Estudio de los Recursos Hídricos y el Impacto por Explotación Minera de Litio

Cuenca Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc – Provincia de Jujuy

DICIEMBRE 2018*

FUNDACIÓN AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

Por Marcelo Sticco, Patricio Scravaglieri y Antonella Damiani.

*Publicado en agosto 2019.

RESUMEN EJECUTIVO

A partir del análisis de la información técnica generada por las mismas mineras y de acceso público, tanto de la cuenca hídrica Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc como -en mayor medida- de la cuenca hídrica aledaña Olaroz-Cauchari (donde ya se ha iniciado la producción de carbonato de litio), se llega a las siguientes conclusiones preliminares en cuanto a riesgo hídrico y geológico, considerando la producción mediante el método de evaporación y sin la reinyección de agua en el sistema subterráneo:

1. Riesgo muy probable de degradación irreversible de las reservas de agua dulce que yacen en los bordes de la cuenca y por debajo de los abanicos fluviales.

2. Riesgo probable de subsidencia o asentamientos diferenciales del suelo a causa del vaciamiento del agua contenida en los acuíferos y pérdida de la presión de sostén del suelo, cuyas consecuencias serían rotura del suelo superficial (salinas actuales), alteración del sistema hídrico superficial y afectación significativa del proceso ancestral de "cosecha de sal", practicada por las comunidades originarias.

Resumen de los riesgos

Degradación irreversible de las reservas de agua dulce

El primer punto es comprender la existencia de aguas dulces. Las cuencas cerradas (endorreicas), como la de Salinas Grandes, presentan un sistema de acuíferos en cuya zona central el agua contiene altas concentraciones de sales disueltas (entre otros elementos, el Litio).

En las zonas periféricas de la cuenca, y por debajo de los denominados abanicos aluviales, se han detectado en los trabajos de exploración de litio importantes masas de agua dulce (de baja salinidad).

El segundo aspecto es la conexión entre las zonas con litio y las zonas dulces. Las masas dulces y saladas se hallan hidráulicamente conectadas; esto se interpreta a partir de la presencia de una zona denominada de "mezcla", que es una franja de contacto entre las aguas dulces y saladas mezcladas.

El simple hecho de que, en la naturaleza, dos elementos distintos estén en contacto, genera una zona intermedia en la cual (en estos casos) se intercambian las sales. Lo cual prueba que existe un contacto entre ambas partes, ya que cada parte contribuye a formar una zona intermedia con el aporte de su respectiva masa de agua, cuyo resultado es una condición "en común" entre los dos extremos.

Otra evidencia son las mediciones de salinidad del agua efectuadas a lo largo de una línea de pozos verticales y realizadas en los bordes del principal abanico Archibarca (en la vecina cuenca de Olaroz-Cauchari).

El tercer aspecto es comprender el movimiento de las masas de agua en forma "centrípeta" (desde el borde hacia el centro).

A diferencia de lo que ocurre con la explotación tradicional de minerales sólidos en roca, la explotación del litio se realiza a partir de la obtención de agua (denominada salmuera por su alta concentración de sales disueltas).

Los pozos de producción de agua de salmuera con litio, que en el futuro serán entre decenas y cientos en cada cuenca, extraerán mayor cantidad de agua que la que se infiltra a partir de las escasas (o nulas) lluvias. Se estima que sólo el 5% del agua de lluvia ingresa al subsuelo.

Este des-balance entre los ingresos (infiltración por lluvia) y egresos (producción de salmuera) de agua trae como consecuencia el descenso paulatino del nivel del agua subterránea y el aumento de la velocidad del flujo de agua dulce que se dirige hacia los pozos de producción de salmuera.

Tal como se describió en el punto anterior, la no reposición de volúmenes de salmuera, producto de la evaporación durante el proceso de producción de litio, tiene como consecuencia el vaciamiento de los acuíferos.

Evidencias directas de este proceso de descenso del nivel de agua subterránea se pueden detectar en la cuenca vecina (Olaroz-Cauchari).

A mediados de 2018 la empresa Sales de Jujuy SA presentó la actualización de su Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), con 22 pozos productores de salmuera. En ella se observa que, en los últimos 12 meses de funcionamiento continuo de estos pozos, se han registrado descensos de hasta 40 metros de profundidad. Teniendo en cuenta que los niveles críticos para la salinización del agua dulce se hallan entre los 20 y los 70 metros de profundidad, el descenso registrado en el EIA en el primer año de producción continua, con el 25% del total de pozos proyectados para la primera etapa de producción, muestra que ya se han alcanzado las profundidades críticas de salinización del agua.

El cuarto aspecto es el mecanismo de salinización del agua dulce. Las masas de agua dulce se hallan "montadas" sobre el agua salada. Una vez que el agua dulce se moviliza hacia los pozos de producción de salmuera, atraviesa sedimentos permeables cuya matriz sólida (arena) o "paredes" contienen sales que son incorporadas al agua dulce y, de esta forma, aumenta su salinidad.

Este proceso es irreversible; es decir que, aun si el agua salada "retrocediera" a las zonas anteriores con sedimentos sin sales, estas últimas permanecen en el agua porque tienen un alto coeficiente de solubilidad (entiéndase por esto que las sales son más afines al agua que a los sólidos, motivo por el cual el agua no vuelve a su condición inicial, dulce).

Un último aspecto no menor, que acelera los procesos descritos, es el uso de agua dulce para la producción de carbonato de litio.

Subsidencia o asentamientos diferenciales del suelo

En el aspecto tercero de la sección anterior se describe el "vaciamiento" de los acuíferos. Básicamente el agua, entre otras condiciones, cumple con un rol fundamental en lo que respecta a sostener y soportar las presiones que ejerce el subsuelo.

La eliminación del agua (que no se puede comprimir o "aplastar") provoca que ese espacio sea reemplazado por aire, un fluido que sí se puede comprimir o "aplastar". Por esta causa, la eliminación del agua produce la reducción de la fuerza que sostiene la matriz sólida del suelo, por lo que se produce una suerte de aplastamiento de grandes bloques de suelos.

La consecuencia a nivel superficial es la formación de bajos o hundimientos del suelo y trae aparejada la posible rotura del sello arcilloso somero, que es el responsable de la formación de las salinas actuales.

En caso de rotura de este sello, el agua superficial se infiltraría en el subsuelo y rompería el ancestral equilibrio de la evaporación natural que forma las salinas de cloruro de sodio, cuyo legítimo usufructo representa una de las principales fuentes de ingreso económico para las comunidades indígenas de la cuenca.

Por todo lo expuesto, con el actual sistema de producción de litio por métodos evaporíticos se estaría generando un pasivo ambiental y social que debería ser tomado en cuenta tanto en los balances ambientales de las empresas mineras que adhieran a los principios de responsabilidad social corporativa, como en la evaluación ambiental por parte del Estado provincial a la hora de dictaminar la aprobación o no de estos proyectos.

La pregunta que surge es la siguiente:

¿Se puede explotar el litio con métodos de menor impacto hídrico?

La respuesta es afirmativa toda vez que se reemplace el método evaporítico por uno de separación por vía húmeda, como por ejemplo el patentado por el CONICET y el Dr. Ernesto Calvo, u otros métodos disponibles en el mercado que emplean nanotecnología. Utilizando estas alternativas a la evaporación, el agua de "rechazo" podrá ser repuesta en el subsuelo mediante pozos inyectores.

Esta técnica permitiría producir las 24 horas, ya que no necesita del calor del sol para evaporar, y adicionalmente la salmuera reinyectada "empujaría" el agua hacia los pozos productores, aumentando la velocidad y eficiencia del proceso.

Esta técnica es utilizada en forma rutinaria en la mayoría de los yacimientos de gas y petróleo de Argentina (incluyendo el off shore) desde hace más de 30 años. Se denomina "recuperación secundaria" y el país cuenta con profesionales ampliamente capacitados para su diseño y operación.

RESUMEN EJECUTIVO 02

1. INTRODUCCIÓN 07

1.1. Objetivos, alcances y limitaciones 07

1.2. Ubicación de áreas de estudio 07

1.3. Metodología 08

1.4. Consideraciones hidrológicas y ambientales generales. Humedales: salares, salinas y lagunas 09

2. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL 10

2.1. Delimitación de cuencas y subcuencas hídricas 10

2.1.1. Cuenca Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc 10

2.1.1.1. Subcuenca Salinas Grandes 13

2.1.1.2. Subcuenca Guayatayoc 13

2.2. Clima 14

2.2.1. Precipitaciones 14

2.2.2. Temperatura 15

2.2.3. Ciclo y balance hídrico natural simplificado 15

2.2.3.1. Balance hídrico. Localidad de Susques 15

2.2.3.2. Balance hídrico. Localidad de Tumbaya 16

3. GEOLOGÍA 18

3.1. Resumen del marco geológico regional 18

3.2. Unidades geológicas superficiales y subsuperficiales en el área de estudio 19

3.2.1. Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc 19

4. HIDROGEOLOGÍA 21

4.1. Resumen del marco hidrogeológico regional 21

4.2. Hidrogeología de las áreas de estudio 21

4.2.1. Hidrogeología de la Cuenca Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc 21

5. MODELOS GENERALES BÁSICOS DEL FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO E HIDROGEÓLOGICO EJEMPLOS RECOPILADOS DE LAS ÁREAS DE ESTUDIO 22

6. EXPLOTACIÓN DEL LITIO 25
6.1. Fuentes de Litio en la naturaleza 25
6.2. Métodos de explotación 25
6.2.1. Necesidad de agua dulce 25
6.2.2. Proceso de obtención del carbonato de litio 25
6.2.2.1. Lithium Americas 25
6.2.2.2. Orocobre 27
6.2.2.3. Otras explotaciones de Litio en Argentina 27
6.3. Áreas concesionadas 28
6.4. Volúmenes de agua 30
6.5. Proyectos actuales y perspectivas 30
7. CONSIDERACIONES SOBRE EL REPORTE TÉCNICO EN SALINAS GRANDES Y LAGUNA GUAYATAYOC 33
8. CONSIDERACIONES FINALES Y RECOMENDACIONES 33
9. BASE DE DATOS DE FUENTES, ORGANISMOS, INSTITUCIONES E INFORMANTES CONSULTADOS 35

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe se enmarca en el proyecto *"Promote the indigenous communities' participation in Adaptation and Resilience strategies recognizing the value of endorheic watersheds in the Argentine Puna"*, ejecutado por la Fundación Ambiente y Recursos Naturales (FARN) con el apoyo de Tides Foundation.

El estudio se enfoca en los eventuales impactos negativos sobre el agua por acción de la explotación de litio y sustancias relacionadas en la cuenca Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc. Asimismo, complementa y actualiza el informe "Estudio regional general de los recursos hídricos y su eventual impacto por explotación minera de litio y sustancias relacionadas, en dos zonas de la puna jujeña y salteña", realizado en 2012 por los hidrogeólogos Marcelo Sticco y Gabriel Meconi.

Este informe fue encomendado al hidrogeólogo Marcelo Sticco, a la estudiante de Ingeniería Ambiental Antonella Damiani y al estudiante de Ciencias Geológicas Patricio Scravaglieri, para evaluar el estado del Salar Salinas Grandes según los conocimientos existentes recopilados exclusivamente de fuentes públicas y privadas; es decir, sin la realización de trabajos de campo, mediciones específicas en el terreno ni recolección de datos *ad hoc*. Si bien esto implica limitaciones a la hora de elaborar conclusiones y recomendaciones, es un primer paso adecuado para tener una visión regional general que permita estudios de mayor detalle en el futuro.

1.1. Objetivos, alcances y limitaciones

Los principales objetivos del presente trabajo incluyen los siguientes:

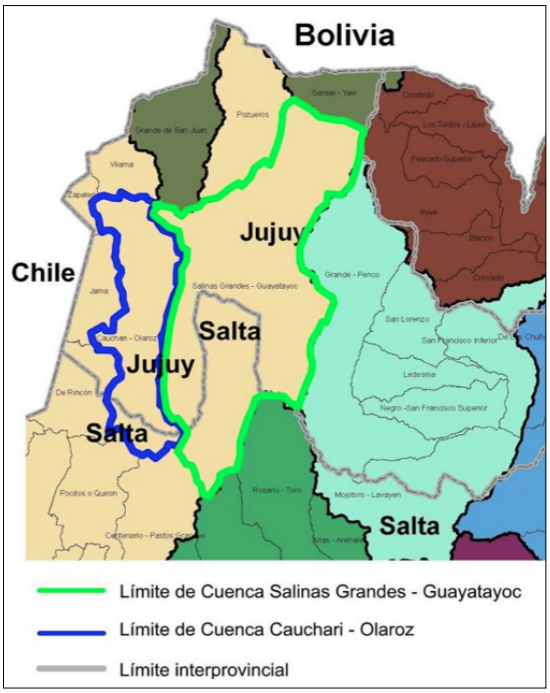
- Recopilar información existente a nivel nacional y provincial sobre agua superficial y subterránea (dulce y salada) en la región de la cuenca de Salinas Grandes.
- Analizar y evaluar dicha información, haciendo hincapié en sus relaciones naturales (ciclo hidrológico; cuencas y subcuencas hídricas) y, si la información lo permite, plantear algunos modelos generales básicos.
- Analizar y evaluar la información recopilada en lo que respecta a los diversos usos del agua por parte de las actividades humanas desarrolladas en la región de estudio, haciendo hincapié en la actividad minera existente y a implantarse en el futuro.
- Evaluar la información obtenida y los resultados alcanzados mediante un informe final que sirva como parámetro básico mínimo con el que puedan compararse estudios de impacto ambiental de emprendimientos prospectivos, exploratorios y de explotación minera de litio y sustancias relacionadas.

1.2. Ubicación del área de estudio

El área indicada para ser estudiada se corresponde con la cuenca de Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc y particularmente con la subcuenca de Salinas Grandes, en el sector Este de la región.

En la siguiente figura, tomada como referencia, se observa el límite de cuencas hídricas que abarcan las provincias de Jujuy y Salta (esta última en menor proporción areal).

FIGURA 1.1:
LÍMITE DE LAS CUENCAS HÍDRICAS. **Fuente:** INTA.



1.3. Metodología

El trabajo consistió en la recopilación, revisión y evaluación de los antecedentes publicados vinculados al objeto del estudio en los organismos públicos y privados que posean dicha información tanto en Buenos Aires como en San Salvador de Jujuy y Salta. Las acciones contemplan:

- Recopilación de antecedentes e información relevante sobre aguas superficiales y subterráneas en la Puna jujeña y salteña (zonas de cuencas Salinas Grandes y Laguna de Guayatayoc, salares Olaroz-Cauchari, y áreas de influencia) existentes en Buenos Aires.
- Recopilación de antecedentes de la misma índole en Jujuy y Salta.
- Entrevistas con profesionales, investigadores y funcionarios afines a la temática.
- Ordenamiento, análisis y evaluación de la información obtenida.
- Informe final, incluye la cartografía que la información y la evaluación permitieron realizar (mediante utilización de mapas, antecedentes recopilados e imágenes satelitales).

Enumeración de algunos de los tipos de datos e información que se recopilaron:

- Perforaciones (pozos) para exploración y captación de agua subterránea (información hidrodinámica e hidroquímica).
- Recursos hídricos superficiales (hidrodinámica e hidroquímica de las cuencas y subcuencas con salinas, salares, lagunas, etc.).
- Identificación y extracción de datos de mapas de la región (hojas geológicas, hidrogeológicas, hidrológicas, de suelos, etc.).

• Trabajos publicados (también algunos inéditos) principalmente de las siguientes instituciones:

• Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación
• Secretaría de Minería de la Nación
• Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)
• Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)
• Universidades Nacionales de Buenos Aires y La Plata
• Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación
• Consejo Federal de Inversiones (CFI)
• Otras

1.4. Consideraciones hidrológicas y ambientales generales. Humedales: salares, salinas y lagunas.

Este apartado se basa en el trabajo "Hidrología de los humedales dependientes del agua subterránea e implicancias ecológicas", de Marisol Manzano (2005), Universidad Politécnica de Cartagena, España (trabajo que es citado prácticamente en forma textual). Como se verá en la descripción, los salares bajo análisis encuadran en la clasificación de una tipología de modelos de humedales.

La hidrología de un humedal controla todos los procesos que ocurren en éste. El origen del agua, sus características químicas y su variabilidad controlan la hidroquímica del humedal, la calidad del agua y el balance de sales y nutrientes. El flujo de agua subterránea está regulado por parámetros geológicos, hidráulicos e hidrológicos cuyo conocimiento detallado requiere realizar estudios generales y específicos, usar métodos convencionales y también especiales, y realizar estudios a largo plazo (varios años) para evitar sesgos en los resultados y asegurar su representatividad. La hidrogeología de humedales dependientes de agua subterránea varía espacialmente debido a la variabilidad de la recarga, la topografía y las características de los sedimentos en las zonas de descarga. Los tres factores controlan una compleja distribución tridimensional del flujo de agua subterránea en el entorno cercano al humedal.

Los humedales son manifestaciones hídricas que ocurren en lugares del terreno donde las características fisiográficas y climáticas favorecen la acumulación o retención de agua superficial o subterránea en la superficie o cerca de ella (suelos saturados sin lámina de agua libre o criptohumedales). No son lagos (cuerpos de agua quieta suficientemente profundos como para desarrollar estratificación al menos parte del año) ni ríos (cuerpos de agua corriente), pero pueden originar ambos. La retención de agua libre, o la saturación del suelo, puede ser permanente, estacional u ocasional -por ejemplo, restringida a años húmedos-, pero debe ser un hecho recurrente. Ejemplo de humedales son pantanos, manglares, marismas, llanuras mareales, **salares,** turberas, dolinas, cenotes, lloraderos, ojos, juncales, rezumaderos, ciénagas, cañaverales, cañadas, bofedales.

Las características hidráulicas e hidrológicas de un humedal controlan todos los procesos que ocurren en éste. La *hidrología del humedal* se refiere al conjunto de procesos que introducen agua, la almacenan y la desalojan en un determinado humedal. Los primeros y los últimos son procesos de flujo de agua, los segundos son procesos de almacenamiento.

Estos procesos se refieren siempre a límites naturales dados –laterales, superiores e inferiores- que contienen el humedal. El límite lateral es generalmente la isolínea de mayor cota de la lámina de agua, o la vegetación -relacionada con el humedal- que utiliza agua superficial y subterránea. El límite inferior es generalmente la base de la cubeta del humedal, o la base de los sedimentos de fondo de cubeta. El límite superior es la superficie del agua y la superficie del terreno alrededor de la cubeta, hasta llegar al límite lateral.

Estos procesos pueden ser de dos tipos: procesos de aporte (introducen agua en el humedal) y procesos de extracción (extraen agua del humedal). El agua puede proceder de -y volver a- la atmósfera, llegar y marcharse como escorrentía superficial, o proceder de descarga subterránea y convertirse en recarga a acuíferos.

Desde el punto de vista exclusivamente hidrogeológico, los humedales dependientes de aguas subterráneas se pueden clasificar en tres tipos de modelos básicos: humedales de descarga, humedales de recarga y humedales de flujo a través.

Aquí se hace hincapié principalmente en los primeros (humedales de descarga), ya que los salares, salinas y lagunas, objetos del presente estudio, se relacionan en forma general mejor con dicho modelo (sin descartar variaciones parciales con los otros dos, ya que los modelos idealizan casos generales que no siempre son estrictos en los casos concretos naturales). En los **humedales de descarga,** la descarga de agua subterránea es la fuente más significativa de aporte, mientras que la extracción de agua puede estar dominada por flujo superficial, por evapotranspiración, o por una combinación de ambos procesos. Si domina el flujo superficial, el agua experimenta pocos cambios químicos durante su permanencia en la cubeta del humedal. Si **domina la evaporación,** el agua de la cubeta será más salina que el agua subterránea original, pudiendo incluso **evolucionar el humedal hacia un salar.** Este último es el modelo ideal que guía en general este trabajo, modelo que se profundizará en capítulos próximos, en los que se presentará material gráfico que ilustrará su comportamiento.

2. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

2.1. Delimitación de cuencas y subcuencas hídricas

El área de estudio comprende la cuenca de Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc, en el sector Este de la región.

2.1.1. Cuenca Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc

Esta cuenca presenta una superficie de aproximadamente 17.552 Km2 (INTA - Paoli H., 2010), donde la laguna de Guayatayoc y las Salinas Grandes constituyen el nivel de base local de la extensa cuenca endorreica. Ambas poseen sus propios sistemas tributarios, pero desde el punto de vista geomorfológico continúan siendo el centro de la cuenca cerrada que se extiende desde el sur de San Antonio de los Cobres, Provincia de Salta, hasta el Norte de Abra Pampa, Provincia de Jujuy, como se puede ver en las Figuras 2.1 y 2.2.

En las Figuras 2.3. y 2.4 pueden apreciarse las localidades principales que se mencionan en este informe, así como los rasgos hidrográficos y toponímicos descritos.

El régimen de las aguas depende casi exclusivamente de las precipitaciones estivales, que se verifican en forma de granizo y nieve en las altas cumbres o como lluvias en las zonas bajas.

FIGURA 2.1:
CUENCA SALINAS GRANDES-GUAYATAYOC. **Fuente:** INTA - Paoli, 2010.

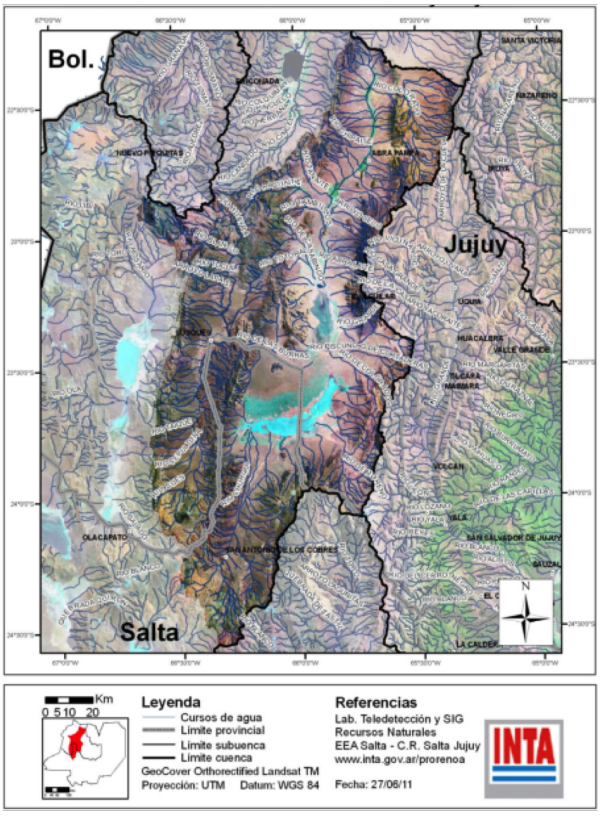


FIGURA 2.2:
CUENCA SALINAS GRANDES-GUAYATAYOC. PENDIENTES. **Fuente:** INTA - Paoli, 2010.

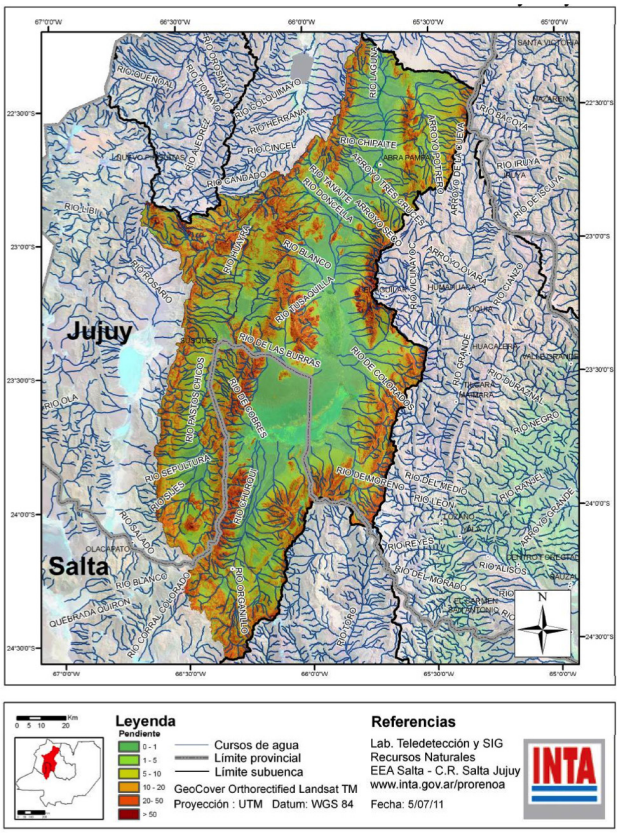


FIGURA 2.3:
CUENCAS SALINAS GRANDES-GUAYATAYOC Y OLAROZ-CAUCHARI. TOPONIMIA, HIDROGRAFÍA Y LOCALIDADES PRINCIPALES. ESCALA REGIONAL. **Fuente:** INTA - Paoli, 2002.

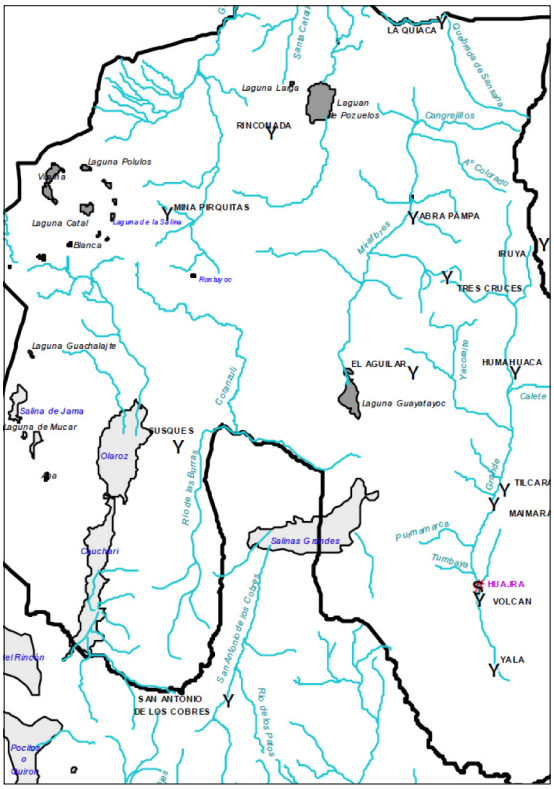
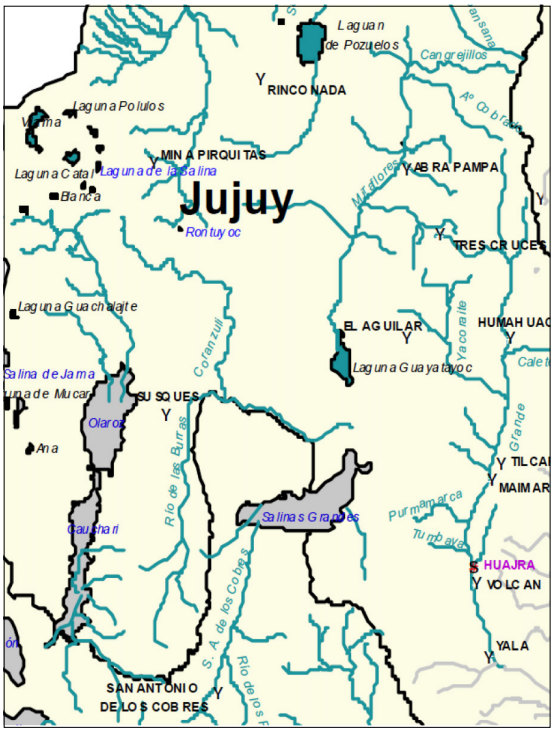


FIGURA 2.4:
CUENCAS SALINAS GRANDES-GUAYATAYOC Y OLAROZ-CAUCHARI. TOPONIMIA, HIDROGRAFÍA Y LOCALIDADES PRINCIPALES. AMPLIACIÓN DE FIGURA 3.3. **Fuente:** INTA - Paoli, 2002.



2.1.1.1. Subcuenca Salinas Grandes

La subcuenca de Salinas Grandes posee una superficie total de 11.351 Km2 y agrupa la subcuenca San Antonio de Los Cobres y otras microcuencas menos significativas.

- Río San Antonio de los Cobres

La subcuenca del río San Antonio, de forma elongada, se desarrolla en dirección norte-sur y su máxima amplitud es de 80 Km, en las cercanías de la localidad de San Antonio de los Cobres. En base a observaciones hidrogeológicas y criterios geomorfológicos, la subcuenca del río San Antonio se puede dividir en tres sectores con características geomorfológicas, de flujo superficial y subterráneo diferentes: San Antonio superior, medio e inferior.

San Antonio Superior

Se extiende desde las nacientes hasta la localidad de San Antonio de los Cobres, con un área de 596 km^2. Se compone de numerosos ríos que confluyen en los alrededores de San Antonio de los Cobres y dan origen al río del mismo nombre. Los principales ríos poseen un régimen de escurrimiento permanente como consecuencia, en parte, de las precipitaciones sólidas en las nacientes, que producen de esta manera suficientes volúmenes de este recurso.

En esta cuenca existen dos focos hidrotermales: los baños de Pompeya e Incachule, que con sus aportes contribuyen a mantener el caudal permanente de los ríos principales. Si bien no representan aportes importantes a los cursos fluviales, son suficientes para mantener la humedad de los terrenos adyacentes y permitir el desarrollo de una cobertura vegetal (generalmente herbácea).

San Antonio Medio e Inferior

Esta subcuenca comprende un área de 1.166 km^2; desde la localidad de San Antonio de los Cobres hasta el límite sur de la cuenca de Guayatayoc.

El límite entre las subcuencas media e inferior es difuso, localizándose aproximadamente donde se unen la ruta provincial N° 38 y la ruta nacional N° 40.

La red de drenaje se simplifica en un cauce principal de carácter permanente con diseño anastomosado que fluye por un amplio valle. A excepción del río Los Patos, los afluentes recibidos en este sector de la subcuenca son de escasa importancia y de carácter temporal.

El río San Antonio pertenece a la cuenca de Salinas Grandes, que presenta una morfología semilunar controlada por el extenso abanico del río Las Burras en su margen occidental. Este abanico, aunque infuncional, posee un extenso desarrollo en superficie, lo que permite la recepción de agua de precipitación que, luego de una rápida infiltración y posterior percolación en el subsuelo, recarga las reservas subterráneas convirtiendo este depósito en un importante reservorio acuífero.

2.1.1.2. Subcuenca Guayatayoc

La superficie total de la cuenca alcanza los 6.083 Km^2 aproximadamente. Su principal subcuenca es la del río Miraflores-Arroyo Colorado.

- Río Miraflores - Arroyo Colorado

El río Miraflores es uno de los cursos con agua permanente en superficie de mayor importancia. Escurre desde Pumahuasi, Cangrejo y Cangrejillos, y desde el noroeste de las Sierras de Aguilar se dirige hacia el sur para desaguar en la laguna de Guayatayoc. Entre los tributarios de mayor importancia que recibe el río Miraflores, se destaca el arroyo Colorado que escurre cercano a la localidad homónima, próxima a la localidad de Cangrejillos.

El recurso hídrico subterráneo en estas cuencas se encuentra muy limitado, no sólo por razones climáticas sino también porque las sierras de Cochinoca y Escaya presentan materiales muy poco permeables en su flanco oriental, generando condiciones poco favorables para la infiltración de las precipitaciones

2.2. Clima

En la siguiente sección se presentan las características principales del clima en el área de estudio.

2.2.1. Precipitaciones

En la región de la Puna, las lluvias son escasas y se concentran en el período estival. Son de carácter torrencial, disminuyen de N-S y de E-O.

La mayor parte de las precipitaciones ocurren entre los meses de noviembre y marzo, período denominado "estación lluviosa"; la "estación "seca" corresponde al resto del año, cuando las precipitaciones son de escasas a nulas.

En la siguiente tabla se pueden observar los valores promedio de precipitación (en mm) para la localidad de Susques y la localidad de Tumbaya, esta última ubicada a 20 Km del borde SE de la cuenca Salinas Grandes - Guayatayoc.

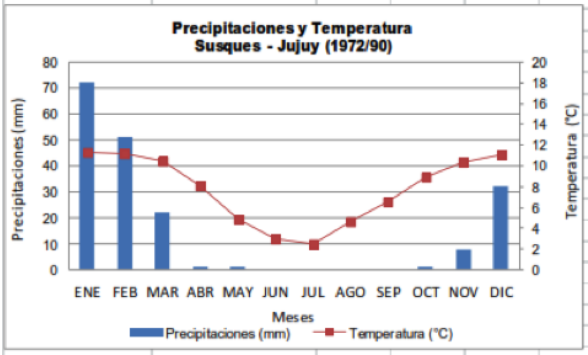
PRECIPITACIONES (EN MM) EN **SUSQUES** (CERCANA A CUENCA OLAROZ-CAUCHARI)
Y TUMBAYA (CERCANA A CUENCA SALINAS GRANDES-GUAYATAYOC)

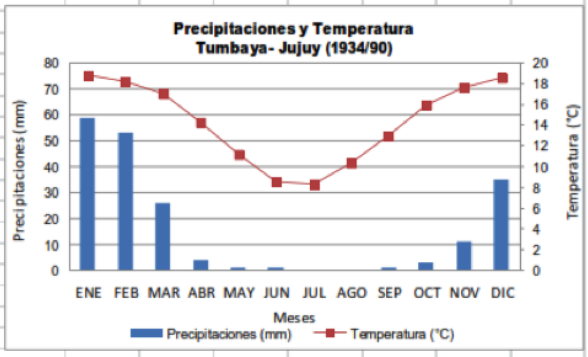
LOCALIDAD	COORDENADAS	Alt (m)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Susques 1972/90	Lat.23°26' Lon.66°30'	3675	72	51	22	1	1	0	0	0	0	1	8	32	188
Tumbaya 1934/90 (Cercana a Cuenca Salinas Grandes - Guayatayoc)	Lat.23°51' Lon.65°28'	2094	59	53	26	4	1	1	0	0	1	3	11	35	194

Fuentes: Susques: Paoli, INTA, 2002 – Tumbaya: Bianchi R, Yáñez Carlos (INTA)
(**http://anterior.inta.gov.ar/prorenoa/info/resultados/Precip_NOA/RESULTADOS_estad_pre.asp**, fecha consulta 23-03-12)

En los siguientes gráficos se representan las precipitaciones medias y las temperaturas medias (ver próximo apartado) de ambas localidades en los períodos considerados.

Precipitaciones y Temperatura		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
	Mes												
Susques (1972/90)	Precipitaciones (mm)	72	51	22	1	1	0	0	0	0	1	8	32
	Temperatura (°C)	11,3	11,2	10,5	8,1	4,9	3	2,5	4,6	6,6	8,9	10,4	11,1
Tumbaya (1934/90)	Precipitaciones (mm)	59	53	26	4	1	1	0	0	1	3	11	35
	Temperatura (°C)	18,8	18,2	17	14,3	11,2	8,6	8,3	10,4	13	15,9	17,6	18,6





2.2.2. Temperatura

En la zona de estudio el clima es frío y seco. En general el área presenta marcadas amplitudes térmicas diarias, variables en función de la estación del año que se considere. Se llega a alcanzar los 30° C, con temperaturas medias anuales inferiores a 8° C y mínimas invernales inferiores a -20° C.

Esta marcada amplitud térmica diaria es producto de la baja humedad relativa y de la alta intensidad de la radiación solar (INTA: Paoli, 2003).

A continuación se observan los valores medios de temperaturas (°C) para las dos localidades antes mencionadas.

TEMPERATURAS (EN °C) **EN SUSQUES Y TUMBAYA** (CERCANA A CUENCA SALINAS GRANDES-GUAYATAYOC)

LOCALIDAD	COORDENADAS	Alt (m)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Susques 1972/90 (cercana a Cuenca Olaroz-Cauchari)	Lat.23°26' Lon. 66°30'	3675	11,3	11,2	10,5	8,1	4,9	3	2,5	4,6	6,6	8,9	10,4	11,1	7,7
Tumbaya 1934/90 (cercana a Cuenca Salinas Gran-des-Guayatayoc)	Lat.23°51' Lon. 65°28'	2094	18,8	18,2	17	14,3	11.2	8,6	8,3	10,4	13	15,9	17,6	18,6	13,9

Fuentes: Susques: Paoli, INTA, 2002 – Tumbaya: Bianchi R, Yáñez Carlos (INTA) **(http://anterior.inta.gov.ar/prorenoa/info/resultados/Precip_NOA/RESULTADOS_estad_pre.asp,** fecha consulta 23-03-12)

En el apartado anterior se presentaron los gráficos de temperaturas de ambas localidades.

2.2.3. Ciclo y balance hídrico natural simplificado

Las escasas precipitaciones, unidas a las condiciones extremas del conjunto de variables climáticas presentes en la región, conforman un balance hídrico regional negativo para todos los meses del año, generando escurrimientos torrentosos de agua superficial durante la ocurrencia de algunas lluvias de verano, y cauces sin agua superficial y/o escasos caudales disponibles durante el resto del año.

En las tablas y los gráficos siguientes se pueden observar los datos correspondientes a los balances hídricos simplificados para las localidades de Susques y Tumbaya.

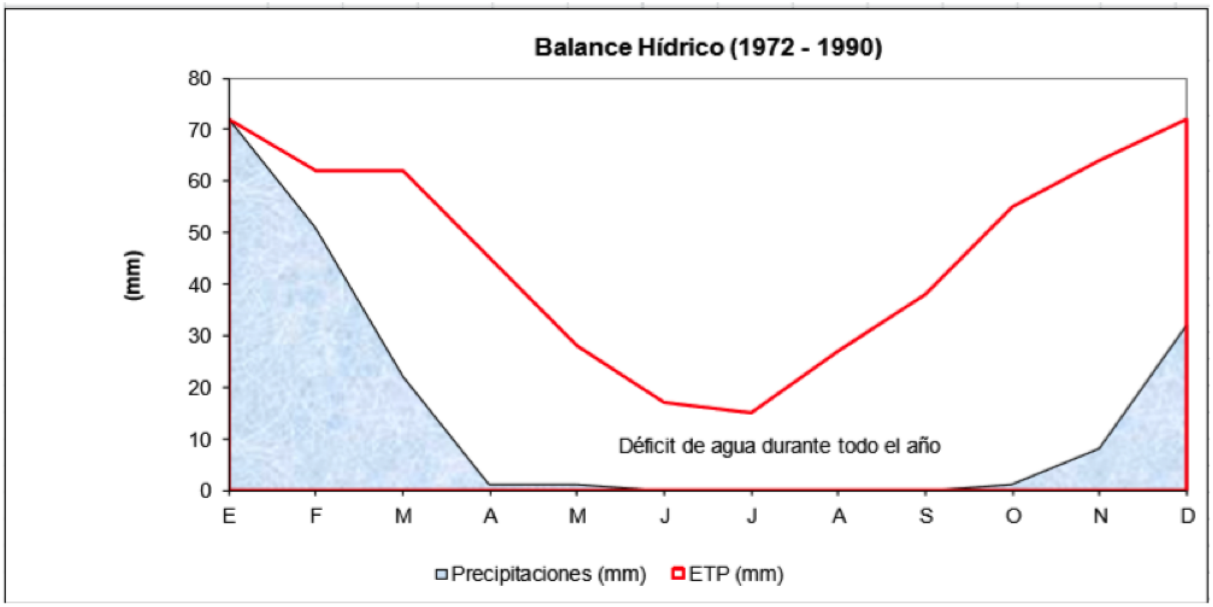
2.2.3.1. Balance hídrico. Localidad de Susques.

DESCRIPCIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURA	11,3	11,2	10,5	8,1	4,9	3	2,5	4,6	6,6	8,9	10,4	11,1
PRECIPITACIÓN	72	51	22	1	1	0	0	0	0	1	8	32
EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)	72	62	62	45	28	17	15	27	38	55	64	72
EVAPOTRANSP. REAL	72	51	22	1	1	0	0	0	0	1	8	32
DÉFICIT	0	-11	-40	-44	-27	-17	-15	-27	-38	-54	-56	-40
EXCESO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESCURRIMIENTO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuentes: Susques: Paoli, INTA, 2002 – Tumbaya: Bianchi R, Yáñez Carlos (INTA) **(http://anterior.inta.gov.ar/prorenoa/info/resultados/Precip_NOA/RESULTADOS_estad_pre.asp,** fecha consulta 23-03-12)

1972-1990 - BALANCE HÍDRICO: SUSQUES

LOCALIDAD	ENE	FEB	MAR	ABRIL	MAY	JUN	JUL	AGOS	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
PRECIPITACIONES (mm)	72	51	22	1	1	0	0	0	0	1	8	32	188
ETP (mm)	72	62	62	45	28	17	15	27	38	55	64	72	557



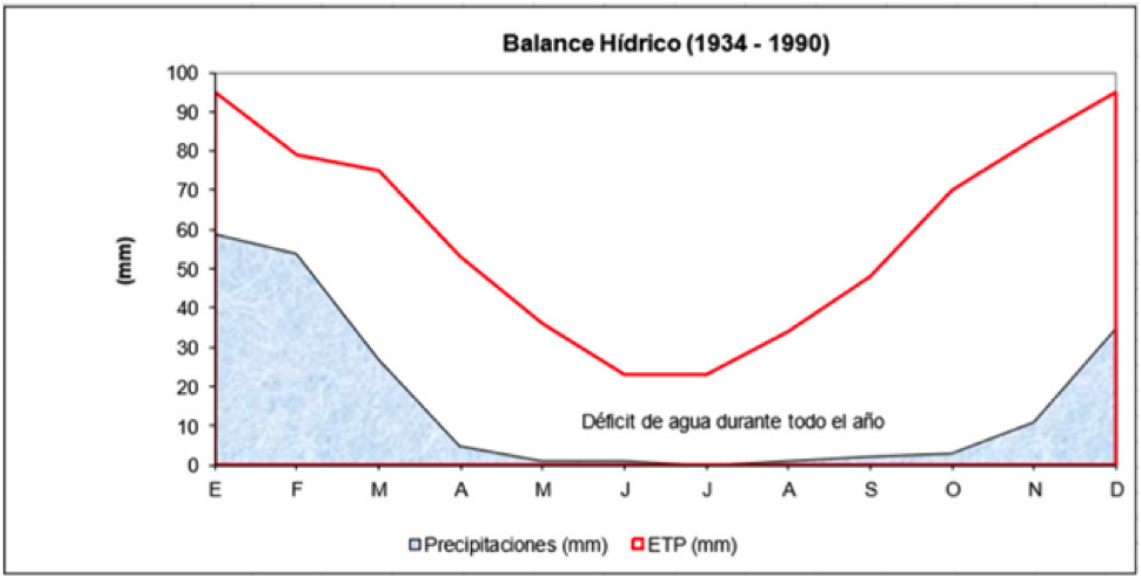
2.2.3.2. Balance hídrico. Localidad de Tumbaya (cercana a Cuenca Salinas Grandes-Guayatayoc)

DESCRIPCIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
TEMPERATURA	18,8	18,2	17	14,3	11,2	8,6	8,3	10,4	13	15,9	17,6	18,6
PRECIPITACIÓN	59	54	27	5	1	1	0	1	2	3	11	35
EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP)	95	79	75	53	36	23	23	34	48	70	83	95
EVAPOTRANSP. REAL	59	54	27	5	1	1	0	1	2	3	11	35
DÉFICIT	-36	-25	-48	-48	-35	-22	-23	-33	-46	-67	-72	-60
EXCESO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ESCURRIMIENTO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuentes: Susques: Paoli, INTA, 2002 – Tumbaya: Bianchi R, Yáñez Carlos (INTA) **(http://anterior.inta.gov.ar/prorenoa/info/resultados/Precip_NOA/RESULTADOS_estad_pre.asp,** fecha consulta 23-03-12)

1934-1990 - BALANCE HÍDRICO: TUMBAYA

	ENE	FEB	MAR	ABRIL	MAY	JUN	JUL	AGOS	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
PRECIPITACIONES (mm)	59	54	27	5	1	1	0	1	2	3	11	35	19
ETP (mm)	95	79	75	53	36	23	23	34	48	70	83	95	714



Tomando en cuenta la descripción del balance hídrico de la cuenca Olaroz – Cauchari presentada por una empresa minera que realiza prospección de Litio en la zona, se mencionan los siguientes conceptos (tomados del informe LAC_NI_43-101_Updated_12062010: King M., 2010, en *LAC, Measured, Indicated and Inferred Resource Estimation of Lithium and Potassium at The Cauchari and Olaroz Salars, Jujuy Province, Argentina):*

La recarga de agua a los salares se produce a través de tres procesos principales: la infiltración directa de las lluvias, la entrada lateral del subsuelo de agua dulce subterránea desde fuera del perímetro salar, y el flujo de agua superficial en el salar. La recarga a los salares por la infiltración de la precipitación ocurre durante la temporada de lluvias de diciembre a marzo de cada año. Registros de precipitación Olacapato en la parte sur de Cauchari entre 1950 y 1990 muestran que la precipitación total es de aproximadamente 70 mm por año. Se estima que entre un 5 y un 20% de esta precipitación se convierte en recarga al agua subterránea.

En los ríos Rosario, Ola y Tocomar se observan pérdidas superficiales de flujo de agua luego de ingresar en los salares, debidas en parte a la infiltración y en parte a la evaporación a lo largo de la trayectoria del flujo.

Estos ríos finalmente desaparecen por completo, ya que el flujo se dirige hacia el centro de los salares. Las cabeceras de los ríos Rosario y Tocomar son manantiales de agua termal. Se interpreta que la mayor parte del agua que ingresa en los salares durante la estación seca, a través de estos dos ríos, es de origen hidrotermal.

La descarga de agua de los salares se produce mediante la evaporación y la evapotranspiración.

La tasa de evaporación probablemente es superior en las áreas perimetrales del salar (donde el nivel freático está más cerca de la superficie) y disminuye hacia el centro. La evapotranspiración también se concentra en el área perimetral, donde la vegetación es capaz de crecer debido a la presencia de aguas subterráneas con relativa baja salinidad, cerca de la superficie del suelo.

La descarga de aguas subterráneas se produce en el Sur de Cauchari, en la superficie del terreno, y se estimó en alrededor de 10 L/s (litros por segundo) en noviembre de 2009, al final de la temporada seca. Este agua, originada en el salar, fluye a través de la superficie del salar en dirección Norte y luego se disipa a través de una combinación de infiltración y evaporación. En consecuencia, no es una descarga neta del salar, aunque el tiempo de residencia en la superficie probablemente produce el aumento de la evaporación.

No hay salidas de agua subterránea conocidas de la cuenca del Olaroz-Cauchari. Hasta la fecha no hay ninguna descarga conocida a través de bombeo de aguas subterráneas, a excepción de las cantidades menores asociadas con las actividades de exploración y muestreo minero.

3. GEOLOGÍA

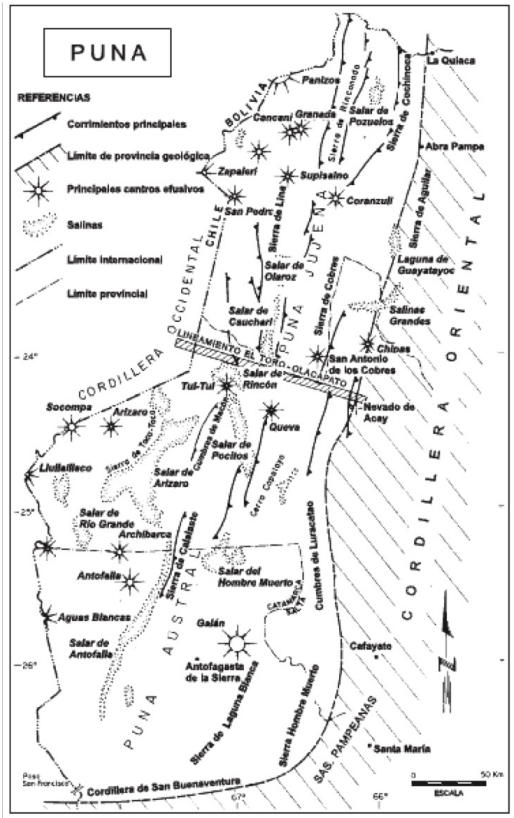
3.1. Resumen del marco geológico regional

Las cuencas estudiadas en este trabajo se desarrollan sobre la Provincia Geológica de la Puna (Turner, 1972). Se entiende por provincia geológica la región caracterizada, en todo su entorno, por poseer la misma historia geológica o por sus similares aspectos estructurales, petrográficos o fisiográficos (Salfity, 2010).

La provincia geológica de la Puna está caracterizada por una altiplanicie sobre-elevada por encima de los 3.700 m.s.n.m. (metros sobre el nivel del mar) y presenta límites bien definidos con la Cordillera Oriental al Este, al Sur con la cordillera San Buenaventura, al Norte hasta el límite con Bolivia -dentro de cuyo territorio recibe la denominación de Altiplano Boliviano-, y al Oeste a través de la frontera argentino-chilena con la Cordillera Occidental, parcialmente en territorio chileno. (Figura 3.1)

Algunos autores como Alonso *et al.* (1984) han propuesto dividir la Puna en dos sectores, sobre la base de sus características geológicas regionales: la Puna Septentrional o Jujeña, y la Puna Austral o Puna Saltocatamarqueña, siendo el límite entre ambas provincias el lineamiento Toro-Olacapato

FIGURA 3.1: PRINCIPALES RASGOS GEOLÓGICOS DE LA PUNA
(RAMOS 1999, EN GEOLOGÍA ARGENTINA, SEGEMAR, CAMINOS 1999 EDITOR)



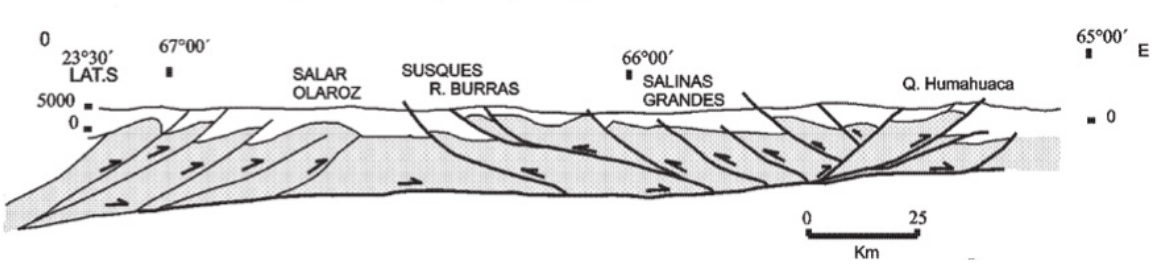
La característica más saliente de la Puna es su volcanismo orogénico cenozoico, constituido por estratovolcanes y domos volcánicos de composición andesítica y dacítica (Figura 3.1), y calderas volcánicas, algunas de grandes dimensiones, asociadas a flujos ignimbriticos y conos basálticos monogénicos. Estos productos volcánicos se intercalan con depósitos terciarios continentales que se desarrollaron en cuencas intermontanas, la mayor parte de ellas endorreicas, que culminan con depósitos evaporíticos, constituyendo los grandes salares de la Puna.

La cuenca de Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc está ubicada en el borde oriental de la Puna, extendiéndose parcialmente hacia la Provincia Geológica de Cordillera Oriental.

Esta cuenca está caracterizada por fallas, en su mayoría inversas, de rumbo general N-S, ligeramente desviado al N-E.

Este relieve es el resultado de la estructuración cretácica, que dio lugar a sistemas de "horst" y "graben" (valles de origen tectónico) que durante el Mioceno, producto del levantamiento de los Andes, sufrieron compresión e inversión tectónica desarrollando las fallas inversas que se distinguen en el terreno (Figura 3.2).

FIGURA 3.2: CORTES GEOLÓGICOS ESQUEMÁTICOS DE LA PUNA ACTUAL, (MON, 2005)



Laguna de Guayatayoc y Salinas Grandes forman parte de una extensa depresión intermontana de rumbo NNE-SSO que se desarrolla desde el Sur de Bolivia hasta la latitud de San Antonio de los Cobres, en Salta.

3.2. Unidades geológicas superficiales y subsuperficiales en el área de estudio

La depresión tectónica donde está la cuenca recibe material sedimentario clástico y químico que, procedente de la erosión de los relieves perimetrales, compone los materiales de relleno. A la vez, en la Puna las eyecciones volcánicas también contribuyeron al relleno de la cuenca.

A continuación se detallan las diferentes unidades litológicas presentes en la cuenca Salinas Grandes-Guayatayoc.

3.2.1 Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc

- Precámbrico-Paleozoico

Las rocas precámbricas afloran al Sur de Salinas Grandes, donde se reconoce una facies sedimentaria y otra metamórfica de bajo grado, con pasajes transicionales entre ambas. Estas facies son reconocidas dentro de la Formación Puncoviscana.

En discordancia angular con dicha formación se encuentran las rocas clásticas cámbricas del Grupo Mesón, conformadas por cuarcitas intercaladas con pelitas y areniscas, de origen marino.

Sobre ellas se depositaron, aparentemente en concordancia, las sedimentitas ordovícicas representadas por lutitas, areniscas y cuarcitas marinas con una amplia fauna, del Grupo Santa Victoria.

Las sedimentitas situadas al oeste de la depresión Guayatayoc-Salinas Grandes contienen lavas, ignimbritas, e intrusivos poco profundos. Estas rocas conformarían el basamento de la cuenca.

- Mesozoico

Cretácico

Durante este período se intruyeron los granitoides de Tusaquillas, Abra Laite y Aguilar, y se produjo la posterior apertura de la cuenca del Grupo Salta, de tipo rift intracontinental. Esta cuenca recibió sedimentación en forma casi ininterrumpida hasta el Terciario Inferior (Eoceno).

El relleno inicial (sinrift) de la cuenca consta de acumulaciones clásticas continentales de ambientes de abanico aluvial, fluvial entrelazado, planicie de arcilla y ocasionalmente lacustre (Subgrupo Pirgua).

En algunos sectores la etapa de colmatación del rift se encuentra acompañada de vulcanismo alcalino que se intercala con la secuencia sedimentaria. La etapa post-rift está representada por acumulaciones carbonáticas y clásticas, que constituyen los Subgrupos Balbuena y Santa Bárbara.

- Cenozoico

Paleógeno-Neógeno

Estos afloramientos se exponen al este de la sierra de Aguilar. Se inician con la Formación Casa Grande (Fernández *et al.*, 1973) compuestos por pelitas calcáreas y areniscas rojas, con intercalaciones de lentes de conglomerados en la parte superior, indicando un ambiente fluvial asociado a abanicos aluviales distales.

El persistente tectonismo de intensidad creciente se refleja en las Formaciones Río Grande (Pascual *et al.*, 1978) y Pisungo (Pascual *et al.*, 1978), compuestas por conglomerados y areniscas de ambiente fluvial anastomosado; y conglomerados y aglomerados producto de abanicos aluviales proximales, que evolucionan a planicies aluviales y fluviales entrelazadas hacia posiciones distales.

Durante este período hubo una intensa actividad volcánica. Algunos mantos de ignimbritas afloran inmediatamente al oeste de la depresión y es probable que también formen parte de su relleno.

- Cuaternario

Desde el Oeste de El Aguilar descienden hacia la cuenca amplias bajadas que avanzan hacia la laguna. En la parte central y profunda de la cuenca se encuentran sedimentos finos producto de las inundaciones durante la estación estival.

Una fina costra salina compleja, de un espesor de hasta 2 mm, cubre los sedimentos finos al retirarse el agua de la laguna.

Según Manaldi (1993), a partir del análisis de la sección sísmica de la zona y de su correlación con la columna estratigráfica aflorante al este de la sierra de Aguilar, el relleno de la cuenca se puede resumir en la parte superior, de aproximadamente 700 metros de espesor, que correspondería a los depósitos aluviales cuaternarios; seguida por sedimentos de areniscas y conglomerados terciarios, de aproximadamente 3000 metros de espesor, que disminuyen 2000 metros hacia el Oeste.

Debajo de estos se encuentran pelitas calcáreas y areniscas rojas con espesores de pocos centímetros a 600 metros, apoyadas sobre las sedimentitas cretácicas de 1000 metros de espesor, aproximadamente.

4. HIDROGEOLOGÍA

4.1. Resumen del marco hidrogeológico regional

Según Auge (2004), la región hidrogeológica de la Puna constituye la terminación austral del Altiplano peruano–boliviano, se emplaza en el extremo NO argentino y abarca parte de las provincias de Jujuy, Salta y Catamarca, extendiéndose hacia el O y N, hasta el límite internacional con Chile y Bolivia.

La cuenca hidrogeológica se encuentra en una depresión elevada, o sea que constituye una región con avenamiento centrípeto a cota media 3.800 m.s.n.m. rodeada por altos cordones montañosos. Son frecuentes los salares y altos picos volcánicos, especialmente en el borde occidental, en coincidencia con la Cordillera Principal. Hacia el E, en el límite con la Cordillera Oriental, predominan rocas metamórficas y graníticas del precámbrico a las que se les superponen rocas sedimentarias y sedimentos de edades posteriores. En estos estratos se almacena el agua subterránea profunda y somera.

El clima extremadamente seco con déficit hídrico determina que la disponibilidad del agua sea muy escasa; la del ciclo hidrogeológico se origina en lo deshielos de las altas montañas y en lluvias puntuales (que ocurren durante el breve período húmedo). La infiltración de las corrientes superficiales en los faldeos pedemontanos y en los álveos de los ríos da lugar a acuíferos localizados, dominando los libres o freáticos. La calidad del agua desmejora hacia el centro de los salares debido a la concentración por evaporación.

Estudios realizados por Organismos provinciales y nacionales han identificado acuíferos aptos para consumo humano y para riego, pero de escaso volumen y caudales muy limitados.

4.2. Hidrogeología del área de estudio

4.2.1. Hidrogeología de la Cuenca Salinas Grandes y Laguna Guayatayoc

La información disponible del agua subterránea se refiere a los pozos excavados en el área de la subcuenca de Guayatayoc por los pobladores del área. La profundidad del nivel freático y calidad de agua varían según la ubicación de los pozos, en planos aluvionales o pie de monte; y según su cercanía a la cuenca de Guayatayoc y a las fuentes de recarga.

En la siguiente tabla se presentan los registros de Conductividad Eléctrica (C.E., medida en unidades de mmhos/cm) en el agua subterránea de las fuentes de abastecimientos de agua existentes, medidos entre los años 1978 y 1979.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE EN MMHOS/CM) **Y PROFUNDIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA**
(**Fuente:** Proyecto NOA Hídrico 1976-79 en INTA 2010).

LUGAR	PARÁMETRO	08-03-78	14-05-78	20-09-78	20-11-78	20-01-79	31-03-79
CHORRILLOS	Profundidad agua. (en m)	15.00	15.30	15.30	15.60	15.90	15.90
	CE	1.117	1.264	1.368	1.332	1.260	1.490
ESCUELA CHORRILLOS	Profundidad agua. (en m)	16.00	17.00	17.00	17.30	17.50	15.70
	CE	0.785	0.813	0.809	0.777	-	0.778
CASA BENITO ALFARO	Profundidad agua. (en m)	13.50	14.00	14.00	14.20	14.50	13.90
	CE	0.771	0.800	0.798	-	0.762	0.756
CASA SR. GONZÁLEZ	Profundidad agua. (en m)	13.00	14.00	-	14.30	13.70	13.30
	CE	0.811	0.780	-	-	-	0,799
SR. C. APARICIO	Profundidad agua. (en m)	12.50	12.50	12.50	12.80	12.90	12.50
	CE	0.811	0.813	0.832	0.799	0.768	0.778

LUGAR	PARÁMETRO	08-03-78	14-05-78	20-09-78	20-11-78	20-01-79	31-03-79
SRA. F. MARTÍNEZ	Profundidad agua. (en m)	13.00	13.30	13.30	13.60	13.70	13.10
	CE	0.825	0.787	0.804	0.771	0.756	0.767

Las profundidades del nivel freático varían entre 2 y 17 m, tal como se observa en la tabla anterior. Los niveles freáticos están menos profundos cuanto más cercanos a la zona de ciénaga (donde se registraron los niveles), dato que resulta de interés para el desarrollo de pasturas permanentes en las llanuras del valle, aprovechando el contenido de humedad subsuperficial disponible (Proyecto NOA Hídrico 1976-79 en INTA 2010).

En la localidad de Abra Pampa existen 3 pozos perforados en el acuífero freático a una profundidad final de 18 a 36 mbbp. Los niveles estáticos oscilan entre 12 y 15 mbbp (metros bajo boca de pozo). Se utilizan con un caudal de 16 m3/hora. Un análisis del agua dio como resultado 360 mg/L de salinidad total; Alcalinidad 105 mg/L, Cloruro 32 mg/l, Sulfato 88 mg/l, fluoruro 0,2 mg/L y pH 7,8 (fuente: Minera Dajin Resources: Informe de Impacto Ambiental para la etapa de Prospección CATEOS 1.269-J-2.009 y 1.266-J-2.009).

En Pueblo Viejo, en Cochinoca, existe una perforación de donde se bombean 18 m3/día. La perforación tiene una profundidad de 52,60 mbbp, con el nivel freático a 12,60 mbps. Prácticamente no hay casi depresión al realizar la extracción diaria del pozo. La conductividad fue de 1007 uS/cm y los parámetros físicos químicos de este pozo están dentro de las normas para agua potable. Un pozo cavado a mano en la escuela de dicha localidad posee una conductividad de 380 uS/cm, sulfato 46 mg/L y cloruro 28 mg/L (fuente: Minera Dajin Resources: Informe de Impacto Ambiental para la etapa de Prospección CATEOS 1.269-J-2.009 y 1.266-J-2.009).

Sobre el plano salino, **en la mina Guayatayoc III,** se realizó una perforación mecánica y a la profundidad de **60 metros** se interceptó una capa de arena que **contiene agua de baja salinidad** que es utilizada para lavar la sal que se produce. Estos niveles de arena están asociados a los niveles que se encuentran en el sector del río La Burra-Tres Pozos. El pozo es artesiano -surgente- (fuente: Minera Orocobre: Informe de Impacto Ambiental para la etapa de Exploración para las Mina Daniela I - Expte.N° 1132-S-2.009).

En la actualidad, en el área de estudio el agua es principalmente utilizada para consumo humano y animal a partir de vegas en el borde del salar.

5. MODELOS GENERALES BÁSICOS DEL FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO. EJEMPLOS DE LOS TRABAJOS RECOPILADOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

Según lo presentado en el apartado 1.4, los salares, salinas, lagunas y demás cuerpos de agua que abundan en estas cuencas y que suelen ser los principales cuerpos y los que revisten interés en la minería del litio, pueden ser considerados HUMEDALES. De los modelos ideales planteados por Manzano (2005), el que más se ajustaría a estos cuerpos sería el de "humedales de descarga", como ya se señaló en el apartado citado.

En este apartado sólo se pretende presentar algunos gráficos que ilustran la modelización ideal planteada por dicha autora, y otros gráficos tomados de la información recopilada, principalmente de informes de las empresas mineras involucradas en esas cuencas, en los que se modelizan también los estudios geológicos-geofísicos-hidrogeológicos efectuados para establecer reservas, comportamiento hídrico subterráneo, etc., o simplemente esquemas de presentación de resultados que sin llegar a ser modelos pueden ilustrar el comportamiento del agua superficial y subterránea. Cada uno de estos gráficos se comenta brevemente.

Según Manzano (2005), algunos de "los mecanismos que aportan y extraen agua de un humedal son (Fig. 1.):"

> ""*Precipitación...*"

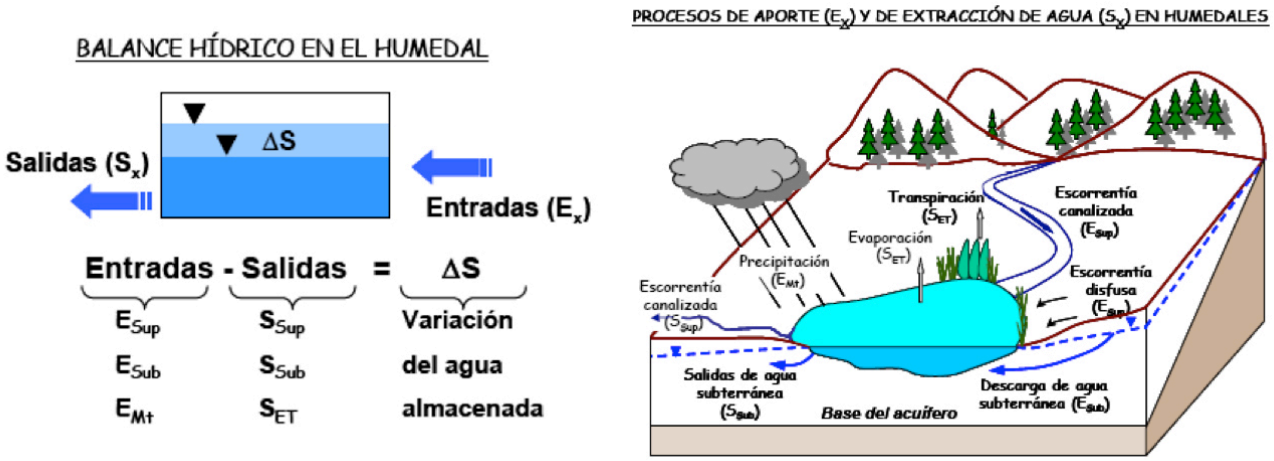
> ""*Condensación de la humedad atmosférica...*"

> ""*Flujo superficial* hacia *(aporte)* o desde *(extracción)* los límites del humedal..."

> ""*Flujos de agua subterránea.* Consisten en la descarga de agua subterránea a la cubeta del humedal y a la vegetación asociada (abastecimiento), y en la extracción de agua del humedal mediante infiltración a través del terreno y eventual recarga a un cuerpo de agua subterránea..."
>
> *"Evaporación" y "transpiración vegetal..."*
>
> *"Procesos artificiales que aportan o extraen agua de un humedal...* La extracción de agua puede tener lugar mediante bombeo".

La siguiente figura reproduce la Fig. 1 del trabajo de Manzano (2005), que explica el modelo conceptual antes descrito.

MECANISMOS DE APORTE Y EXTRACCIÓN DE AGUA EN HUMEDALES Y BALANCE HÍDRICO
(TOMADA DE MANZANO 2005, "FIG. 1").



Según Manzano (2005), "el almacenamiento de agua se refiere al volumen de agua contenido en el humedal, que incluye tanto el/los cuerpos de agua superficial como el agua intersticial del suelo y los sedimentos. Con frecuencia este volumen de agua varía temporalmente, al hacerlo la superficie húmeda efectiva y la superficie ocupada por vegetación hidrófila. Los cambios en el volumen almacenado son resultado de diferencias entre las tasas de aporte y extracción de agua, es decir del **balance del agua en el humedal...** Este concepto se refiere a la identificación y cuantificación de los procesos y mecanismos de aporte, almacenamiento y extracción de agua del humedal... Una versión simplificada de balance de agua de un humedal, en el que los valores se refieren al periodo considerado o bien pueden expresarse como tasas anuales (dividiendo por el tiempo de observación en años) es la siguiente (ver figura anterior):

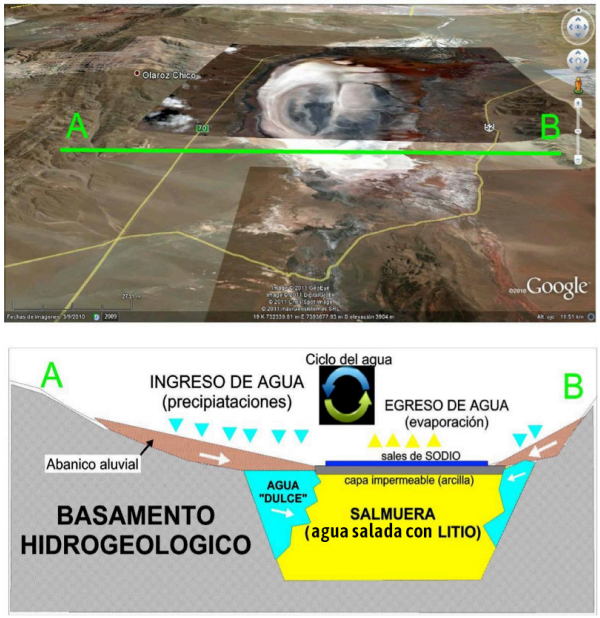
"ESup + EMt + ESub = SSup + SET + SSub + ΔS [1]"

"...donde *ESup* representa la entrada total de agua superficial; *EMt* es el aporte meteorológico total; *ESub* es la aportación total al humedal procedente de la descarga de agua subterránea; *SSup* es la salida total de agua en forma de flujos superficiales; *SSub* es la salida subterránea de agua; *SET* es la evapotranspiración y *ΔS* es la variación del almacenamiento de agua en el humedal, que puede ser positiva o negativa... Los términos del balance de agua pueden ser estimados. Una estimación más precisa (...) requiere de instrumentación de campo y mediciones detalladas de varias variables durante un cierto periodo de tiempo (en general no inferior a dos o tres años)".

A continuación se presentan una serie de diagramas que representan los modelos hidrogeológicos aceptados hasta el momento para ambas cuencas, tomados de sus fuentes originales a partir de la recopilación de los antecedentes. Se observa que la interpretación del presente trabajo (el primero de los esquemas) coincide, en

términos generales, con las interpretaciones de los trabajos de las distintas mineras que realizan las tareas de exploración de Litio en la región. Algunos de ellos son sólo esquemáticos, por lo que su diseño no debe tomarse en cuenta de forma estricta ni precisa, sino solo a modo ilustrativo.

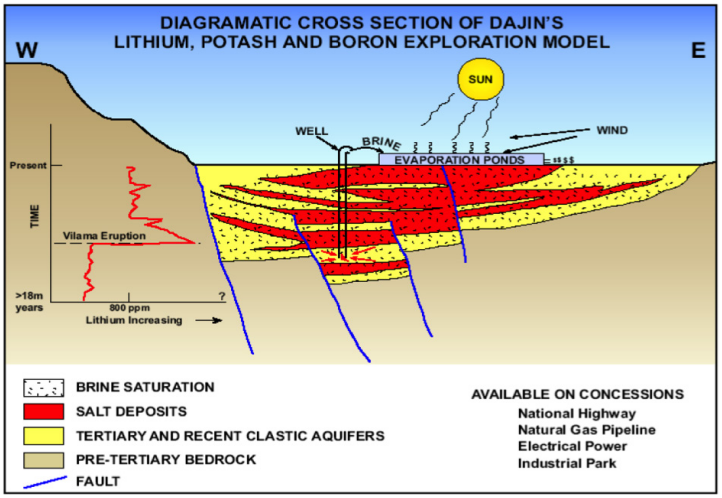
MODELO GENERAL BÁSICO INTERPRETADO, ESQUEMÁTICO. MODELO HIDROLÓGICO PRESENTE (EQUILIBRIO)



Modelo hidrológico general interpretado, esquemático. Representa las condiciones presentes, previas a la explotación de salmueras con Litio.

En color gris se representa el basamento hidrogeológico; en marrón, los abanicos aluviales, por donde ingresa el agua al sistema subterráneo. El color celeste representa la zona de los multi-acuíferos con agua dulce o de baja salinidad. En amarillo está la zona de los multi-acuíferos con salmueras ricas en Litio. Las flechas indican la dirección centrípeta del flujo subterráneo y el incremento de la salinidad.

MODELO DE SALINAS GRANDES (MINERA DAJIN):



Modelo hidrológico para la cuenca de Salinas Grandes – Guayatayoc. (**Fuente:** Minera Dajin).

Las capas rojas son los depósitos de sales; las salmueras ("brine") saturan los acuíferos representados en amarillo.

6. EXPLOTACIÓN DEL LITIO

6.1. Fuentes de Litio en la naturaleza

Las potenciales fuentes de Litio en la corteza terrestre provienen de rocas denominadas pegmatitas, de salmueras continentales, salmueras geotermales, salmueras de yacimientos petrolíferos, y arcillas sedimentarias (hectorita).

Los yacimientos de Litio en la zona de estudio son **salmueras continentales,** por lo que sólo se explicará brevemente la génesis de dichos depósitos.

A partir de la evaporación solar de cuerpos de agua restringidos se generan soluciones -con contenidos elevados variables de sales de Litio, Sodio, Potasio, Calcio, entre otros elementos- denominadas salmueras. Dichas salmueras son contenidas en salares y lagunas salinas, y también *se* acumulan en los materiales porosos y permeables del subsuelo y de los laterales de dichos cuerpos, es decir en los acuíferos.

6.2. Métodos de explotación

Sobre la base de la información recopilada y los datos disponibles de las empresas mineras presentes en la zona, se interpreta que el litio se encuentra en solución como Cloruro de Litio (LiCl) en las salmueras de los salares de la Puna.

El método de extracción del LiCI, según la información publicada por las empresas presentes en la zona (Orocobre y Lithium Americas), será por bombeo de las salmueras de los acuíferos profundos, obteniendo como resultado final un precipitado de Carbonato de Litio. La minera Lithium Americas (LAC) manifiesta que la extracción de la salmuera será desde los 20 m. hasta los 250 m de profundidad como mínimo, pudiendo aumentar la profundidad de explotación a medida que se realicen más pozos exploratorios.

6.2.1. Necesidad de agua dulce

Según las estimaciones realizadas por la minera LAC, para la producción de 40.000 toneladas anuales de carbonato de litio será necesaria la utilización de 1.124.000 m3 de agua dulce. Este volumen contempla solamente el agua requerida para la planta de obtención de Carbonato de Litio, así como también para los estanques (ver más adelante).

6.2.2. Proceso de obtención del carbonato de litio

Sobre la base de los datos disponibles de las mineras en la zona de estudio, a continuación se describe el proceso de obtención del Carbonato de Litio.

6.2.2.1. Lithium Americas

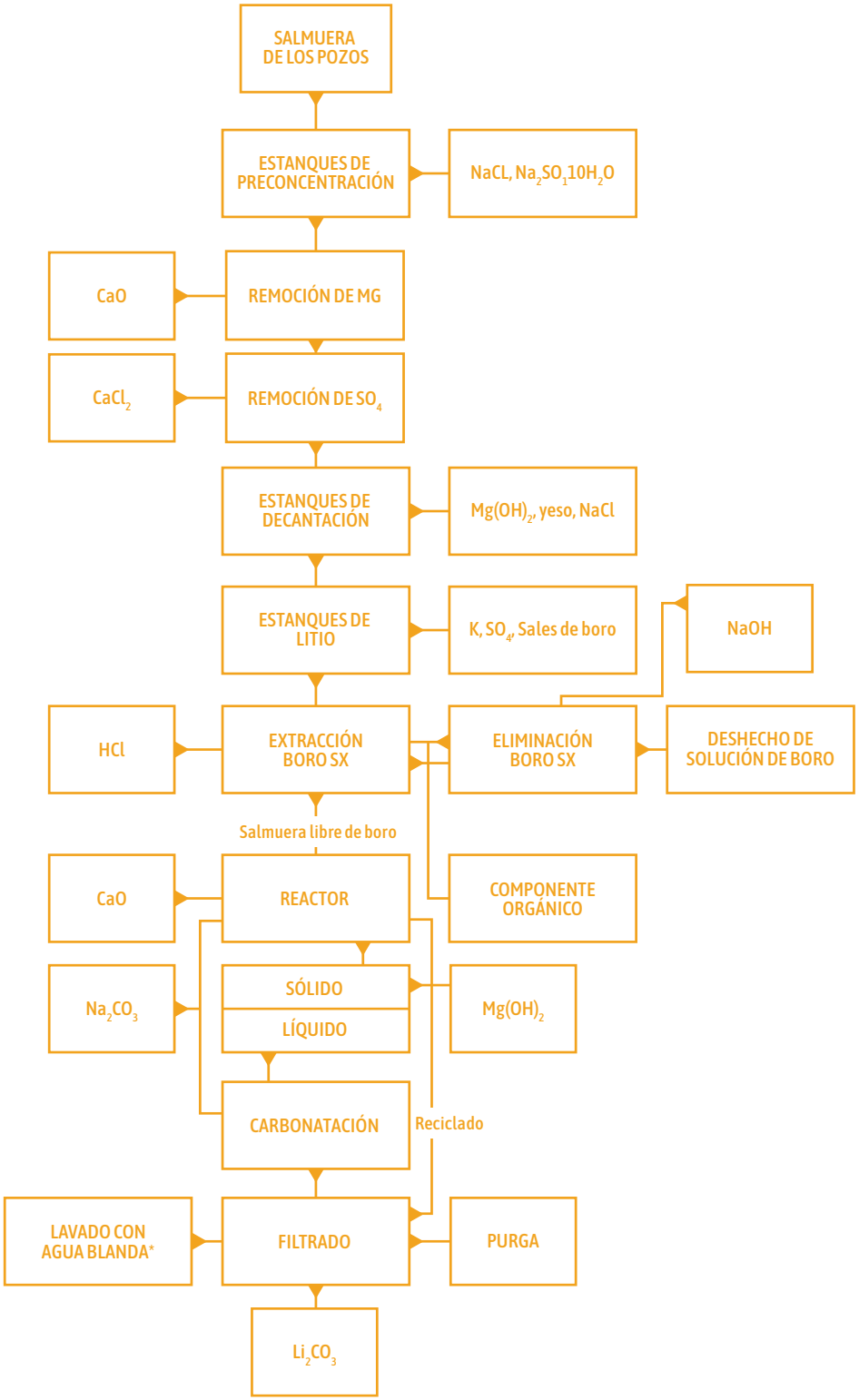
A partir de diferentes pozos realizados a lo largo de la cuenca, se extraerá la salmuera (agua más elementos de interés disueltos, entre ellos el litio) y se lo pre-concentrará en estanques al aire libre durante 160 a 180 días (Figura 6.1). En esta etapa precipitarán sales de sodio [halita o cloruro de sodio (NaCl)] y, debido a las bajas temperaturas, sulfatos de sodio [glaubersalt ($Na2SO4 \times 10H^2 0$). De esta manera será removido el 70% de los sulfatos presentes en la salmuera.

La salmuera pre-concentrada será tratada químicamente con soluciones de calcio para remover el magnesio (Mg) y el sulfato (SO4) residual.

El Mg será separado de la solución agregando cal (CaO, óxido de calcio), obteniéndose un precipitado insoluble (Mg (OH)2, hidróxido de magnesio) que posteriormente será decantado y acumulado en contenedores. El excedente de calcio de esta reacción, en conjunto con el sulfato (SO4) propio de la salmuera, formará sulfato de calcio [yeso ($CaSO4 . 2H2O$)], el cual también será separado del líquido. Durante este proceso algo del boro en solución reaccionará con el calcio liberado.

La adición de cloruro de calcio (CaCl2) también hará precipitar otros sulfatos, como sulfato de calcio [yeso (CaSO4·2H2O)].

FIGURA 6.1: DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE CARBONATO DE LITIO.



(*: Este "agua blanda" es parte del agua dulce que se usa en el proceso.)
Fuente: Preliminary Assessment and Economic Evaluation of the Cauchari-Olaroz Lithium Project, Jujuy Province, Argentina.

La salmuera residual será transportada a estanques más pequeños, denominados estanques de Litio, donde precipitarán cloruro de potasio, sulfatos y boratos.

Para la remoción del boro se utiliza un método de extracción por solvente (SX); se usará un extractante específico junto con un diluyente adecuado. Antes de la extracción líquido-líquido, la salmuera será acidificada con ácido clorhídrico y alcanzará un pH de entre 3 y 4. Una vez que la salmuera se encuentre libre de Boro, se neutralizará con el "licor madre" de Carbonato de Litio o con una solución de Carbonato de Sodio.

La extracción del Boro de la fase orgánica será realizada en una solución alcalina con un pH entre 10 y 11, mediante el agregado de Hidróxido de Sodio (NaOH). El Boro extraído mediante estos procesos será desechado.

Removidos estos elementos, se tratará la solución con cal y Carbonato de Sodio a una temperatura de 60°C para eliminar cualquier impureza de Magnesio (Mg) y Calcio (Ca) que pueda haber en solución, filtrándose el lodo residual.

La salmuera purificada, con 1% de Litio disuelto como Cloruro de Litio, será enviada a tres reactores en serie donde se adicionará Carbonato de Sodio a temperaturas entre 80 y 83°C, generando la precipitación del Carbonato de Litio. El lodo contenedor del producto precipitado será separado de la salmuera residual por filtrado y lavado con agua blanda (ver * arriba). Finalmente el producto se secará, clasificará, y será embalado para su comercialización.

6.2.2.2. Orocobre

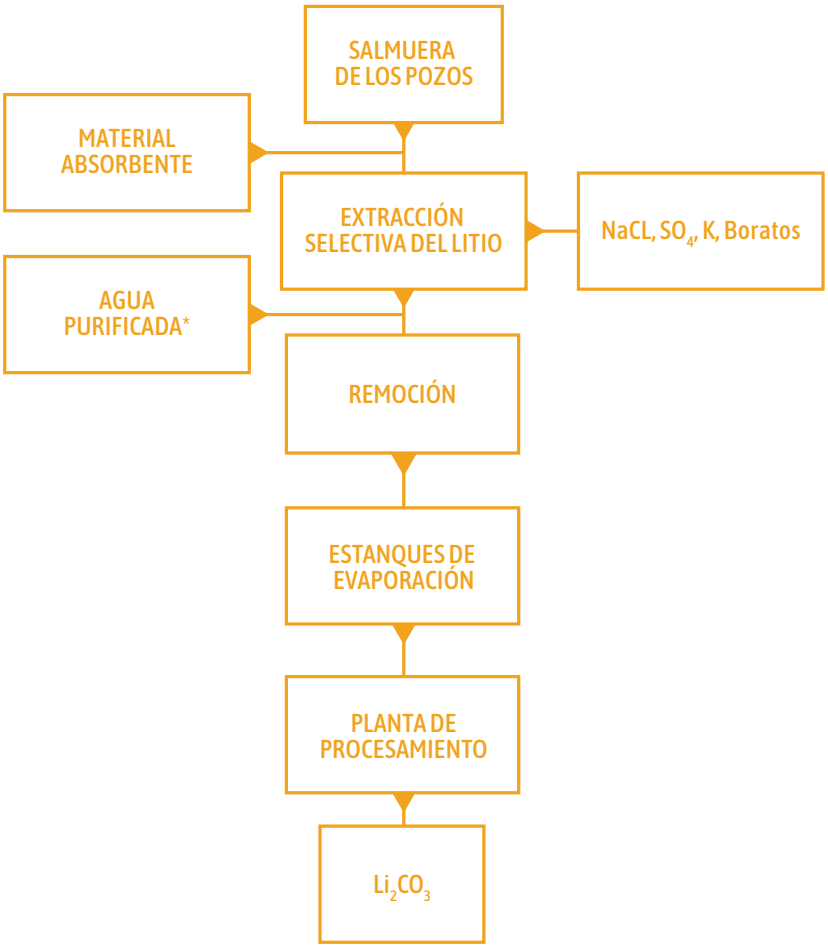
El proceso para la obtención de carbonato de litio será similar al propuesto por la empresa Lithium Americas, con la excepción del método a utilizar para la eliminación del boro en solución.

Dicha empresa no describe el método, aunque aclara que todavía es un tema en investigación. Además de la obtención de carbonato de Litio, pueden ser recuperados otros tipos de sales y compuestos con cierto potencial económico, como cloruro de potasio y sulfato de sodio, entre otros.

6.2.2.3. Otras explotaciones del litio en Argentina

Otros salares de la Argentina también poseen concentraciones de Litio importantes para su recuperación, como es el caso de los salares en los que cuenta con emprendimientos FMC-Minera del Altiplano S.A. Esta empresa tiene su explotación en el salar del Hombre Muerto, provincia de Catamarca. La salmuera extraída de 6 pozos, saturada de cloruro de sodio, porta además litio, potasio, sulfatos, boratos y otros componentes menores (Figura 6.2). En el proceso desarrollado por esta minera, el litio es extraído selectivamente de la salmuera durante el bombeo, usando un material absorbente adecuado en lugar de mantenerlo en solución durante el proceso de evaporación solar. Posteriormente, el litio es removido con agua purificada (parte del agua dulce que se utiliza en el proceso, similar al agua blanda, ver * arriba) y esta salmuera es concentrada por evaporación solar hasta alcanzar 30.000 o 60.000 ppm (partes por millón; o miligramo por litro, mg/L) de litio antes de su procesamiento en la planta química (fuente: Revista Panorama Minero, 1996, 2002).

FIGURA 6.2: DIAGRAMA DE FLUJO INTERPRETADO, PARA EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE CARBONATO DE LITIO EN EL SALAR DEL HOMBRE MUERTO (**Fuente:** Revista Panorama Minero, 1996, 2002).

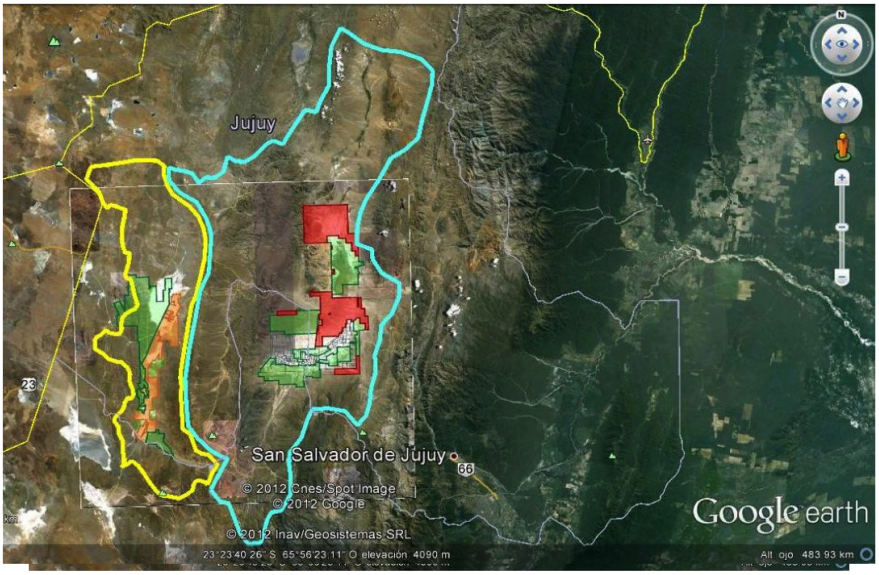


(*: Este "agua purificada" es parte del agua dulce que se usa en el proceso.)

6.3. Áreas concesionadas

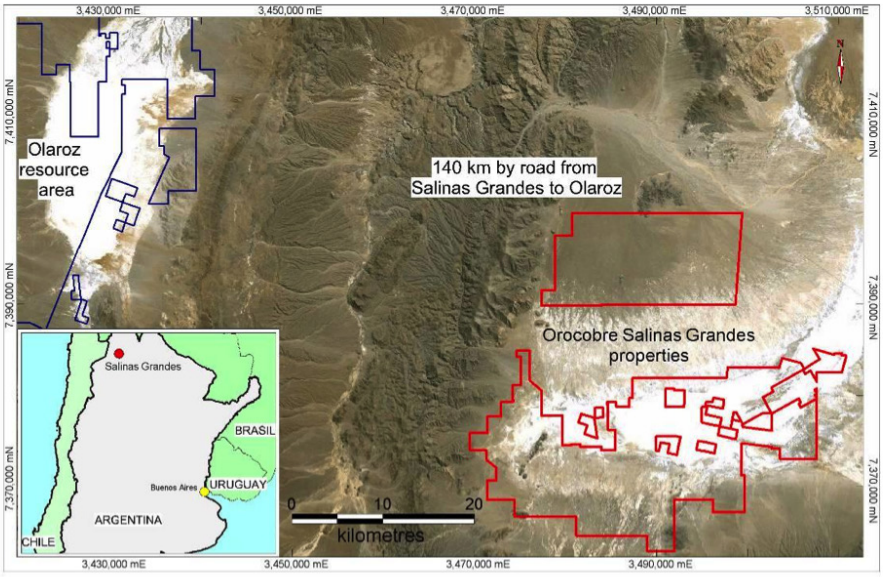
En los siguientes mapas e imágenes satelitales se observan las áreas concesionadas (hasta enero de 2012 según "el estudio regional general de los recursos hídricos y su eventual impacto por explotación minera de litio y sustancias relacionadas, en dos zonas de la puna jujeña y salteña", realizado en 2012 por lo hidrogeólogos Marcelo Sticco y Gabriel Meconi) a tres diferentes empresas en la zona de la cuenca estudiada, para la exploración/explotación de Litio y elementos relacionados.

CONCESIONES PARA LA EXPLORACIÓN/EXPLOTACIÓN DE LITIO
VERDE: OROCOBRE; NARANJA: LITHIUM AMERICAS; ROJO: DAJIN RESOURCES



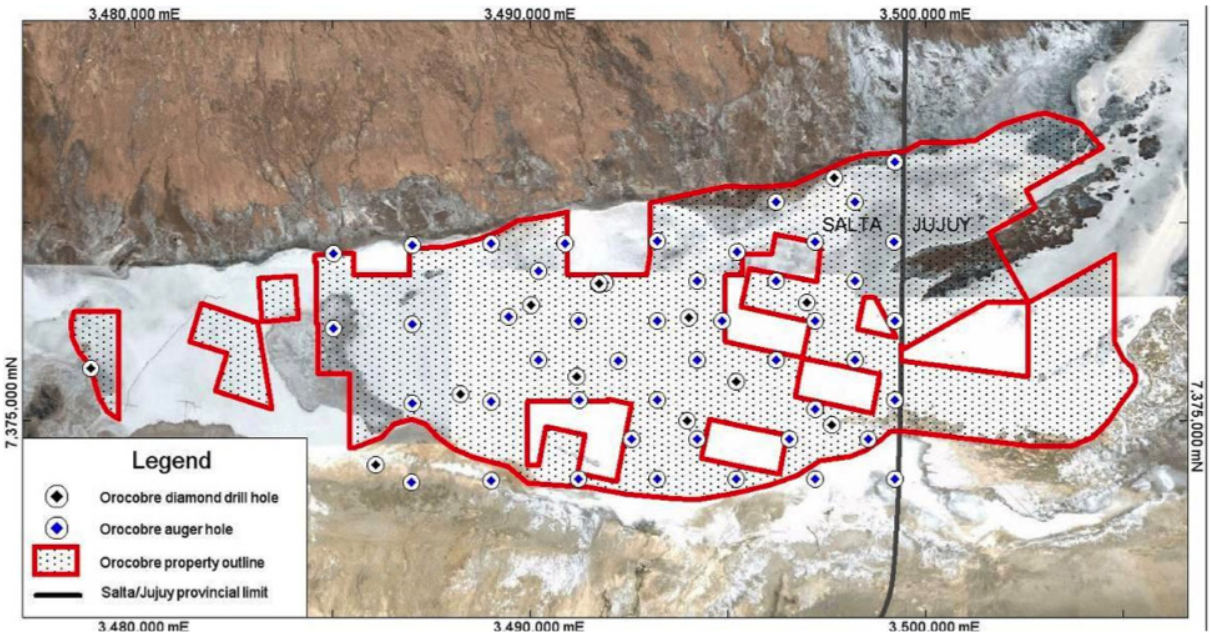
Fuente: Dajin.

PARTE DE LAS CONCESIONES DE OROCOBRE PARA LA EXPLORACIÓN/EXPLOTACIÓN DE LITIO EN SALINAS GRANDES



Fuente: Orocobre.

DETALLE DE LA IMAGEN SATELITAL ANTERIOR



Fuente: Orocobre.

6.4. Volúmenes de agua

Según los procesos descritos anteriormente, y teniendo en cuenta las simulaciones realizadas por la empresa Lithium Americas (LAC), para una producción anual de 40.000 toneladas de Carbonato de Litio se concluyó que serán necesarios:

- 26.124.000 m^3de salmuera por año
- 1.124.000 m^3 de agua dulce por año

De este volumen de agua dulce serán utilizados:

- 784.000 m^3 para los estanques
- 340.000 m^3 para la planta de Carbonato de Litio

6.5. Proyectos actuales y perspectivas

De acuerdo con el informe especial sobre el mercado de litio realizado por la Dirección de Economía Minera de la Nación en marzo de 2017, los principales proyectos argentinos de litio en salares, en etapas iniciales y avanzadas, son los que siguen:

TABLA 2: PRINCIPALES PROYECTOS ARGENTINOS EN ETAPAS AVANZADAS - SALARES

PROYECTO	NOMBRE DEL SALAR	EMPRESA	METALES	PROVINCIA	ESTADO
Salar de Olaroz	Salar de Olaroz	Orocobre S.A., Toyota tsusho, Jemse	Litio Potasio	Jujuy	Operación
Mina Fénix	Salar del Hombre Muerto	FMC LithiumCorporation	Litio	Catamarca	Operación
Salar del Rincón	Salar del Rincón	ENIRGI GroupCorporation	Litio Potasio	Salta	Operación parcial/ Planta Piloto
Caucharí-Olaroz	Salar de Caucharí	LithiumAmericas+JEMSE+SQM	Litio Potasio	Jujuy	Construcción
Pozuelos	Salar Pozuelos	POSCO + Lithea	Litio	Salta	Construcción Planta Piloto
Sal de Vida	Salar del Hombre Muerto	Galaxy ResourcesLimited	Litio Potasio	Catamarca	Factibilidad
Sal de Los Ángeles	Salar de Diablillos	Lithium-X Energy Corp.(80%) - Aberdeen International Inc. (20%)	Litio Potasio	Salta	PEA (Análisis económico preliminar)
Cauchari	Salar de Caucharí	AdvantageLithium (50-75%)+OrocobreLimited	Litio Potasio	Jujuy	Exp. Avanzada
Salar de Centenario Ratones	Salar de Ratones	Eramet	Litio	Salta	Exp. Avanzada
Mariana I, II, III	Salar Llullaillaco	International Lithium JV con Jiangxi Ganfeng Lithium Co. Ltd	Litio	Salta	Exp. Avanzada
Centenario	Salar Centenario	LithiumPower International	Litio Potasio	Salta	Exp. Avanzada
Gallego Project	Salar del Hombre Muerto	EverlightResources	Litio	Salta	Exp. Avanzada
Antofalla	Salar de Antofalla	Advantage +Albemarle+Bolland International	Litio Potasio	Catamarca	Exp. Avanzada

TABLA 3: PRINCIPALES PROYECTOS ARGENTINOS EN ETAPAS INICIALES - SALARES

PROYECTO	NOMBRE DEL SALAR	EMPRESA	METALES	PROVINCIA	ESTADO
Guayatoyoc	Laguna Guayatayoc	AdvantageLithium	Litio Potasio Boro	Jujuy	Exploración
Guadalquivir	Salar Rio Grande	CascaderoCopper Corp.	Litio	Salta	Exploración
Stella Maris	Salinas Grandes	AdvantageLithium	Litio	Salta	Exploración
Salinas Grandes	Salar de Salinas Grandes	Orocobre (85%)	Litio Potasio	Salta	Exploración
Proyecto Arizaro	Salar de Arizaro	PepinNiniMinerals Ltd.	Litio	Salta	Exploración
Salar de Arizaro	Salar de Arizaro	Grosso Group	Litio	Salta	Exploración
Salar de Arizaro 2	Salar de Arizaro	Lithium X	Litio	Salta	Exploración
Mina Teresa	Salinas Grandes	ArgosyMinneralsLtd + Ekeko	Litio Potasio	Jujuy	Exploración Inicial
Cangrejillos	Salinas Grandes	OrocobreLimited JV Toyota TsushoCorp	Litio Potasio	Jujuy	Exploración Inicial
Pocitos	Salar de Pocitos	LithiumAmericasCorp+SQM	Litio Potasio	Salta	Exploración Inicial

Salar de Incahuasi	Salar de Incahuasi	AdvantageLithium	Litio Potasio	Salta	Exploración Inicial
Arizaro	Salar de Arizaro	LithiumAmericasCorp+SQM	Litio Potasio	Salta	Exploración Inicial
San José	Salinas Grandes	DAJIN RESOURCES CORP./ Delta Mutual Inc	Litio Potasio Boro	Jujuy	Prospección
Navidad	Salinas Grandes	DAJIN RESOURCES CORP./ Delta Mutual Inc	Litio Potasio Boro	Jujuy	Prospección
Rio Grande	Salar Rio Grande	LithiumExplorationGroupInc	Litio Potasio	Salta	Prospección
Salar de Pular	Salar de Pular	PepinNiniMineralsLtd	Litio Potasio	Salta	Prospección
Pastos Grandes	Salar de Pastos Grandes	MillennialLithium	Litio Potasio	Salta	Prospección
Cauchari Sur	Salar de Caucharí	Alba Minerals Ltd.	Litio	Salta	Prospección
Cruz	Salar de Pocitos	Minera Pastos Grandes S.A+SouthernLithium	Litio	Salta	Prospección
Salar de ArizaroBrine	Salar de Arizaro	Ultra LithiumInc.+Jinshan Minera Argentina S.A.	Litio	Salta	Prospección
Tolillar	Salar Tolillar	TrendixMining SRL	Litio Potasio	Salta	Prospección
Salar de Pocitos	Salar de Pocitos	PureEnergyMinerals Ltd.	Litio	Salta	Prospección
Tres Quebradas (3Q)	Laguna Tres Quebradas	Neo Lithium Ltd. + POCML 3 inc.	Litio Potasio	Catamarca	Prospección
La Mula	Laguna Mulas Muertas	TransPacificMineralsCorp	Litio	La Rioja	Prospección
Carachi – Pampa	Salar Carachi-Pamapa	NRG Metals Inc.	Litio Potasio	Catamarca	Prospección
Rio Grande	Salar de Rio Grande	LSC LithiumCorporation	Litio Potasio	Salta	Prospección
Pastos Grandes	Salar de Pastos Grandes	LSC LithiumCorporation	Litio Potasio	Salta	Prospección
Salinas Grandes	Salar de Salinas Grandes	LSC Lithium Corporation + Dajin Resources Corp.	Litio Potasio	Salta-Jujuy	Prospección
Jama	Salar de Jama	LSC LithiumCorporation	Litio Potasio	Jujuy	Prospección

Se observan remarcados los principales proyectos de litio hasta marzo de 2017 en Salinas Grandes.

Fuente: Dirección de Economía Minera de la Nación.

7. CONSIDERACIONES SOBRE EL REPORTE TÉCNICO EN SALINAS GRANDES Y LAGUNA GUAYATAYOC

En este capítulo se hace énfasis en el análisis del reporte técnico del proyecto Salinas Grandes de la Minera Orocobre LTD *(TECHNICAL REPORT ON THE SALINAS GRANDES LITHIUM PROJECT. SALTA PROVINCE, ARGENTINA. REPORT FOR NI 43-101 PREPARED FOR OROCOBRE LTD. Effective: 16th April, 2012. Amended: 12th August 2013)*, con foco en el agua subterránea.

En la página 12 del reporte de Orocobre se hace la siguiente descripción: "Las entradas de agua en el salar incluyen precipitación, la escorrentía proveniente del sector cordillerano circundante y entradas de aguas subterráneas".

En la página 33 se hace referencia al abanico aluvial ubicado al norte del salar y su relación con el agua subterránea: "El gran área del abanico y la superficie arenosa sugieren que esta área es una fuente importante de entrada del flujo de agua subterránea poco profunda al salar".

La siguiente figura, extraída del reporte, representa un perfil de resistividad del salar Salinas Grandes. En este estudio se puede observar claramente el agua subterránea de baja salinidad (dulce) proveniente de los alrededores y su conexión directa con el salar.

FIGURA 7.1. PERFIL DE RESISTIVIDAD DE SALINAS GRANDES.

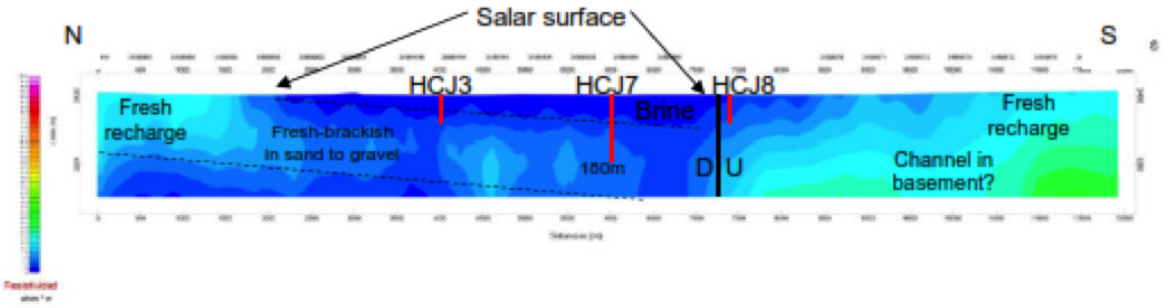


Figure 9.6 Resistivity profile for Salinas Grande
(See Figure 6.6 for location), with interpreted geological and hydrogeological features. Hole names have been shortened to fit on the figure. Note the upper dark blue low resistivity zone corresponding to brine

8. CONSIDERACIONES FINALES Y RECOMENDACIONES

La calidad del recurso hídrico subterráneo se evaluó según la potencial salinización de aguas dulces a causa de la explotación minera del Litio y compuestos asociados. El modelo hidrogeológico planteado indica que los sectores que se hallan en los bordes de las cuencas, coincidentes con las geoformas denominadas abanicos aluviales, poseerían alta permeabilidad y son terrenos con potenciales acuíferos que almacenarían aguas de baja salinidad.

La explotación de salmuera (agua subterránea de alta salinidad con gran concentración de las sales de interés minero) en los acuíferos con altas concentraciones de Litio y compuestos relacionados ubicados en las zonas centrales de las cuencas (es decir, en los salares, salinas y lagunas), aceleraría el flujo centrípeto de agua subterránea al incrementar los gradientes o las pendientes de las superficies hidráulicas. En esta suposición se considera que el sistema subterráneo está conformado por múltiples acuíferos con distintos comportamientos (libres, confinados, semi-confinados) pero conectados hidráulicamente en forma potencial; o sea, sería un sistema multiacuífero. Es decir que se generaría un desplazamiento artificial del agua subterránea dulce o de baja salinidad con mayores velocidades a las actuales, desde los bordes de las cuencas hacia sus centros. Este proceso provocaría que las aguas con baja salinidad de los bordes atraviesen estratos del subsuelo con altas concentraciones salinas en los sectores centrales y de este modo el agua tomaría contacto con estas sales, que se disolverían en la masa de agua produciendo el aumento de los tenores salinos en el agua subterránea a partir

de este desequilibrio dinámico. Lo señalado anteriormente, a su vez, sería relativamente compensado por la extracción de agua dulce de los sectores de borde de cuenca, es decir de los abanicos aluviales, ya que para el proceso de elaboración de carbonato de litio se utiliza agua dulce.

Los dos ítems anteriores implicarían desequilibrios en la hidrodinámica subterránea natural debido tanto a la explotación de las salmueras del centro de las cuencas como del agua dulce de los bordes. Estos desequilibrios, muy complejos de evaluar, tendrían como consecuencia la inestabilidad de la interfase agua salada–agua dulce en el sistema subterráneo. Explícitamente, una de las empresas mineras menciona en los informes a los que se ha tenido acceso que deben determinar con mayor precisión la posición de esta interfase *(King M., 2010: Measured, Indicated and Inferred Resource Estimation of Lithium and Potassium at The Cauchari and Olaroz Salars, Jujuy Province, Argentina: LAC)*, dato crítico para monitorear la evolución del sistema hídrico subterráneo durante la futura fase de explotación minera.

Recomendaciones:

Los estudios hidrogeológicos detallados que deberían encararse en el futuro, necesarios para reducir la incertidumbre y afinar, confirmar o descartar los escenarios hipotéticos aquí planteados, así como también para brindar mayores precisiones, deberían contener como mínimo, entre otros posibles, los siguientes puntos:

- Identificación de las zonas con aguas de baja salinidad (agua dulce, agua salobre).
- Determinación y mapeo de la interfase agua dulce – agua salada.
- Cálculo de las reservas de aguas de baja salinidad.
- Cálculo detallado del balance hídrico, con énfasis en los procesos subterráneos.
- Identificación de otros potenciales usos de los recursos hídricos, además de la explotación minera.
- Definición de los volúmenes reales de explotación de agua subterránea, tanto de la salmuera para la extracción de Litio y compuestos asociados, como del agua dulce para el proceso de producción del carbonato de litio.
- Elaboración de un modelo matemático hidrogeológico ajustado a las condiciones reales del sistema multiacuífero.
- Diseño de una red de monitoreo del agua subterránea y del plan de monitoreo correspondiente.
- Consideración de todos los estudios dentro de los paradigmas de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH; IWRM según sus siglas en inglés), que incluye la Gestión Integrada de Cuencas.
- Consideración, en coincidencia y complementación con el ítem anterior, de que los salares, salinas y lagunas que incluyen estas cuencas son humedales según la acepción amplia de este concepto, por lo que deberían tenerse en cuenta metodologías de trabajo de los aspectos hidrogeológicos e hidrológicos generales antes planteados, junto con otros aspectos, como los ecológicos, fundamentales en el ámbito de los humedales, lo que hace necesarioun trabajo interdisciplinario de mayor envergadura.

9. BASE DE DATOS DE FUENTES, ORGANISMOS, INSTITUCIONES E INFORMANTES CONSULTADOS

La tabla presenta los resultados obtenidos de la búsqueda de información en los organismos correspondientes.

Fuentes de información privada (Empresas mineras):

Nº	Empresa	Título del documento
1	Minera Dajin Resources	Informe de Impacto Ambiental para la etapa de Exploración para las Minas Borita Expte. N°1.276-G-2.009, Borita I Expte. N°1.275-G-2.009 y Borita II Expte. N° 1.277-G-2.009
2	Minera Dajin Resources	Informe de Impacto Ambiental para la etapa de Prospección CATEOS 1.269-J-2.009 y 1.266-J-2.009
3	Minera Lithium Americas Corp. (LAC)	Measured, indicated and inferred resource estimation of Lithium and Potassium at the Cauchari and Olaroz salars, Jujuy province, Argentina – 6 Diciembre 2010
4	Minera Lithium Americas Corp. (LAC)	Informe NI 43 - 101 Technical Report - Preliminary Assessment and Economic Evaluation of the Cauchari-Olaroz Lithium Project, Jujuy Province, Argentina – 30 Abril 2011
5	Minera Orocobre	Informe NI 43 - 101 Technical Report On The Salinas Grandes-Guayatayoc Project Jujuy-Salta Provinces, Argentina- 30 Abril 2011
6	Minera Orocobre	Informe NI 43 - 101 Technical Report On The Olaroz Project Jujuy Province, Argentina - 30 Abril 2011
7	Minera Orocobre	Informe NI 43 - 101 Technical Report On The Cauchari Project Jujuy Province, Argentina - 30 Abril 2011
8	Minera Orocobre	Informe de Impacto Ambiental para la etapa de Exploración para las Mina Daniela I - Expte.N° 1132-S-2.009
9	Minera Orocobre	Informe NI 43 - 101 Technical Report On The Salar de Olaroz Lithium-Potash Project Jujuy Province, Argentina – 13 Mayo 2011
10	Minera Lithium Americas Corp. (LAC)	Technical Report on the Cauchari Lithium Project, Jujuy Province, Argentina – 22 Diciembre 2016
11	Minera Lithium Americas Corp. (LAC)	Informe NI 43 - 101 Technical Report. Reserve Estimation and Lithium Carbonate Production at the Cauchari-Olaroz Salars, Jujuy Province, Argentina – 11 Mayo 2017
12	Minera Orocobre	ASX / TSX Announcement – Updated Cauchari resource estimate – 24 Mayo 2018
13	Minera Lithium Americas Corp. (LAC)	Technical Report Lithium and Potassium Resources at Cauchari Project, Jujuy Province, Argentina – 27 Junio 2018

Fuentes de información general:

Nº	Fuente / Organismo	Título del documento
1	IX Congreso Geológico Argentino; San Carlos de Bariloche. (1984)	Origen y evolución morfológica de las cuencas evaporíticas cuartáricas de la Puna Argentina (Igarzábal, A.P.)
2	IX Congreso Geológico Argentino, San Carlos de Bariloche. (1984)	Puna Austral - Bases para el subprovincialismo geológico de la Puna Argentina. (Alonso, R., Gutiérrez, R. y Viramonte, J., 1984.Actas 1: 43-63.)
3	XIV Congreso Geológico Argentino, Salta (1999)	La cuenca ordovícica de la Puna. Bahlburg, H. et al. (tomo I: 185-187.).
4	XIX Congreso Geológico Boliviano, Tarija 2010	Las provincias geológicas del noroeste de la argentina: su vinculación con las depresiones cuaternarias y los sistemas de avenamiento
5	IV Congreso Hidrogeológico Argentino. Río Cuarto, provincia de Córdoba. 2005	Manzano M (2005) Hidrología de los humedales dependientes del agua subterránea e implicancias ecológicas. Actas IV Congreso Hidrogeológico Argentino. Río Cuarto, provincia de Córdoba
6	Academia Nacional de Ciencias de Córdoba.	Puna. Geología Regional Argentina. (A. Leanza, Ed.), pp.91-116. Córdoba..(1972) Turner, J. C.
7	Acta Geológica Hispánica,	On the origin of La Puna Borates "Sobre el origen de los boratos de La Puna". v. 34 (1999), nº 2-3,p. 141-166
8	Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Bs. As.	Influencia de diferentes concentraciones de cloruro de sodio sobre la morfología y el contenido de nitrógeno de Anabaena sphaerica aislada de las Salinas Grandes de Jujuy (Argentina). 8º Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo., Buenos Aires (Argentina)., 25-30 (1978)
9	Boletín Geoindustrial; (6-7): p.35-36, (1997)	Perfiles litológicos de dos sondeos mecánicos en la cuenca del Río Miraflores, Jujuy, Argentina
10	Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental (Organización Panamericana de la Salud). Lima, , (2003) p.26 Ilus., mapas, tab	Gestión y manejo integrado de la cuenca del río Huasamayo y áreas de influencia. Grupo Huasamayo, Jujuy, Argentina
11	Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Bernal G, *et al.* (2011)	Impacto económico de las actividades mineras en la Provincia de Jujuy
12	Consejo Federal de Inversiones (CFI). Abdo C. (1982)	Estudio hidrológico de la subcuenca del río San Francisco, Provincia de Jujuy
13	Consejo Federal de Inversiones (CFI). Paoli H. (1980).	Cálculo y análisis de la demanda de agua, área: Arroyo Colorado, Provincia de Jujuy
14	Consejo Federal de Inversiones (CFI). Rosso Borelli ; R. (1983)	Estudio hidrológico de la subcuenca del río San Francisco, Prov. de Jujuy ; Estudio de reactivación de las estaciones hidrométricas San Juancito [Río Grande] ; Bajada de pinto [Río Lavayen] y procesamiento de la información de estaciones de aforos existentes en el ámbito de la subcuenca del Río San Francisco
15	Consejo Federal de Inversiones (CFI). (1979)	Desarrollo del área bajo riego del dique Las Maderas, Provincia de Jujuy
16	Consejo Federal de Inversiones (CFI). (1980)	Estudio para el desarrollo agropecuario del área de influencia dique Las Maderas y Río Grande, Provincia de Jujuy. Informe de riego
17	Consejo Federal de Inversiones (CFI). (2011)	Anteproyecto definitivo obra de desvío arroyo El Bajo a Río Grande en la ciudad de Palpalá, Provincia de Jujuy
18	Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Estudios geol., 45: 55-59 (1989). M. A. Bustillo y R. Alonso.	Nódulos opalinos en facies marginales del salar Olaroz (Puna Argentina)
19	Department of Chemical & Biomolecular Engineering - NC State University. Keith E. (2008)	An abundance of lithium.
20	Dirección Nacional de Geología y Minería.	Informe geológico: Hojas 5a, Paso Huaytiquina y 5b, Salar de Cauchari. Boletín 176, 70 p. Schwab, K. (1971)
21	Dirección Provincial de Minería y Recursos Energéticos	Composición de Salmueras de Salares de la Provincia de Jujuy
22	Dirección Provincial de Minería y Recursos Energéticos	Salares Puna jujeña, trabajo recopilatorio. (Menguzzi, E; 1984)
23	Dirección Provincial de Minería y Recursos Energéticos	Laguna Guayatayoc. Departamento Cochinoca y Tumbaya. Contribución al estudio de los yacimientos de boratos de la Argentina.
24	Dirección Provincial de Minería y Recursos Energéticos	Carta Fotogeológica, Plan NOA I, Mosaico 7- C1

25	Dirección Provincial de Minería y Recursos Energéticos	Carta Fotogeológica, Plan NOA I, Mosaico 7- C2
26	Dirección Provincial de Minería y Recursos Energéticos	Carta Geoquímica, Plan NOA I, Mosaico 7- C1
27	Dirección Provincial de Minería y Recursos Energéticos	Carta Geoquímica, Plan NOA I, Mosaico 7- B2
28	Dirección Provincial de Minería y Recursos Energéticos	Informe Final, Plan NOA I, Mosaico 7 –B1
29	Dirección Provincial de Minería y Recursos Energéticos	Informe Final, Plan NOA I, Mosaico 7 –B2
30	Dirección Provincial de Minería y Recursos Energéticos	Informe Final, Plan NOA I, Mosaico 7 –C1
31	Dirección Provincial de Minería y Recursos Energéticos	Informe Final, Plan NOA I, Mosaico 7 –C2
32	Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN). Ministerio de Agricultura y Ganadería (1951). Papadakis, J.	Posibilidades agrícolas de La Rioja, Catamarca, Tucumán, Salta, Jujuy, Corrientes, Santiago del Estero, Sudoeste de Buenos Aires, Sudeste de la Pampa y noreste de Río Negro
33	Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN). Oficina Meteorológica Argentina (1907). Reichert, F.	Los yacimientos de boratos y otros productos minerales explotables del territorio de Los Andes (Puna de Atacama)
34	Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN). Coira, B.; Quartino, B.J. (Director). (1973)..	Geología y petrología de la zona de Abra Pampa, Provincia de Jujuy
35	Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN). Domínguez, O; Groeber, P (Director). (1950).	Geoedafología en el Departamento de Yaví, Jujuy
36	Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN). Sosa Acosta, S.; Fernández Garrasino, C. (Director). (1987).	Contribuciones a la geología del sector de Abra Blanca- salinas grandes, Dpto. Abra Pampa, Pcia. de Jujuy
37	Fundación Cambio Democrático - Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo	"Plataformas de Diálogo para el Desarrollo Minero Responsable en la Argentina" (PDDMRA), ejecutado por la Fundación Cambio Democrático (FCD) con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) durante 2008 y 2009. G.Meconi es co-autor.
38	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Paoli H. (2002)	Recursos Hídricos de la Puna, Valles y Bolsones Áridos del Noroeste Argentino
39	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Paoli H. (2003)	Aprovechamiento de los recursos hídricos y tecnología de riego en el altiplano argentino
40	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Bianchi A, et al. (2005)	Base de datos mensuales de precipitaciones del Noroeste Argentino
41	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Paoli H, et al. (2010)	Cuenca "Cerrada de la Puna" Subcuenca "Cauchari - Olaroz"
42	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Paoli H, et al. (2010)	Cuenca "Cerrada de la Puna" Subcuenca: "Salinas Grandes - Guayatayoc"
43	Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO, Serie Correlación Geológica, 21:155-170 Alonso R. (2006)	Ambientes Evaporíticos Continentales de Argentina
44	Meridian International Research	The Trouble with Lithium. Implications of Future PHEV Production for Lithium Demand. 2007
45	Ministerio de Producción de la Provincia de Jujuy	Mapa e información Productiva de Jujuy
46	Ministerio de Producción de la Provincia de Jujuy	Datos de las precipitaciones de la Provincia de Jujuy
47	Ministerio de Producción de la Provincia de Jujuy	Hidrología de la Provincia de Jujuy
48	Revista de la Asociación Geológica Argentina (RAGA). v.62 n.2. (2007). Caffe, P.J., *et al.*	Estratigrafía y centros eruptivos de la región de Pairique, Puna jujeña
49	Revista de la Asociación Geológica Argentina (RAGA).	Evapofacies halítica en el Salar del Rincón, departamento Los Andes, Salta. v.64 n.3 (2009). Ovejero Toledo, A. *et al.*
50	Revista de la Asociación Geológica Argentina (RAGA)	Control tectónico de la red de drenaje de los Andes del norte argentino (Ricardo Mon, 2005)

51	Revista de la Asociación Geológica Argentina (RAGA).	1959. Estratigrafía del Cordón de Escaya y la Sierra de Rinconada, Jujuy. Asociación Geológica Argentina. Revista I (1):15-39 (1959). Turner, J. C.,
52	Revista Geográfica Académica	Using SRTM to quantify size parameters and spatial distribution of endorheic basins in southern South America. . v.2 n.2 (viii.2008) 5-13. Ralf Hesse.
53	Secretaria de Ambientes y Desarrollo Sustentable de la Nación	Estadística Hidrológica de la República Argentina: 1997, 2004
54	Secretaría de Minería de la Nación. Programa de Asistencia Técnica para el Desarrollo del Sector Minero Argentino (PASMA)	Provincia de Salta - Recursos Hídricos (Superficiales)
55	Secretaría de Minería de la Nación. Programa de Asistencia Técnica para el Desarrollo del Sector Minero Argentino (PASMA)	Provincia de Salta - Recursos Hídricos (Subterráneos)
56	Secretaría de Minería de la Nación. Programa de Asistencia Técnica para el Desarrollo del Sector Minero Argentino (PASMA)	Provincia de Jujuy - Recursos Hídricos
57	Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Informes - n. 23 (1926). Catalano, L	Geología económica de los yacimientos de boratos y materiales de las cuencas, Salar Cauchari, Puna de Atacama, territorio nacional de Los Andes
58	Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). X Congreso Geológico Argentino, tomo 1. pp. 161-164 (1987). Acevedo, O.	Origen extensional de la depresión Guayatayoc, Salinas Grandes, Salta y Jujuy, Argentina.
59	Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). 1999	Geología Argentina. Anales Nro.29. Caminos.1999.
60	Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Actas del XII Congreso Geológico Argentino, tomo 3. 55-64. (1993). Monaldi, C., et al.	Estructuras de crecimiento episódicos en el subsuelo de la laguna Guayatayoc.
61	Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)	Contribución al estudio de los yacimientos de borato de Argentina, Laguna Guayatayoc, Dptos. de Cochinoca y Tumbaya, Provincia de Jujuy
62	Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR)	Génesis del litio en los salares de la Puna Argentina.
63	Servicio Meteorológico Nacional	Anales hidrológicos / Servicio Meteorológico Nacional
64	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Red hidrológica nacional
65	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Resumen Anuario Hidrológico de la República Argentina Tomos I y II. Año 1997.
66	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Estudio hidrológico e hidrogeológico de la Cuenca del río San Francisco (Pcia. de Jujuy, Alta Cuenca del Río Bermejo).
67	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Recursos hídricos de la cuenca del Río San Francisco.
68	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Aprovechamiento de los ríos Perico y Grande, provincia de Jujuy: evaluación del proyecto.
69	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Aprovechamiento integral de los ríos Perico y Grande (Las Maderas),
70	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Agua subterránea en la región árida argentina: bases para una política de desarrollo.
71	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Recursos hídricos del Noroeste argentino: conclusiones y recomendaciones del proyecto.1982.
72	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Proyecto NOA Hídrico. 1972
73	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Características generales de la cuenca del río Grande.
74	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Cuenca del río Grande: estudio de la factibilidad técnica de su sistematización.
75	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Caracterización fisiográfica de cuencas mediante el uso de sistemas de información geográficos: cuenca del río Grande – Jujuy.
76	Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación	Balance hídrico superficial cuenca río Grande - San Francisco.
77	Schwab,k. y Lippolt,H.	K-Ar mineral ages and late Cenozoic history of the Salar Cauchari area (Argentine, Puna).
78	Universidad Católica de Salta	Recursos hídricos de la Puna salteña: documento informativo. 2008
79	Universidad Católica de Salta	Estudio geológico-económico del yacimiento de boratos Loma Blanca, Departamento de Susques (Jujuy). Tesis profesional. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. Inédita. CHAVEZ (I.), 1989.

80	Universidad de Chile; (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas , departamento de Geología)	Modelo hidrogeológico conceptual de las cuencas altiplánicas fronterizas Mucar y Sico, II Región de Antofagasta en Chile y en las Provincias de Salta y Susques, en Argentina. 2009
81	Universidad Nacional de La Plata (UNLP)	Planos de los yacimientos de boratos : Informe sobre los yacimientos de boratos en Jujuy y en el territorio de los Andes
82	Universidad Nacional de La Plata (UNLP)	Distribución de localidades hidrotermales de las provincias de Jujuy y Salta, República Argentina. 1986
83	Universidad Nacional de La Plata (UNLP)	Obras de derivación del Río Grande -Jujuy- : Parte A: Hidrología de la Cuenca. 1971
84	Universidad Nacional de Salta	Estudio geológico económico de las Minas de Ulexita Huberto, Ernesto, Lisandro y Mario, Salar de Olaroz, Departamento Susques, Provincia de Jujuy. 2006
85	Universidad Nacional de Salta	Estudio geológico y evapofacies del Salar Cauchari, departamento Susques, Jujuy. Universidad Nacional de Salta, Tesis Profesional. Inédito. 2005
86	Universidad Nacional de Salta. CONICET-SECYT	Exploración subterránea de un salar tipo de la Puna. (1989) Igarzábal, A.P