,70	8,16	8,81	7,48	6,03	6,41	7,21	8,17	9,65	10,28	10,10
II	9,47	9,13	8,79	7,78	7,09	6,48	6,79	7,39	8,17	9,10	9,71	10,11
III	14,54	11,79	9,81	6,51	4,52	3,38	3,63	4,93	6,59	9,19	11,15	13,96
IV	13,60	11,24	9,70	6,67	4,66	3,41	3,75	5,23	6,95	9,61	11,43	13,75
V	11,69	11,29	10,41	9,04	6,93	5,95	6,15	5,93	6,58	7,34	8,63	10,07
VI	16,31	12,78	9,92	5,96	3,52	2,37	2,69	3,95	6,03	9,14	12,00	15,35
VII	17,05	12,82	9,57	5,32	2,89	1,93	2,29	3,76	6,15	9,58	12,56	16,10
VIII	17,30	12,81	9,95	5,46	2,82	1,86	2,01	3,25	5,75	9,39	12,87	16,53
IX	16,43	12,02	9,56	4,89	2,63	1,73	2,00	3,10	5,58	9,38	12,39	20,28
X	17,49	13,27	9,88	5,16	2,35	1,23	1,29	2,57	5,62	10,06	13,90	17,17
XI	17,42	12,68	9,76	4,32	1,99	1,74	1,79	2,26	5,35	10,60	14,47	17,62

Confeción Álbum Cartográfico.

Se elaboró una base cartográfica donde se vació los datos de la ETP, para proceder al trazado de las isolinéas. En esta base se incluyó información sobre red hidrográfica, cuerpos de agua, capitales de región, provincia y comuna, red vial principal y división administrativa. Tanto la escala de trabajo, como los formatos y viñetas de esta base cartográfica fueron definidas de tal forma que constituyeran un álbum de un tamaño de 50 por 70 cm aproximadamente.

Sobre la base cartográfica recién indicada se procedió a trazar la ETP anual, para todo el territorio nacional continental. Para ello, se colocó los valores anuales de la ETP en cada estación meteorológica sobre la base cartográfica, la cual, se sobrepuso a una cartografía de relieve realizado, obtenida de las cartas del IGM. escala 1:250.000 con curvas de nivel cada 100, 200, 500 y 1.000m, según el tipo de relieve del territorio, reducidas a las escalas 1:500.000 y 1:1.000.000 requeridas para este trabajo. Posteriormente se procedió al trazado de las isolinéas. En este proceso se aplicó criterios de interpolación y extrapolación que tienen en cuenta los accidentes fisiográficos, la altitud, la

