



Centro de Documentación e Información Bolivia

**Curso Internacional
Crisis, Energía e Impactos Ambientales
LITIO**

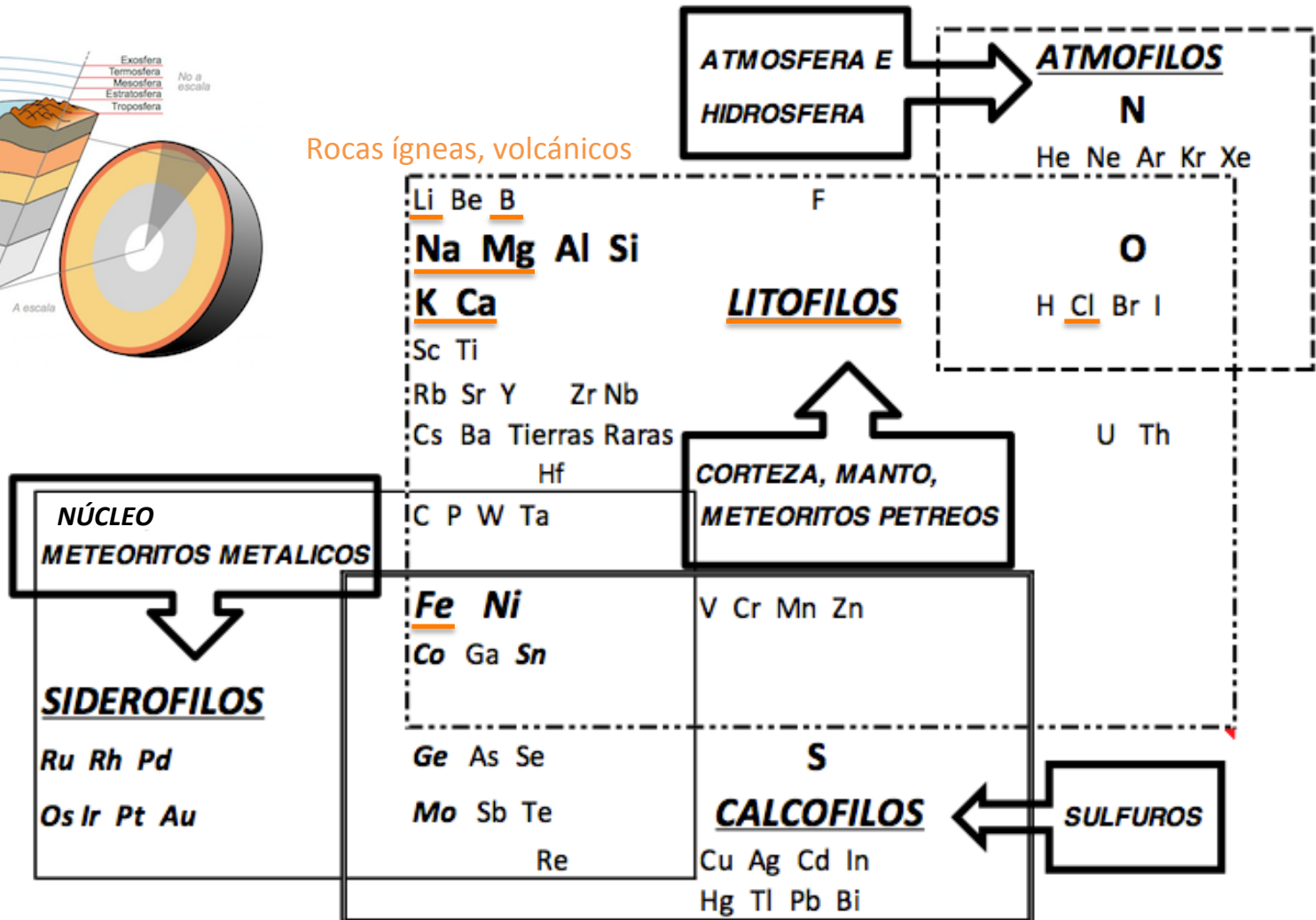
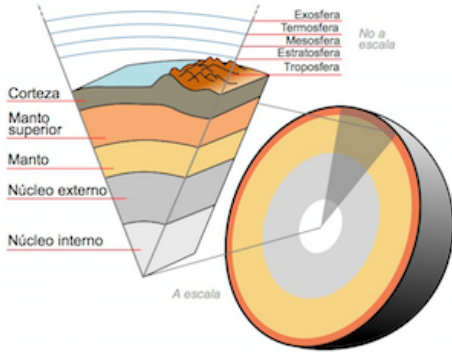
**GEOQUÍMICA Y RIESGOS AMBIENTALES
POR LA EXPLOTACIÓN DE SALARES**

**Sergio Gaviria Melo
Geoquímico, Doctor en Ciencias del Suelo
Corporación Geoambiental Terrae**



Febrero 2021

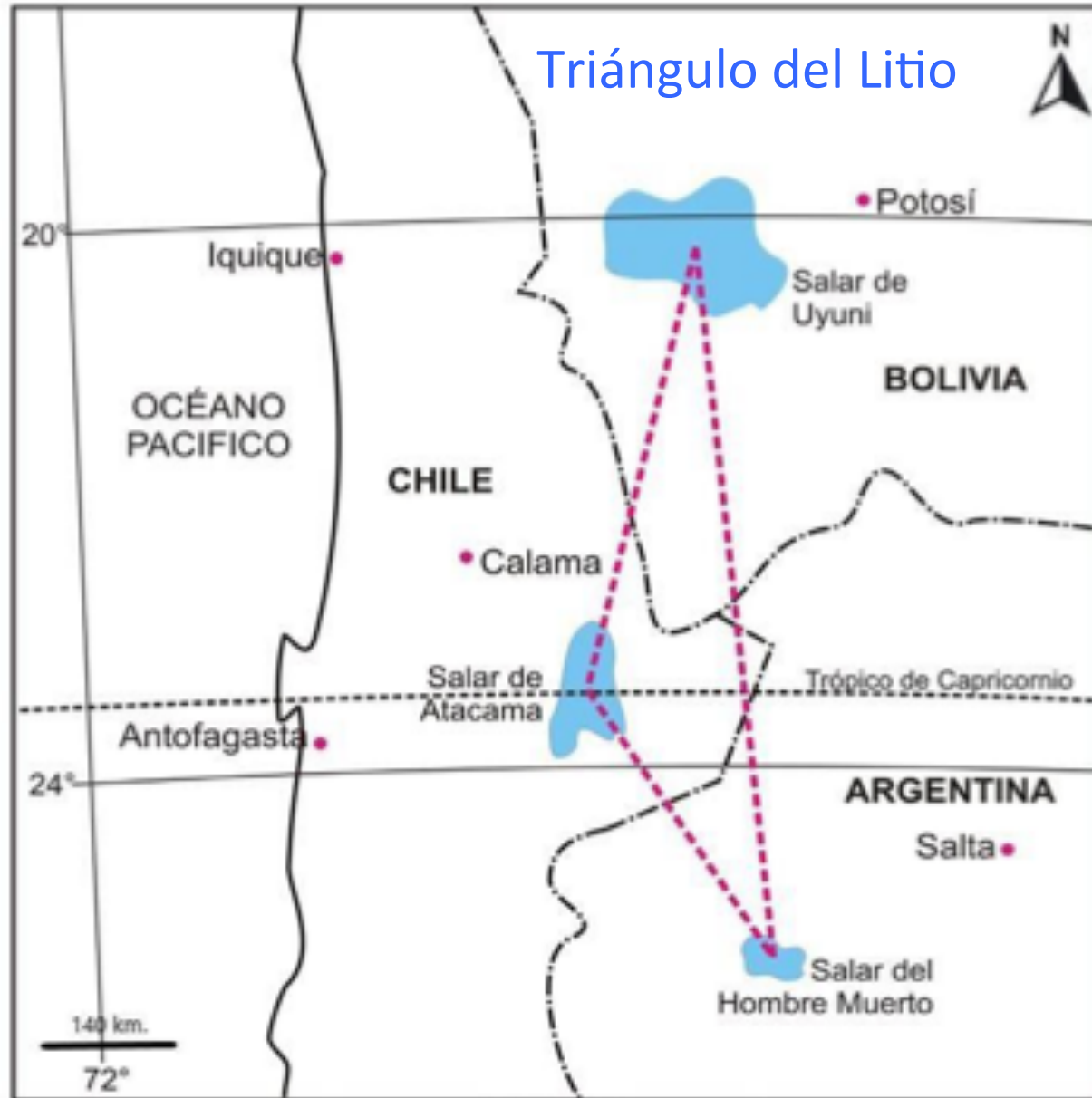
AFINIDAD GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS EN LA TIERRA



ABUNDANCIA DE LITIO EN ROCAS, SUELOS Y AGUAS

- En la **corteza continental superior** son bajas (**~20-30 ppm**), mayores en los granitos (**90 ppm**) que en rocas máficas (**~15 ppm**).
- En **suelos (<30 ppm)** y **sedimentos (<35 ppm)**.
- En **rocas sedimentarias de grano fino y lodos marinos**, son más altas (**~65 – 80 ppm**) por adsorberse en sitios de intercambio.
- En los **grandes ríos (~2 ppm)**, con excepción de aquellos ríos menores con aportes salinos o hidrotermales.
- En el **mar (~0,2 ppm)** son muy bajas !!!
- Las máximas concentraciones (**~200 – 4000 ppm**) están en ciertas **salmueras de salares vinculados con manifestaciones volcánicas**.

LAS SALMUERAS DE LITIO EN LOS ANDES CENTRALES



El **80%** de las salmueras con litio del planeta están en el Triángulo entre Argentina, Bolivia, Chile y el sur del Perú. Las salmueras mineralizadas se presentan en las facies superficiales de los salares y también en acuíferos profundos.

(Alonso, 2017)

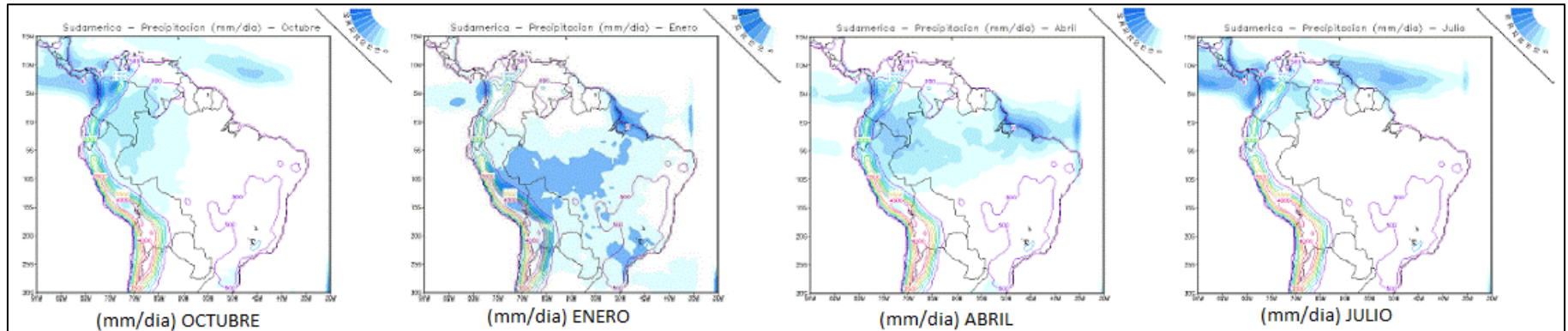
LAS SALMUERAS DE LITIO EN LOS ANDES CENTRALES

La **evolución geológica y ambiental** de los Andes Centrales ha sido responsable de la ocurrencia de una **región evaporítica** de clase mundial, donde ocurren concentraciones anómalas de **cloruros, sulfatos, boratos** y salmueras de metales alcalinos y alcalino-térreos entre ellos el **litio**. La mineralización ocurre en cuencas cerradas muy áridas, llamadas **endorréicas**.

La presencia de litio en solución está asociada a **manifestaciones volcánicas** en la cuenca, a la **meteorización** de rocas que produce minerales arcillosos ricos en litio y a contribuciones **hidrotermales** ligadas a fallas activas.

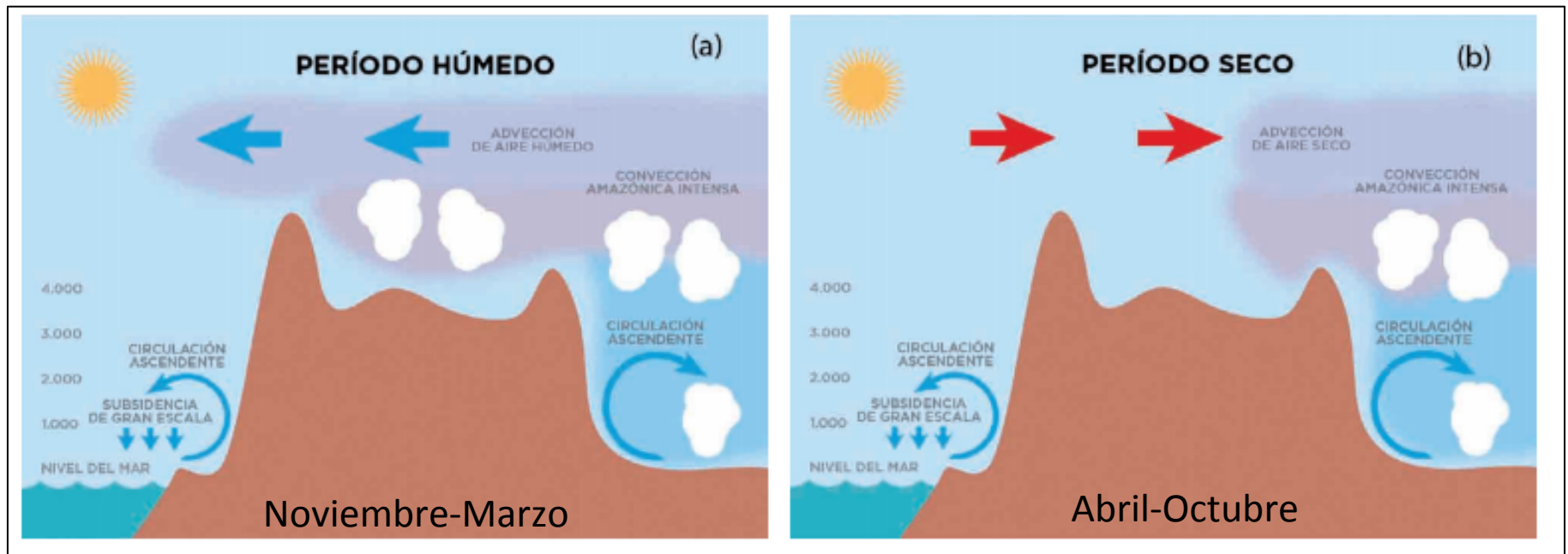
(Alonso, 2017)

MARCO HIDROCLIMATOLÓGICO REGIONAL



Migración de las precipitaciones por desplazamiento de la ZCIT

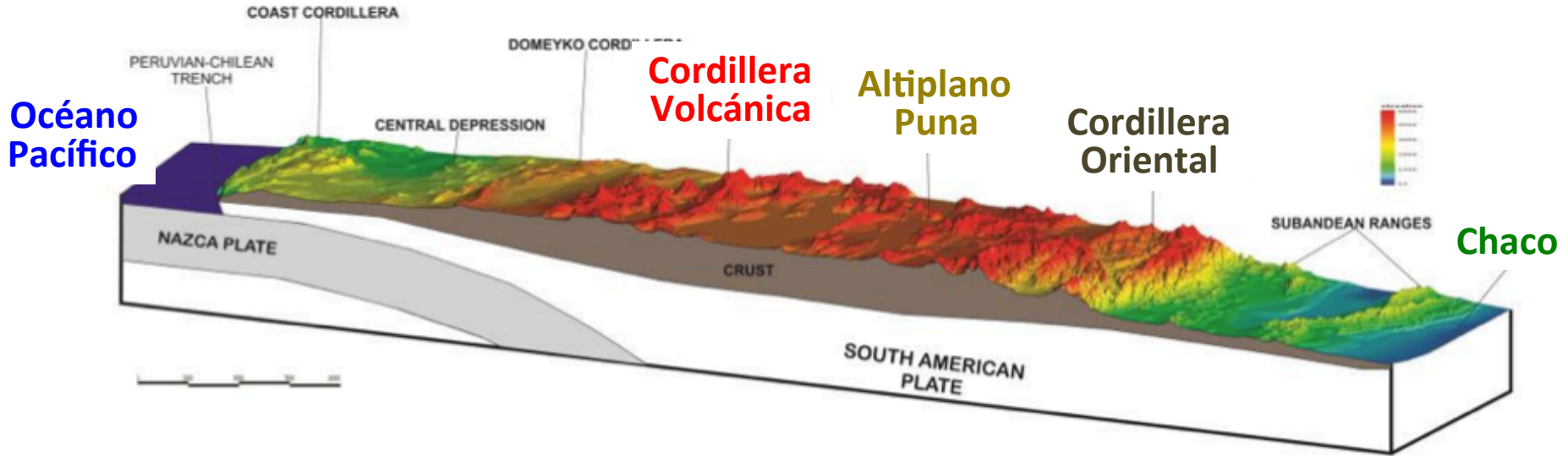
(Martin et al., 1995)



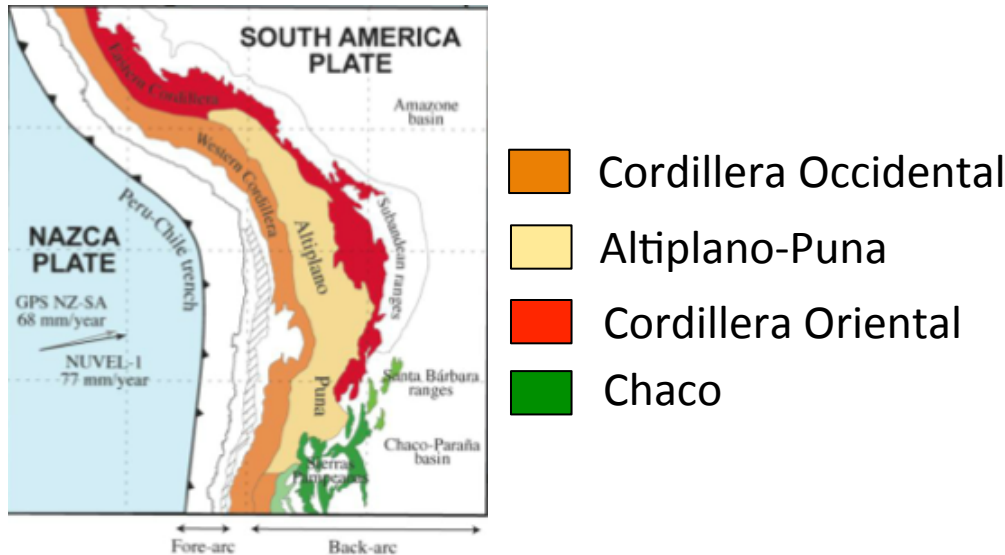
Esquema de circulación atmosférica sobre el Altiplano

(Andressen et al., 2006)

PERFIL ESQUEMÁTICO DE LOS ANDES CENTRALES



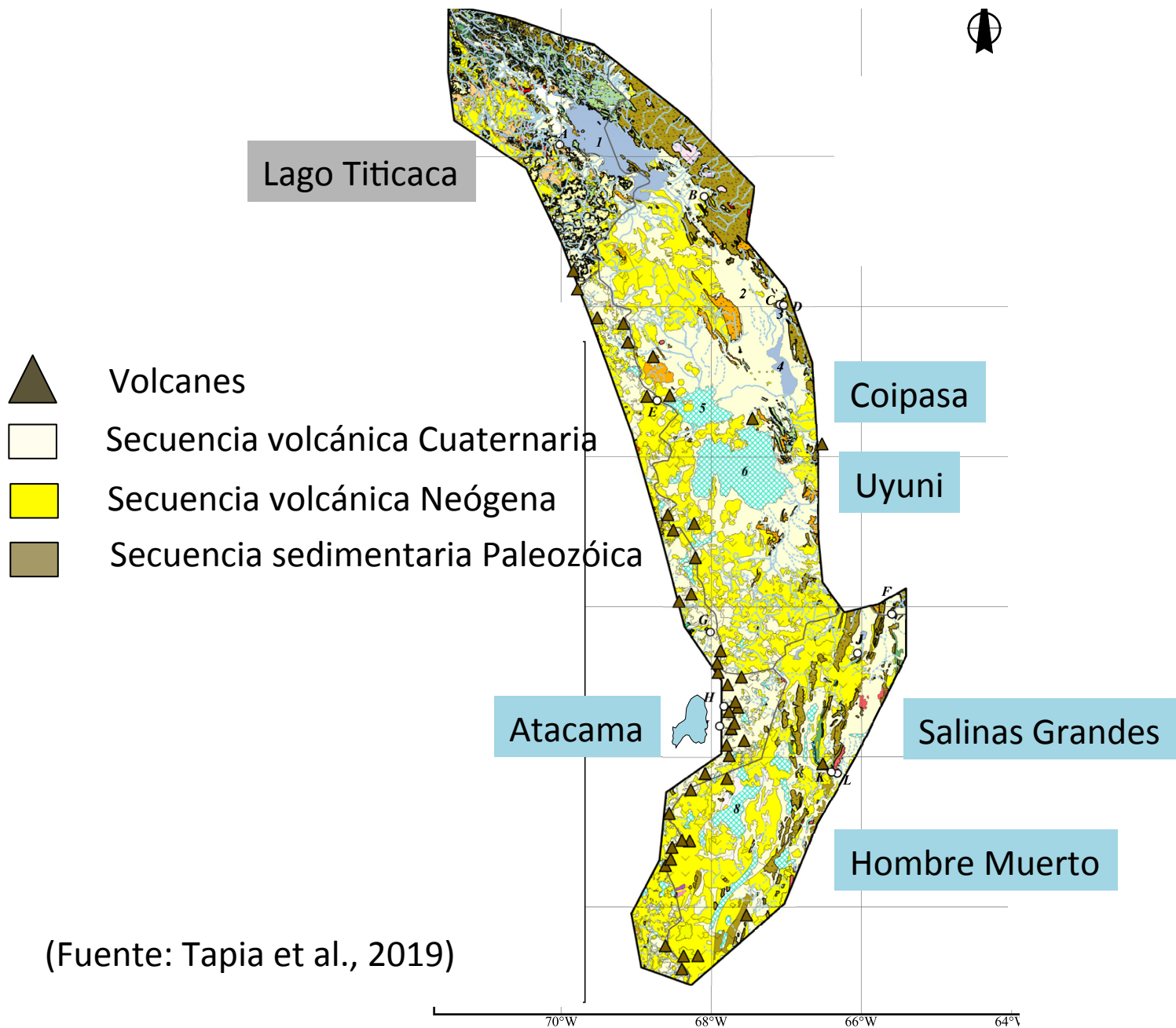
Provincias geológicas y morfotectónicas con la subducción de la placa de Nazca



Durante el Oligoceno-Mioceno, se produjo la fusión de la placa de Nazca y magma atravesó la corteza para formar la actual cordillera volcánica.

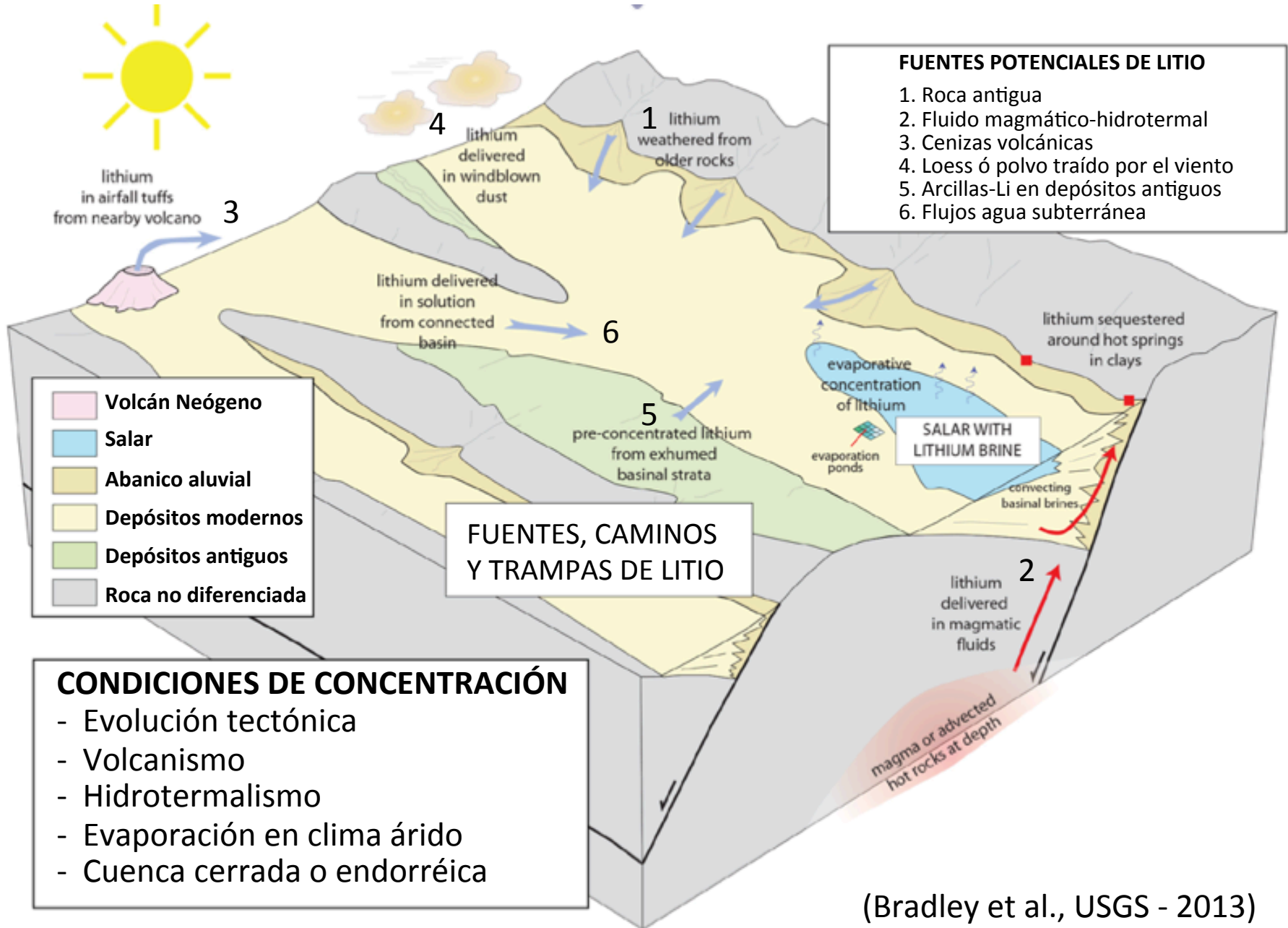
Entre la cadena de volcanes al oeste y la cadena de montañas al este quedó encerrada una amplia región que hoy alberga al Altiplano y la Puna.

GEOLOGÍA DE LA REGIÓN ALTIPLANO-PUNA



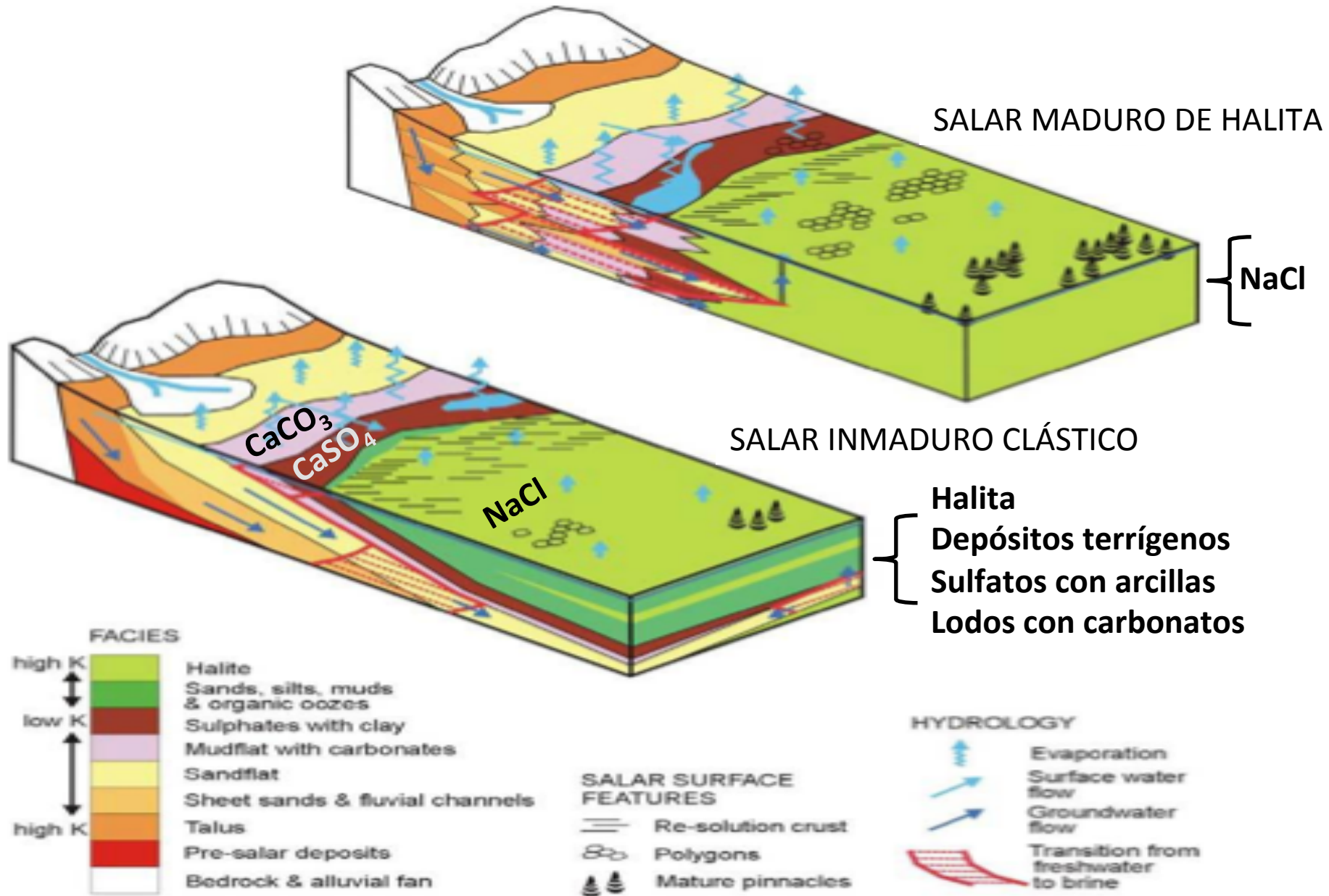
(Fuente: Tapia et al., 2019)

MODELO DE DEPÓSITO DE SALMUERAS CON LITIO

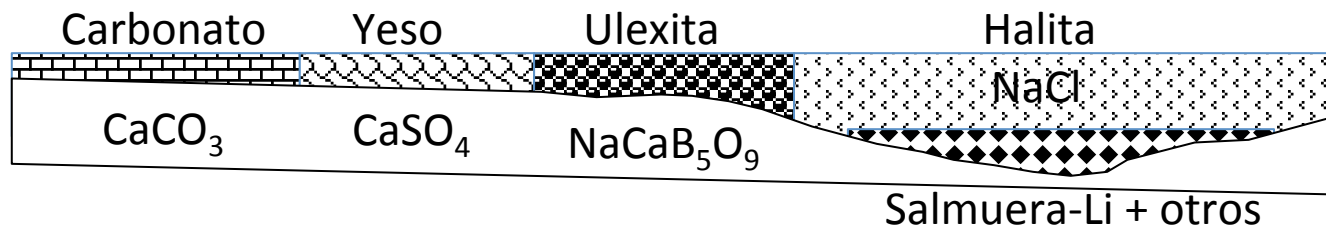
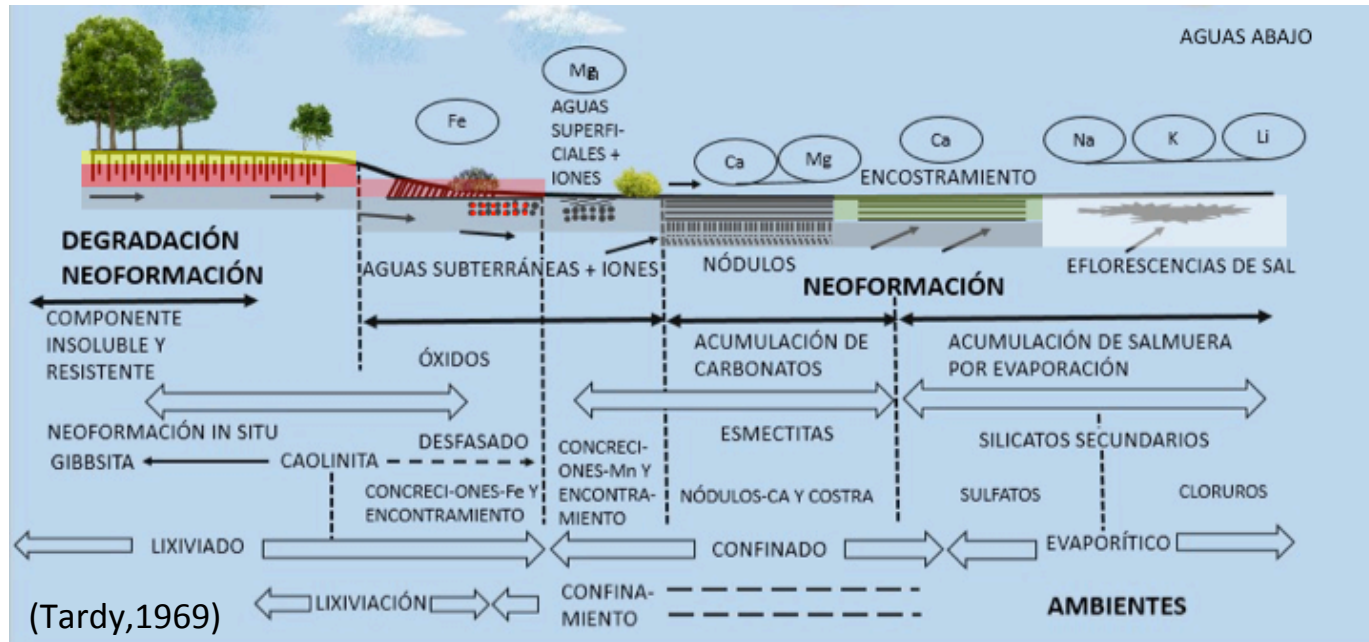


(Bradley et al., USGS - 2013)

DEPÓSITOS EVAPORÍTICOS MADUROS E INMADUROS



ZONACIÓN DE SALES EN EL MEDIO EVAPORÍTICO



Los salares muestran una zonación de facies evaporíticas desde el borde hacia el depocentro: **carbonatos, sulfatos, boratos y cloruros**.

Otros elementos químicos: **litio, potasio, magnesio**, cesio, rubidio, estroncio, están **en solución** como cationes en las salmueras dentro de los salares.

COMPOSICIÓN QUÍMICA PROMEDIO DE SALARES

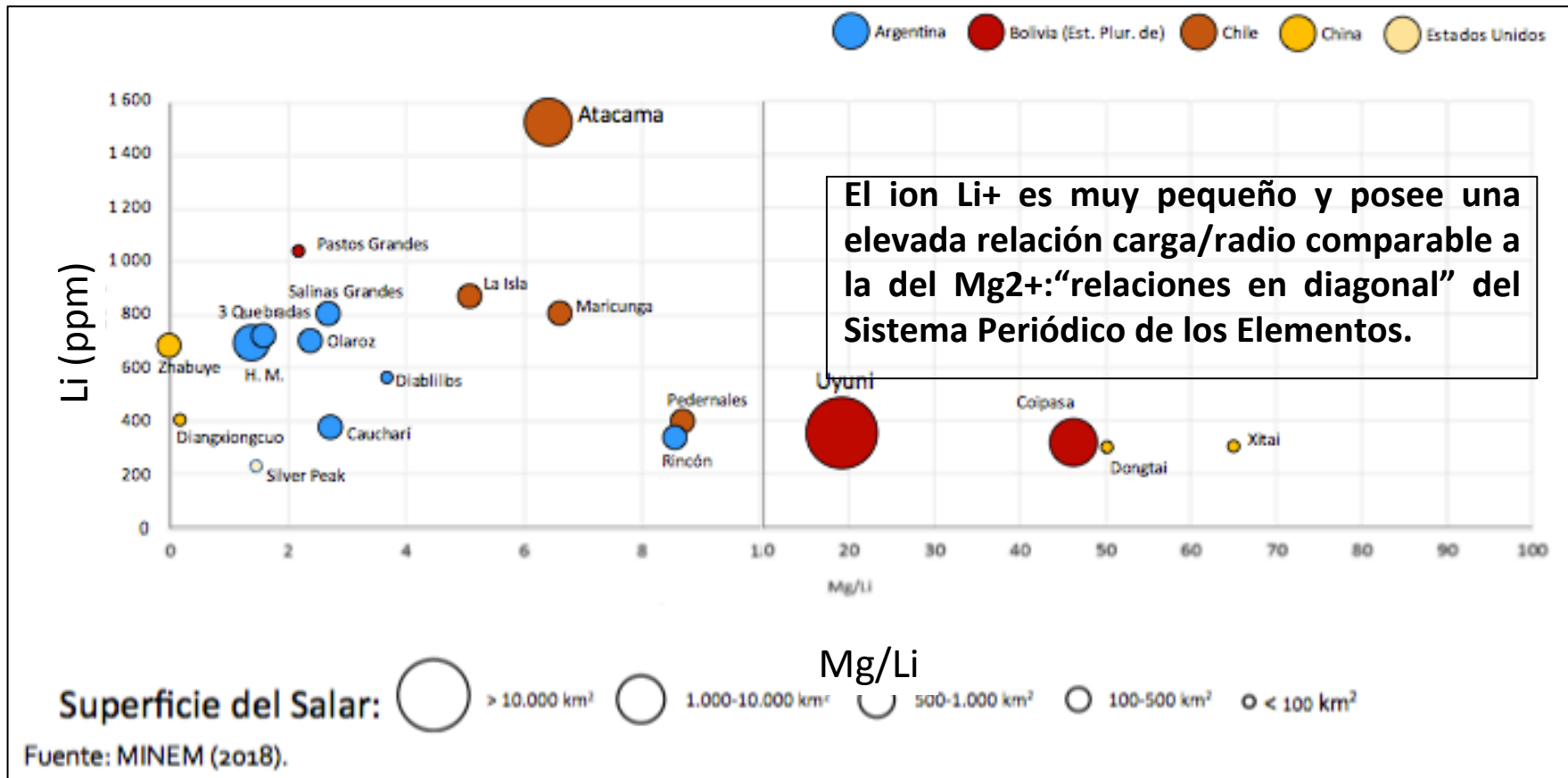
	Atacama Chile	Uyuni Bolivia	Hombre Muerto	Cauchari	Olaroz Puna Argentina	Rincón
Na	7,60	8,75	9,79	9,55	9,46	9,46
K	1,85	2,72	0,617	0,47	0,656	0,66
Li	0,150	0,035	0,062	0,082	0,033	0,033
Mg	0,98	0,65	0,085	0,131	0,323	0,303
Ca	0,031	0,046	0,053	0,034	0,059	0,059
Cl	16,04	15,69	15,80	14,86	18,06	16,06
SO ₄	1,65	0,85	0,853	1,62	1,015	1,015
B	0,064	0,020	0,035	0,076	0,040	0,040
K/Li	12,33	20,57	9,95	9,04	20,12	1,220
Na/Li	50,6	250	158	116	286	286
Mg/Li	6,53	18,6	1,37	2,52	9,78	9,29

Concentración de iones en gr/100gr (%)

(Bravo, 2016)

El residuo salino va a generar las evaporitas, siendo el **cloruro de sodio** la sal más abundante que forma costras de varios metros de espesor con **porosidad del 30%**. En el interior húmedo se mantiene líquida la salmuera que contiene el resto de los elementos químicos, entre ellos el **litio y el potasio** (magnesio).

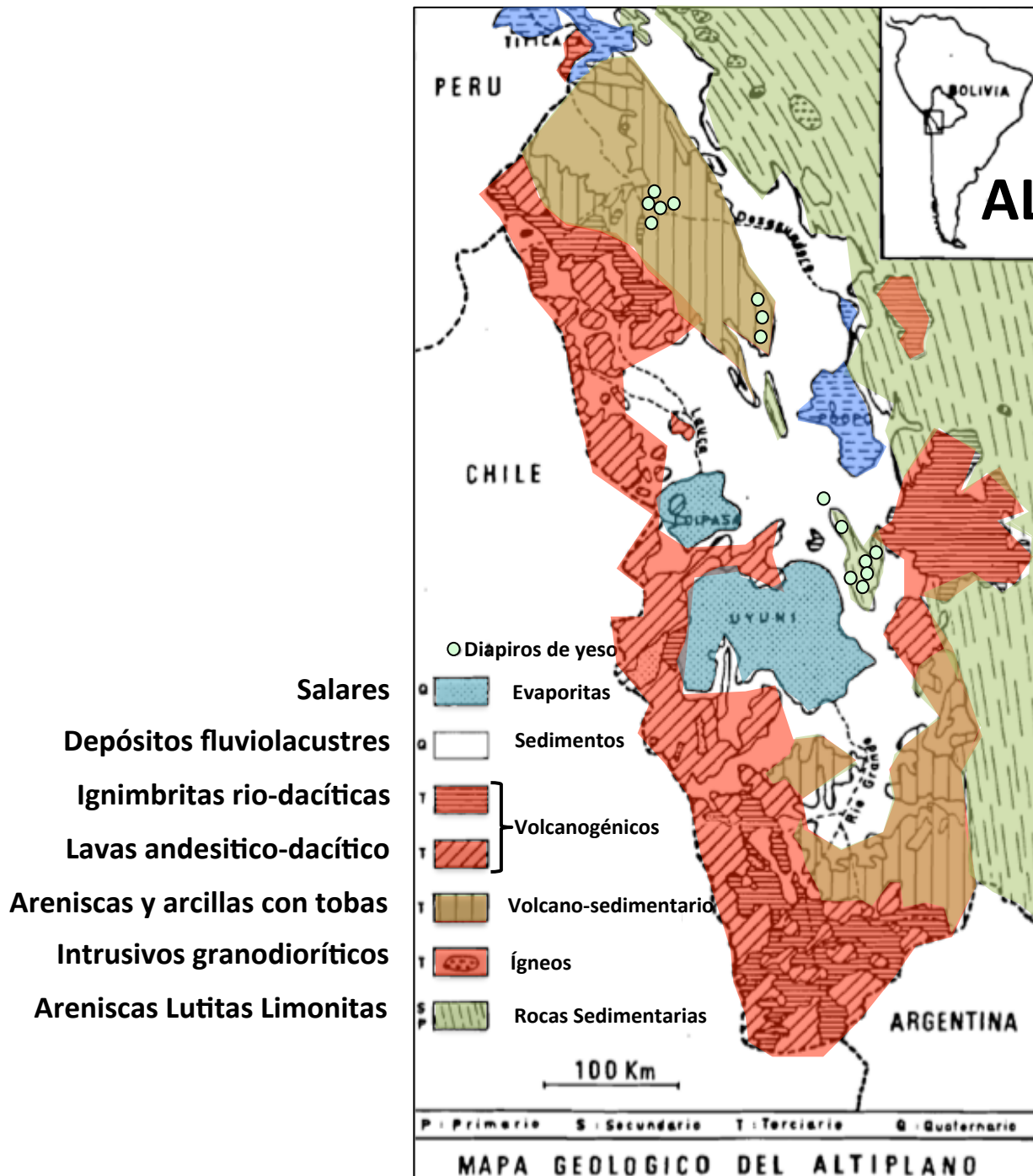
CONCENTRACIÓN DE LITIO vs RELACIÓN Mg/Li



Cada salar tiene una composición diferente lo que obliga a establecer métodos de extracción y concentración particulares para cada uno.

El alto contenido de magnesio en los salares de Atacama y Uyuni en comparación con la Puna, dificulta la extracción de carbonato de magnesio por lo que debe separarse por métodos especiales como la precipitación de la salmuera con cal, siguiendo la línea de sulfatos en lugar de la de cloruros para recuperar y purificar el litio.

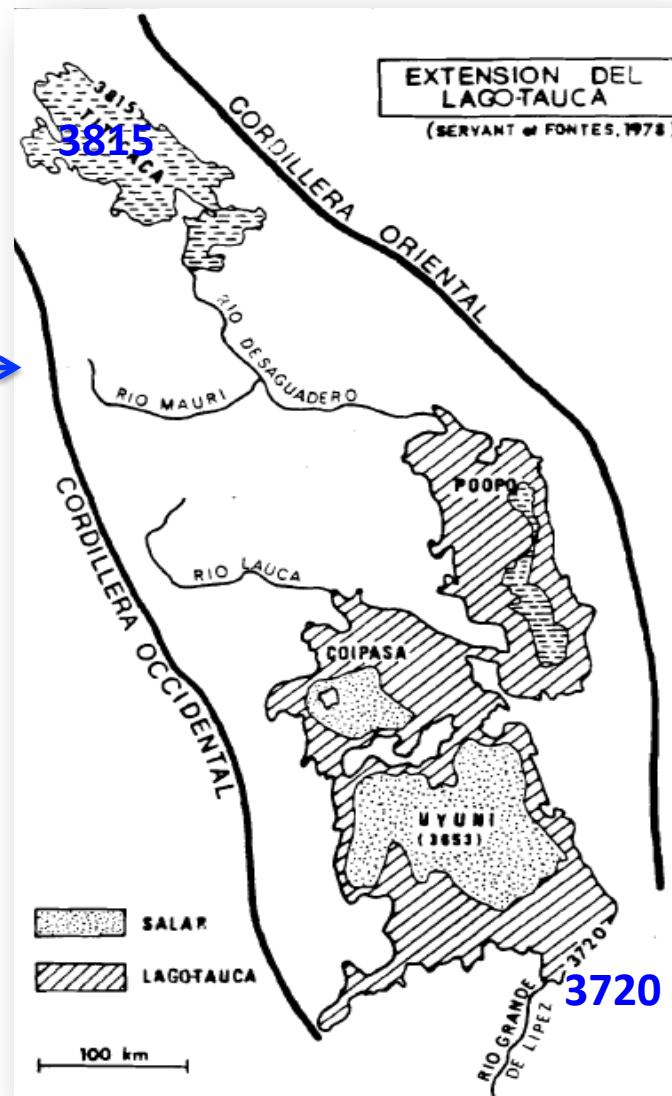
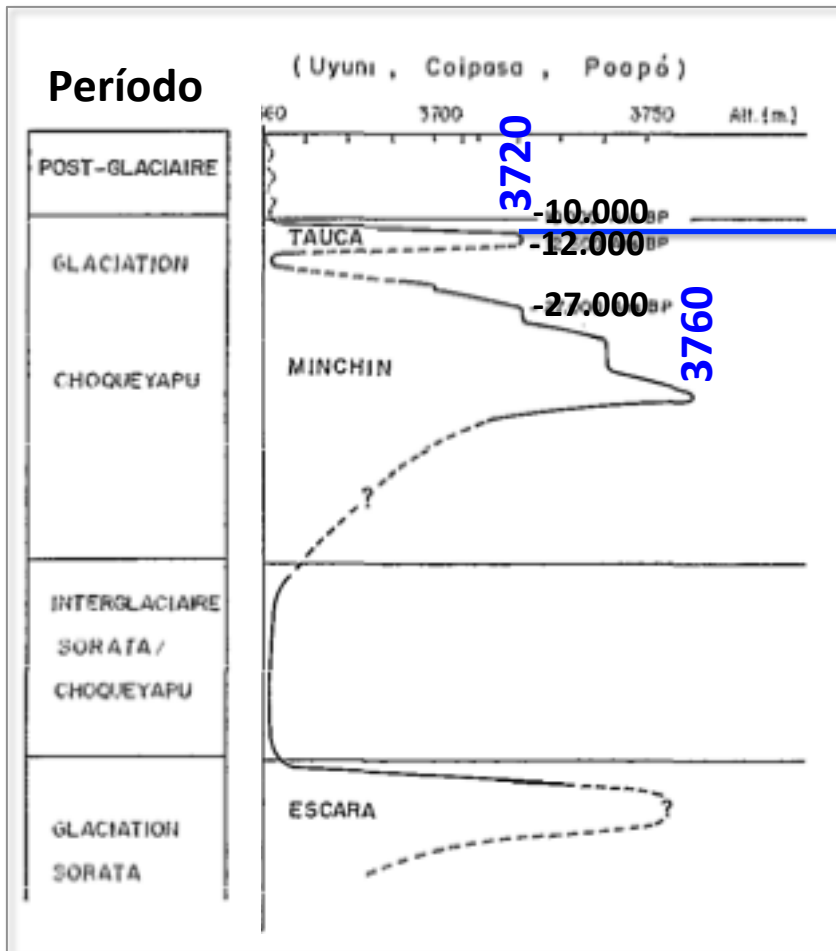
GEOLOGÍA ALTIPLANO DE BOLIVIA



Francois Risacher, 1989. ORSTOM.
Estudio económico del salar de Uyuni

PALEOAMBIENTES EN EL ALTIPLANO DE BOLIVIA

Nivel de los lagos durante la última glaciación



Titicaca
3815

Poopo
3686

Coipasa
3656

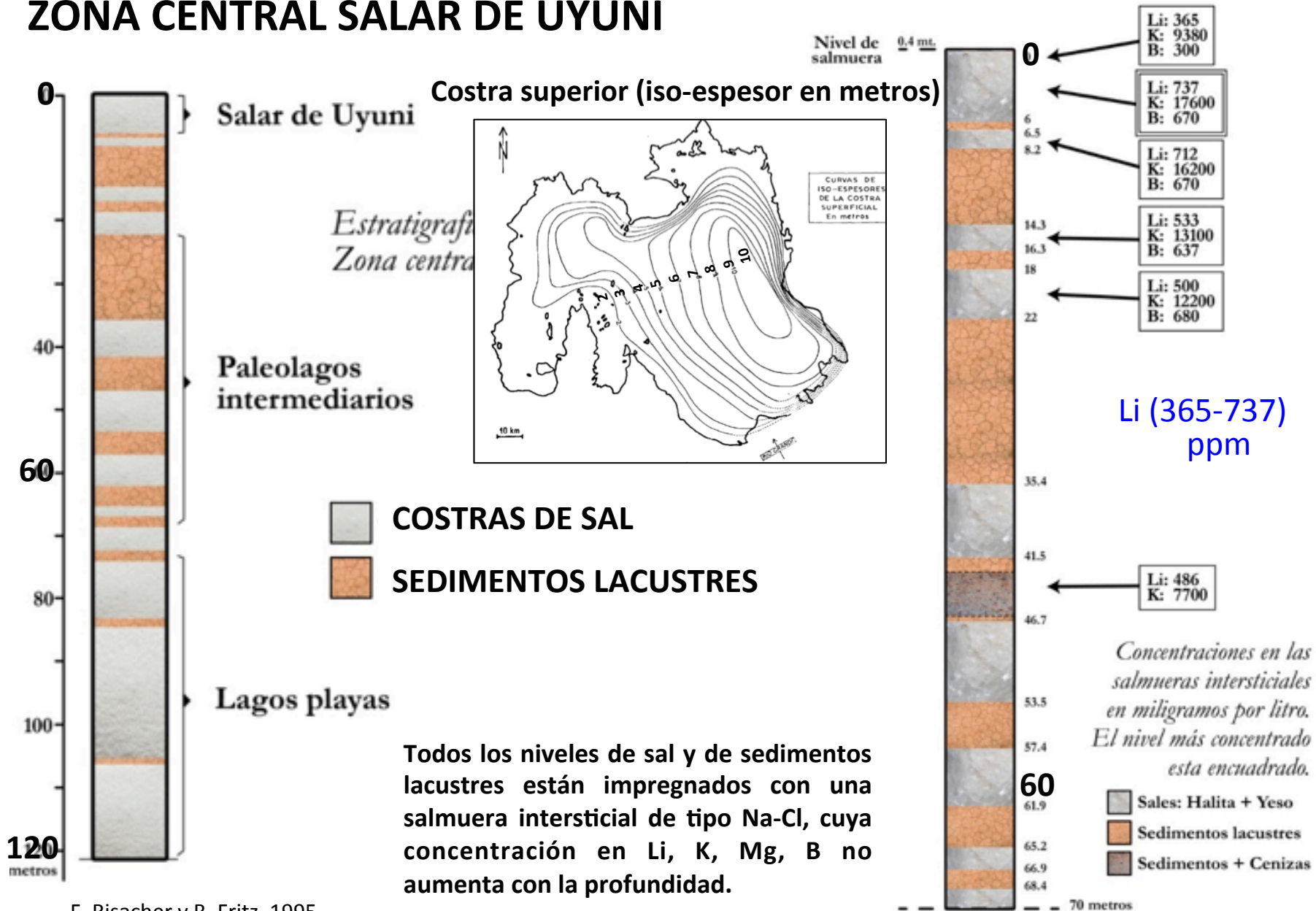
Uyuni
3653

Aporte de agua por deshielo de los glaciares circundantes

(Servant y Fontes, 1978)

PALEOLAGO TAUCA
12.000 - 10.000 AÑOS A.P.

ZONA CENTRAL SALAR DE UYUNI



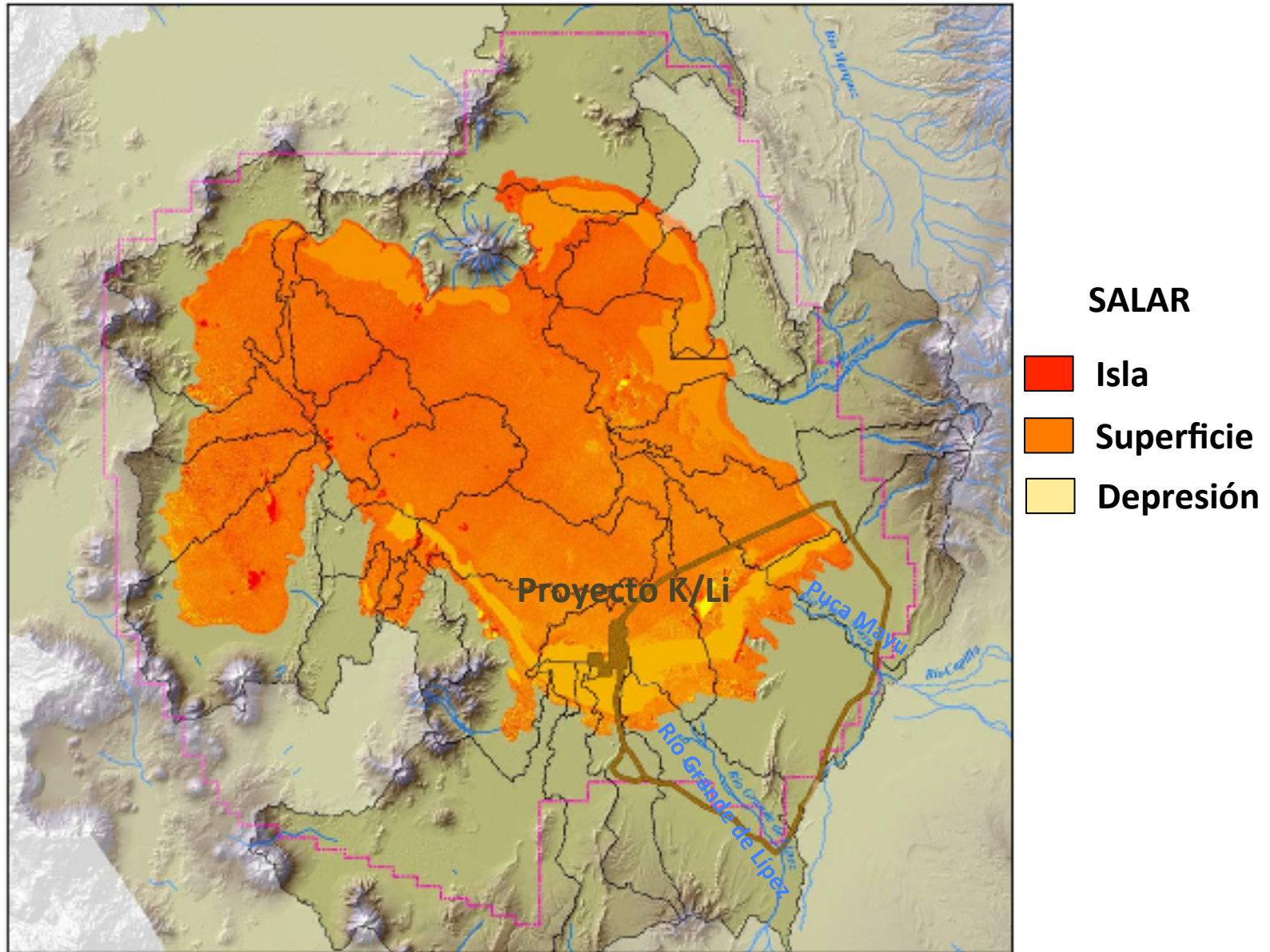
F. Risacher y B. Fritz, 1995.

Evolución cuaternaria del Salar de Uyuni, Altiplano Central, Bolivia.

F. Risacher y A. Armendia, 1986.

Primeros Sondeos en el Salar de Uyuni

SALAR DE UYUNI - IMAGEN SATELITAL



Modelo digital de elevación de terreno superpuesto

ÁREA DE INUNDACIÓN 22/03/2011 (AÑO NIÑA)

En el 2011, la intensidad de la precipitación pluvial que azotó al salar de Uyuni provocó una **inundación** de casi un metro de altura durante **8 meses** en el área del proyecto.
(GNRE 2011)

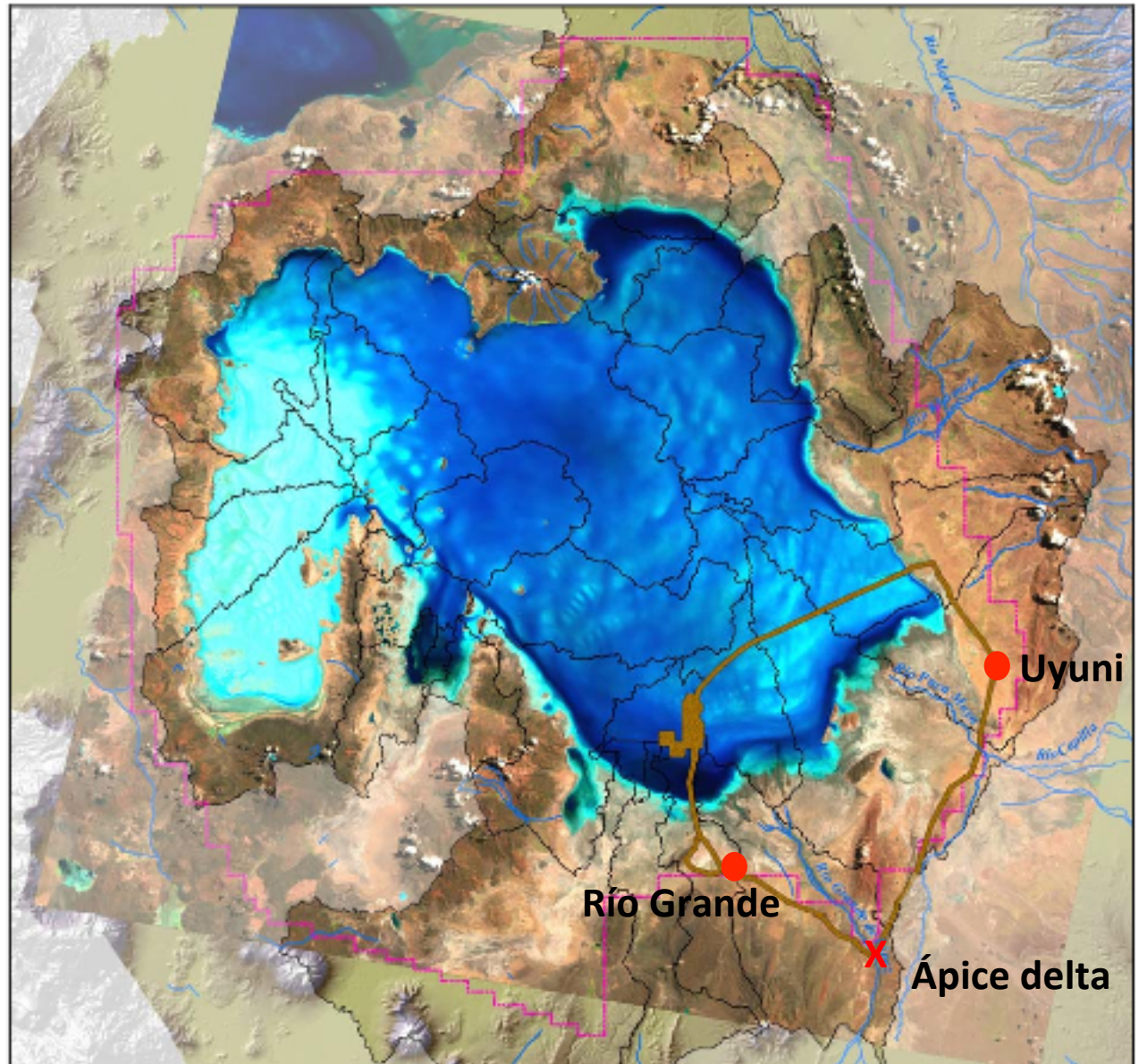
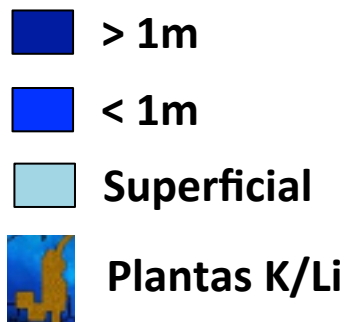
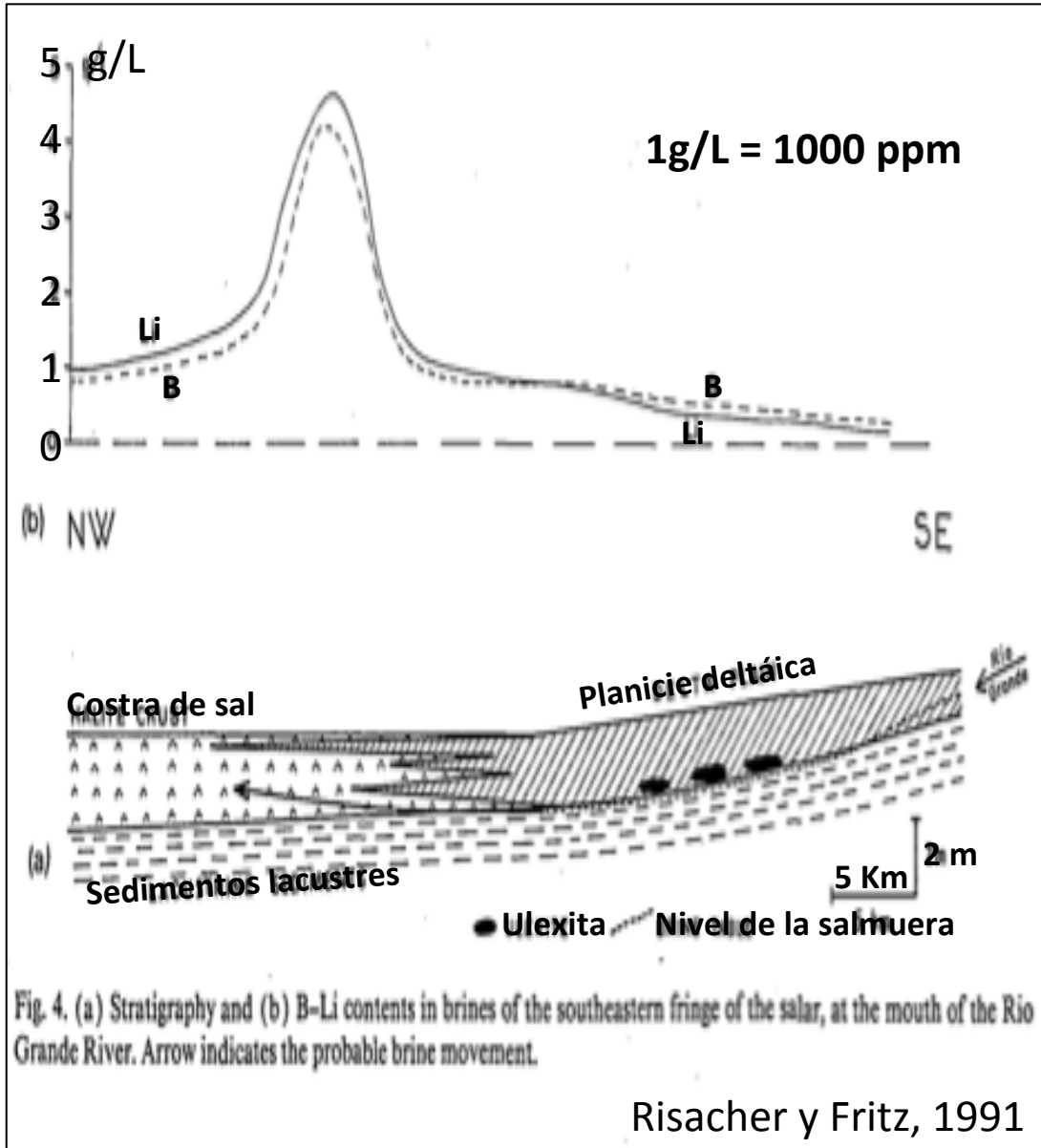


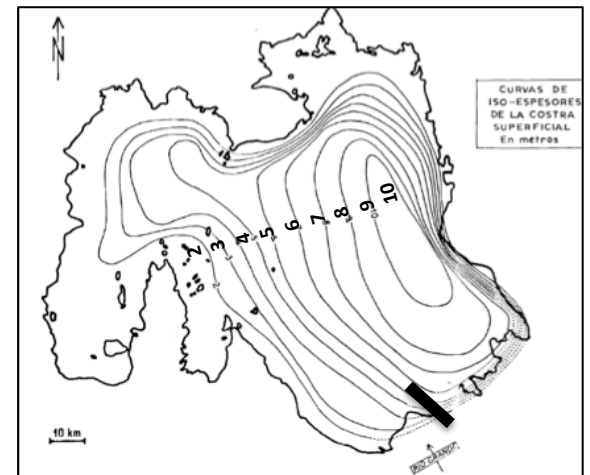
Figura 4.8. Sobreposición con imagen histórica del área de inundación

CONCENTRACIÓN DE Li y B DELTA DE RÍO GRANDE - SALAR DE UYUNI



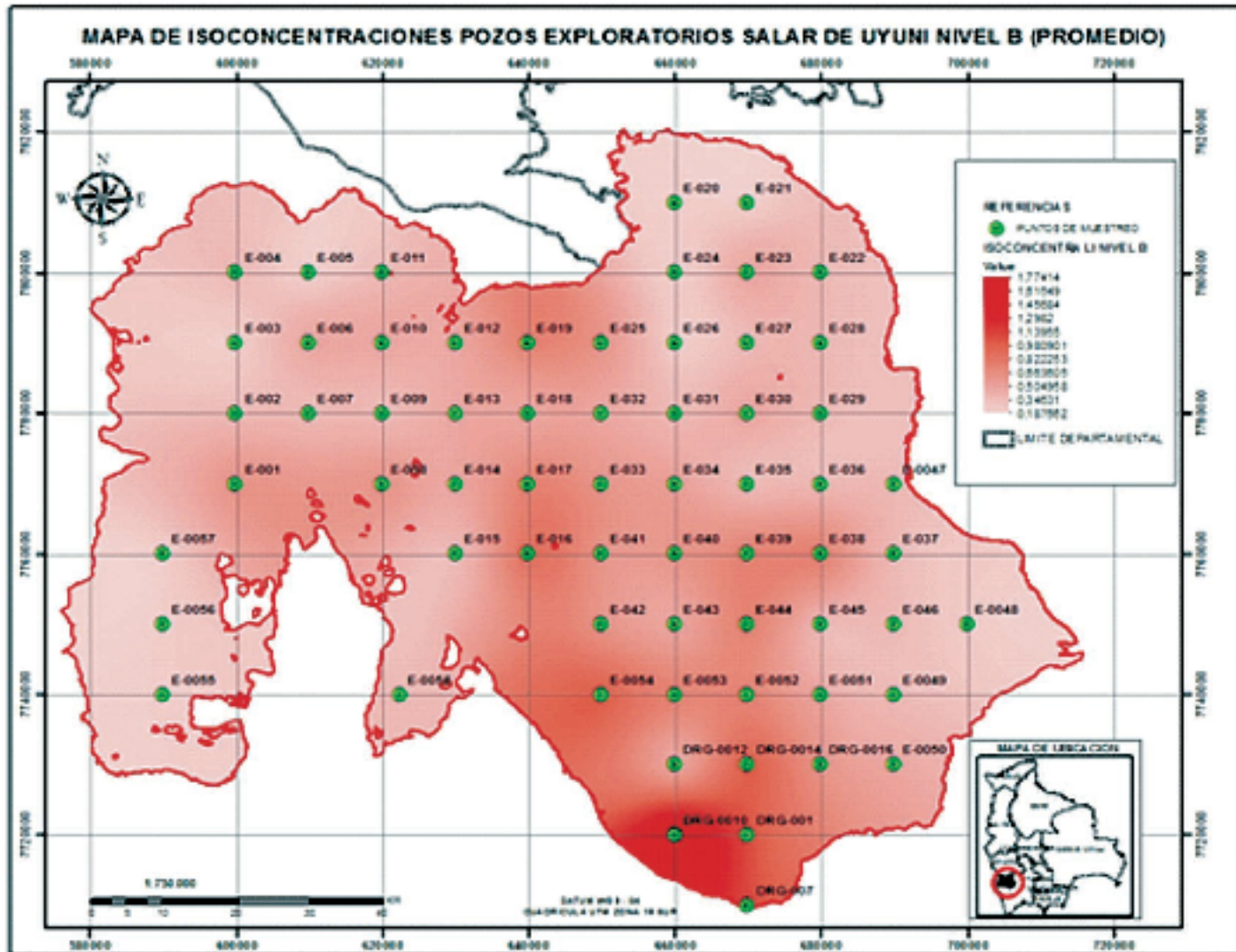
Risacher, 1989

Costra superior (iso-espesor en metros)



Transecto Delta-Salar

ISO-CONCENTRACIÓN DE LITIO PROMEDIO (50 m) SALMUERA SALAR DE UYUNI

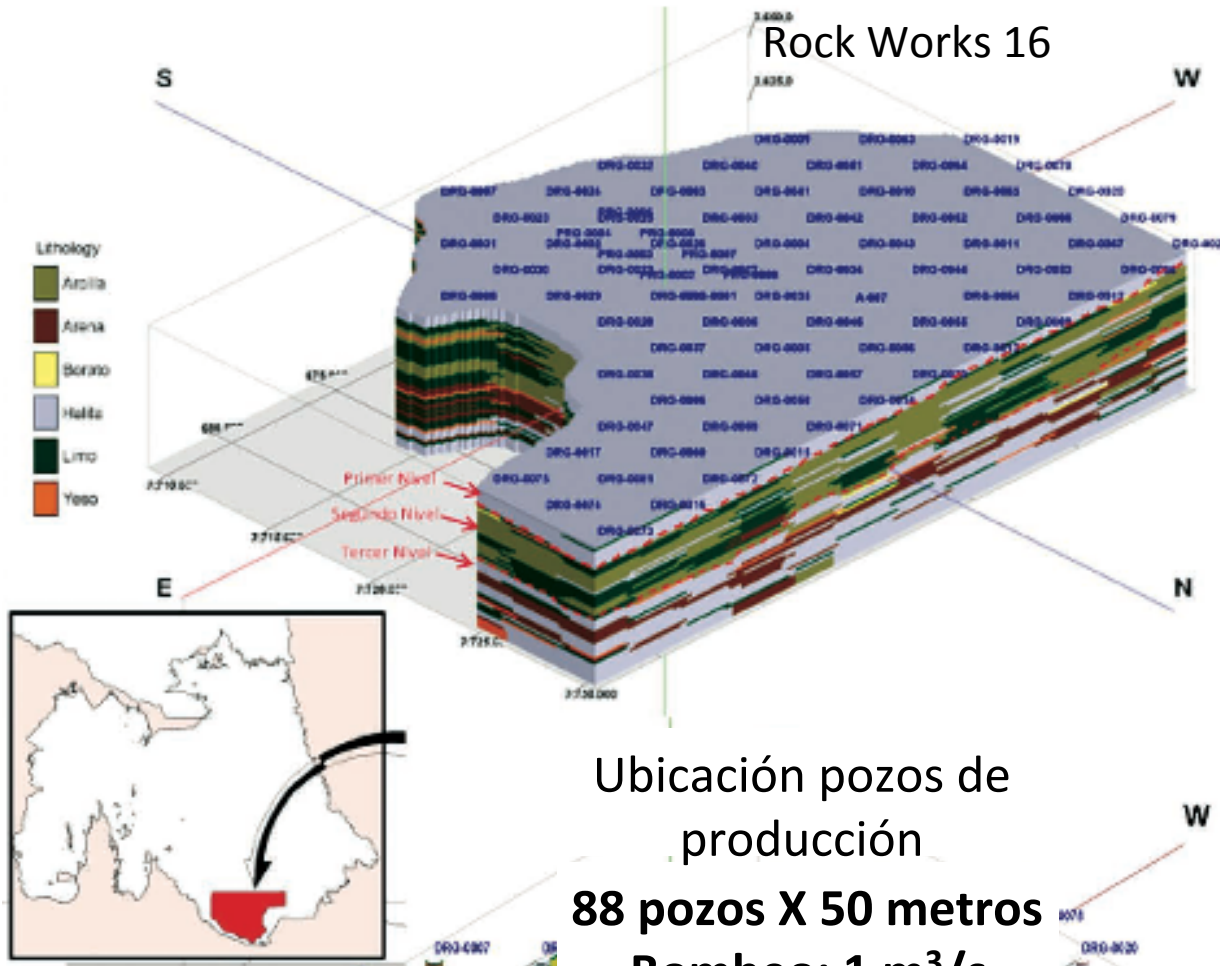


(Memoria GNRE, 2016)

Malla 10 x 10 Km

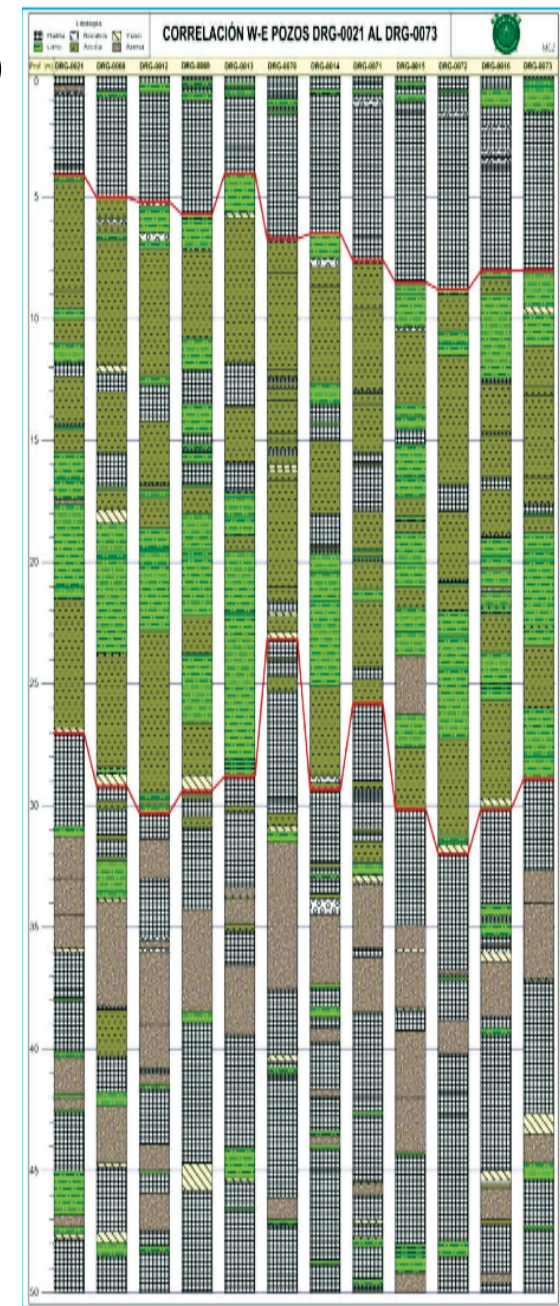
MODELO LITOLÓGICO 3D

Rock Works 16

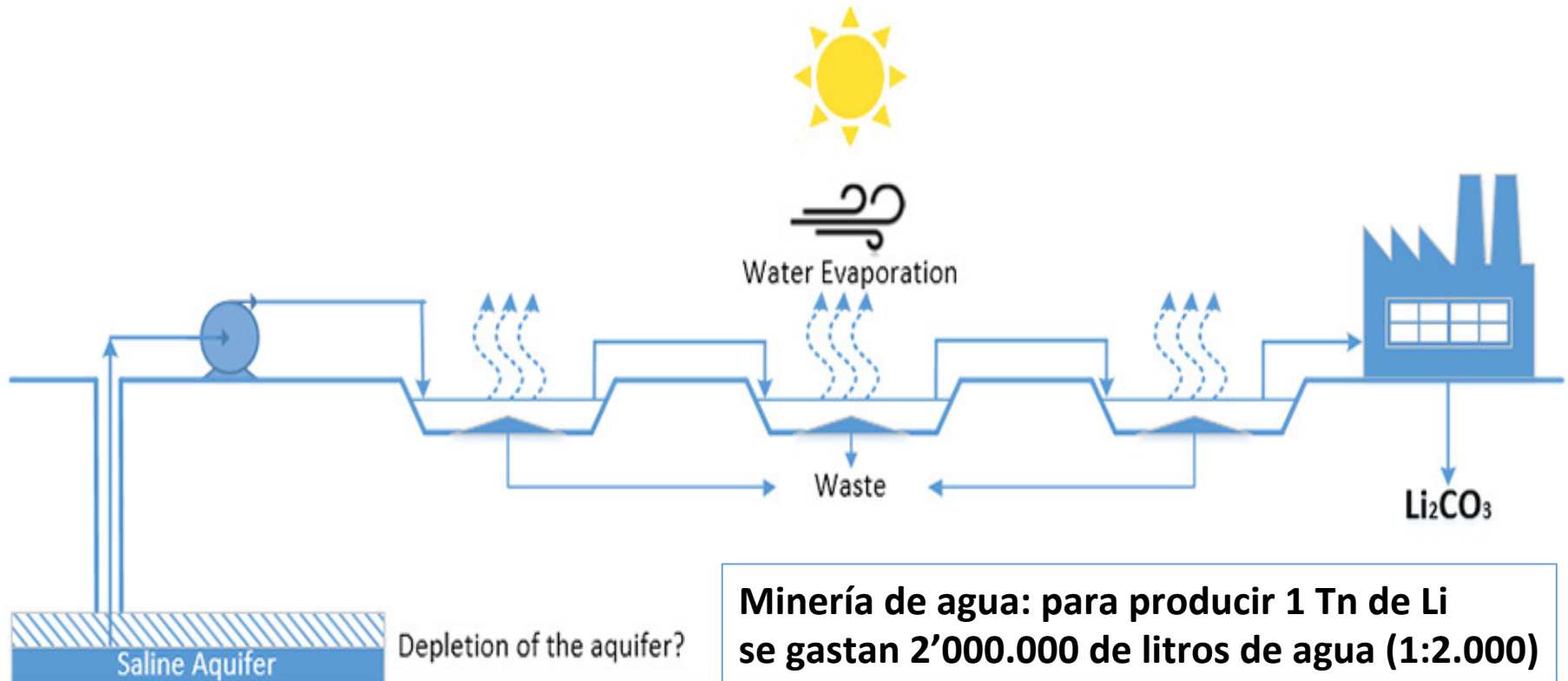


Ubicación pozos de producción
88 pozos X 50 metros
Bombeo: 1 m³/s

Area proyecto
 Plantas de K y Li



PLANTA PARA OBTENCIÓN DE LiCl

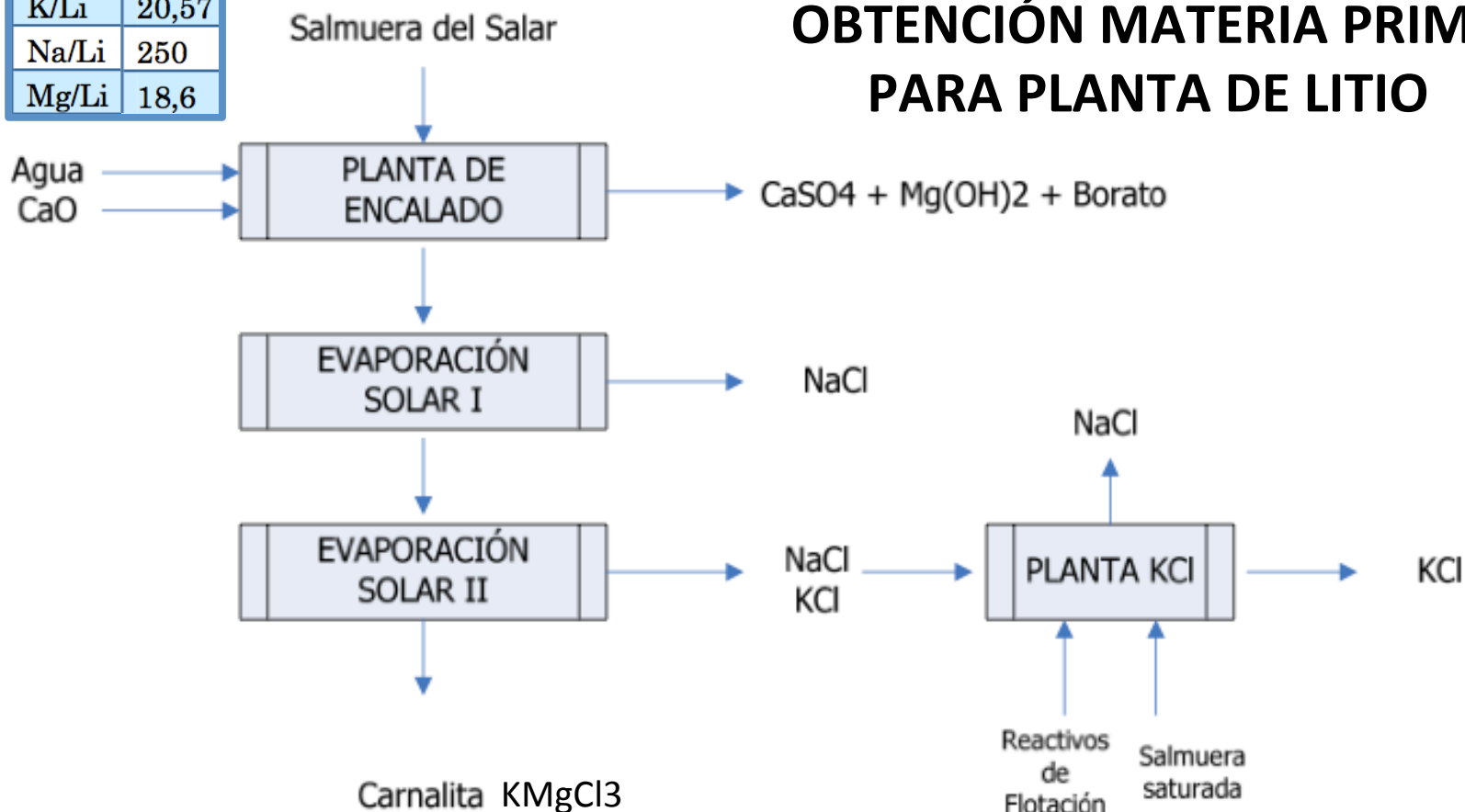


“Sería inconsistente que para obtener una energía verde a partir de litio que requiere un desarrollo ambientalmente sostenible, se hiciera una minería no sostenible”

Flexer V., Baspineiro C.F., Galli C. I., 2018. “Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing”, Science of The Total Environment, Volume 639, 15 October 2018, Pages 1188-1204

K/Li	20,57
Na/Li	250
Mg/Li	18,6

OBTENCIÓN MATERIA PRIMA PARA PLANTA DE LITIO



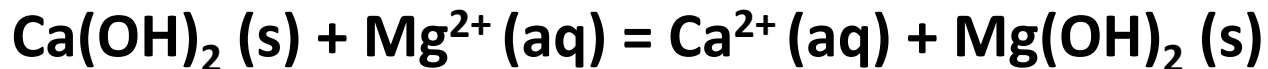
A Planta de Li (con implementación de nueva línea de sulfatos)



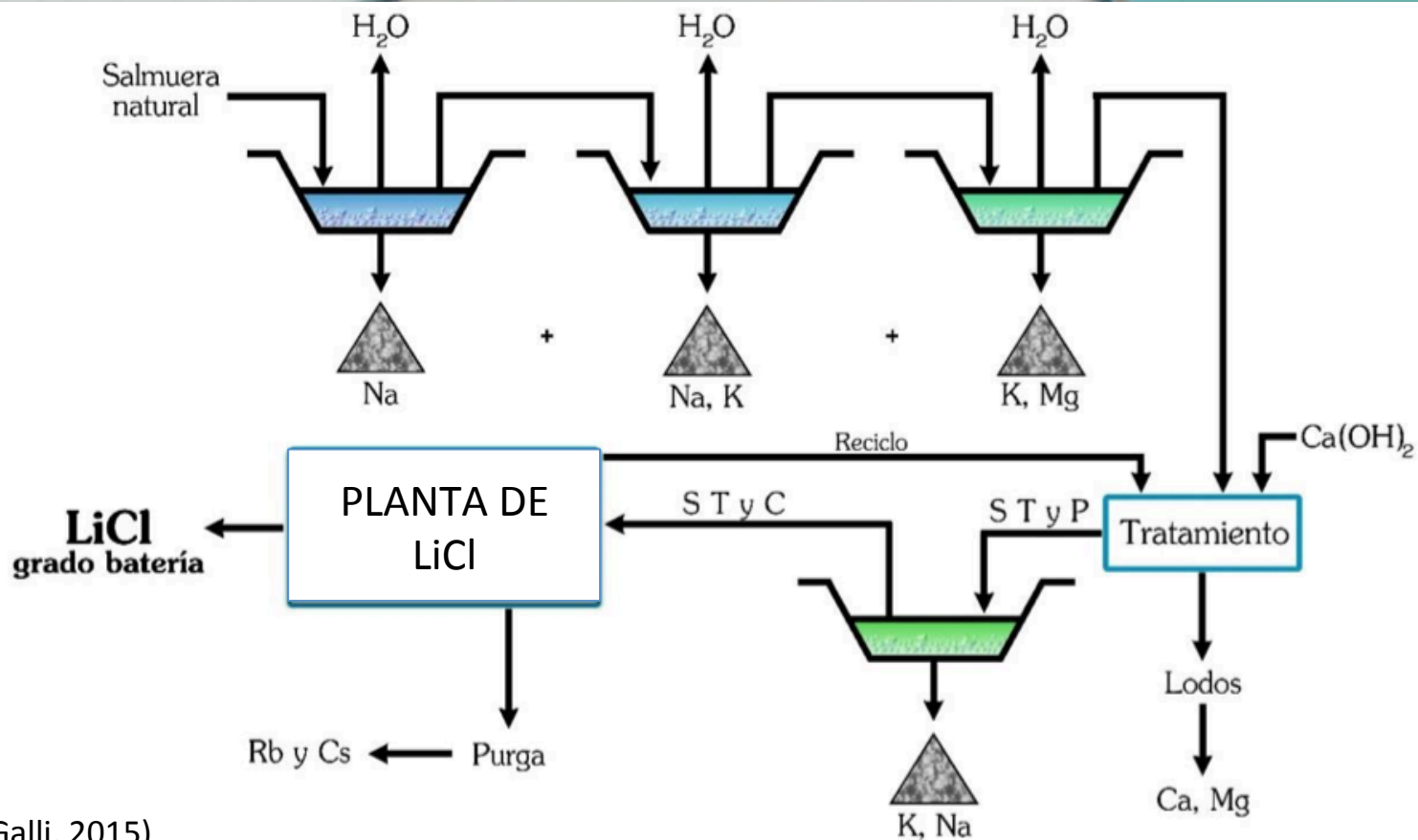
Figura 2.8. Proceso de obtención de cloruro de potasio

Fuente: GNRE, 2011.

El alto contenido de magnesio dificulta la extracción de potasio y litio, por lo que debe separarse por tratamiento de la salmuera con cal.



PISCINAS DE EVAPORACIÓN PLANTA DE LiCl



(Galli, 2015)

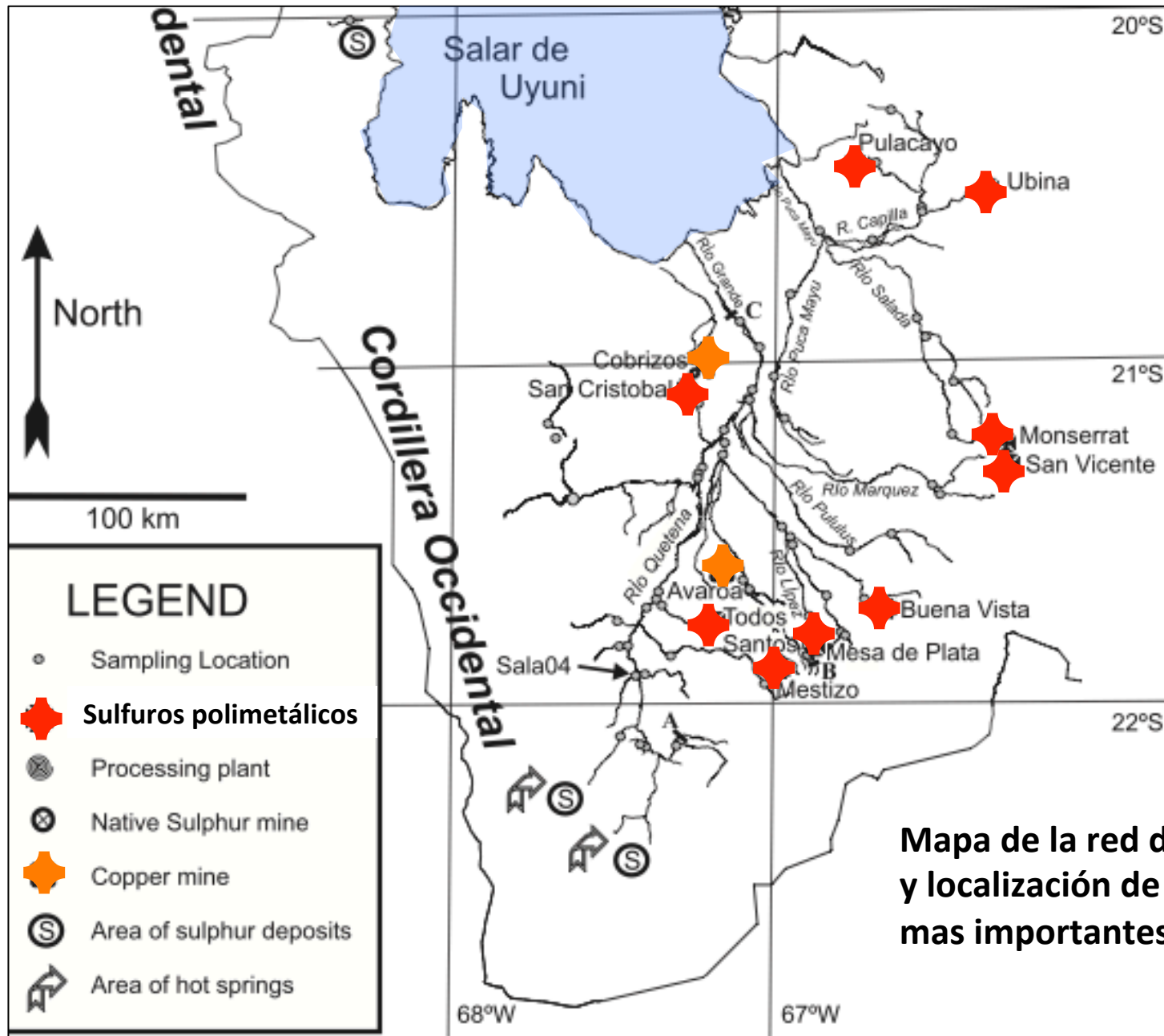
IMPACTOS MINEROS

SUBCUENCA
RÍO COLORADO (PUCU MAYU)

SUBCUENCA
RÍO GRANDE DE LÍPEZ
10.000 KM²



MINERÍA EN LAS CUENCAS RÍO GRANDE DE LÍPEZ Y PUCU MAYU

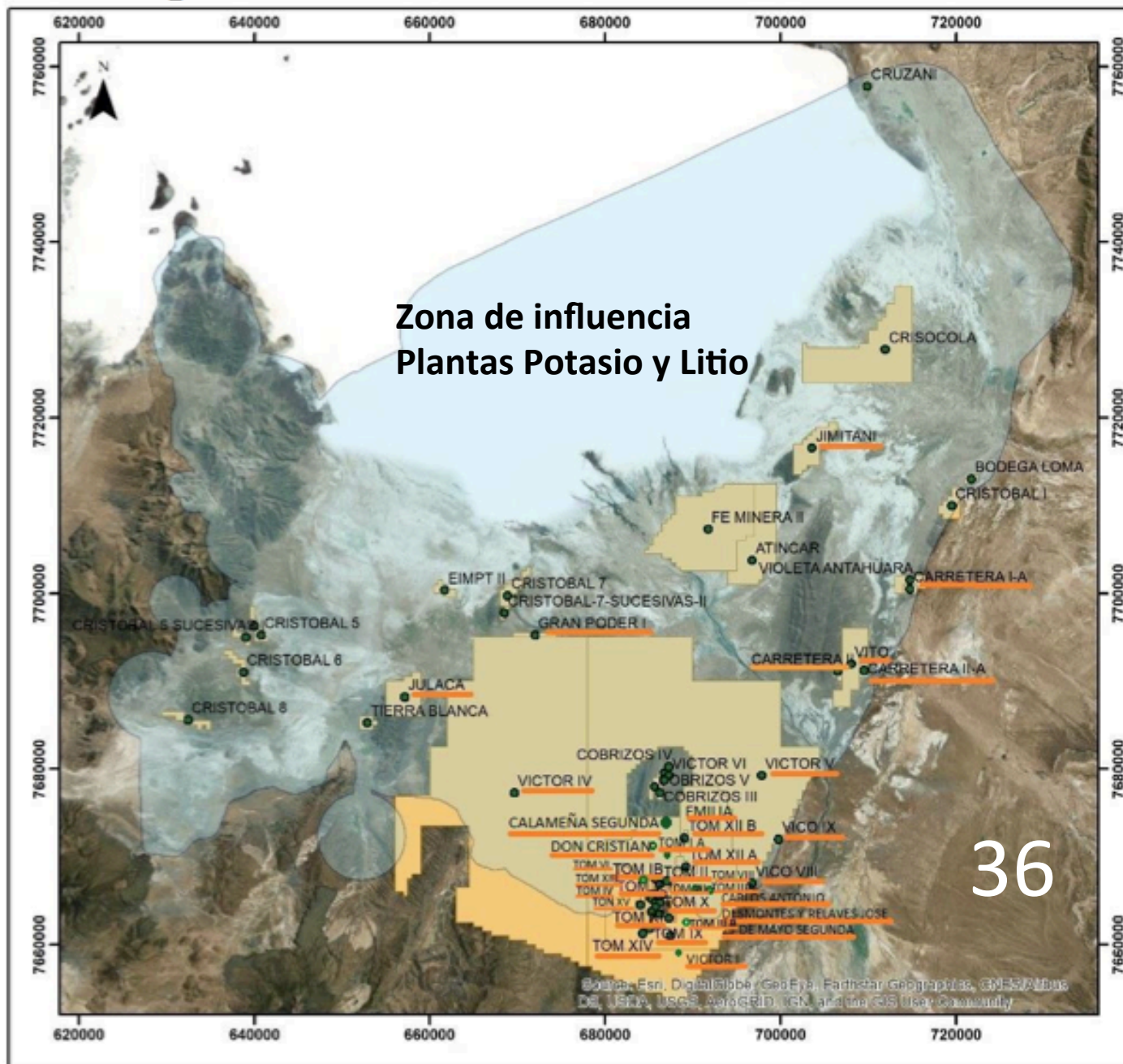


MINERA DE SULFUROS POLIMETÁLICOS SAN CRISTÓBAL



CONCESIONES MINERA SAN CRISTÓBAL S.A.

VIVENS, 2018. Auditoria Ambiental de Línea Base (ALBA)



36

MINERÍA DE POLIMETÁLICOS EN LA REGIÓN DE UYUNI



Foto 1.- Mina de polimetálicos (Ag, Zn, Pb) de Pulacayo. Intrusión ígnea mineralizada en rocas sedimentarias



Foto 2.- Escombreras abandonadas de materiales estériles en Pulacayo.



Foto 3.- Precipitados de sulfato de hierro (FeII y FeIII) en drenaje seco de Pulacayo. Prueba de cianuros

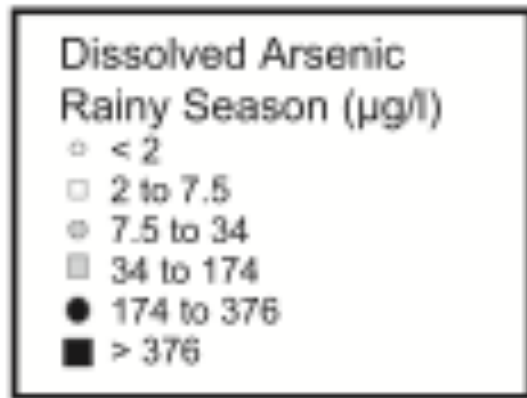


Foto 4.- Tuberías de drenaje de lixiviados de la mina de polimetálicos San Cristóbal

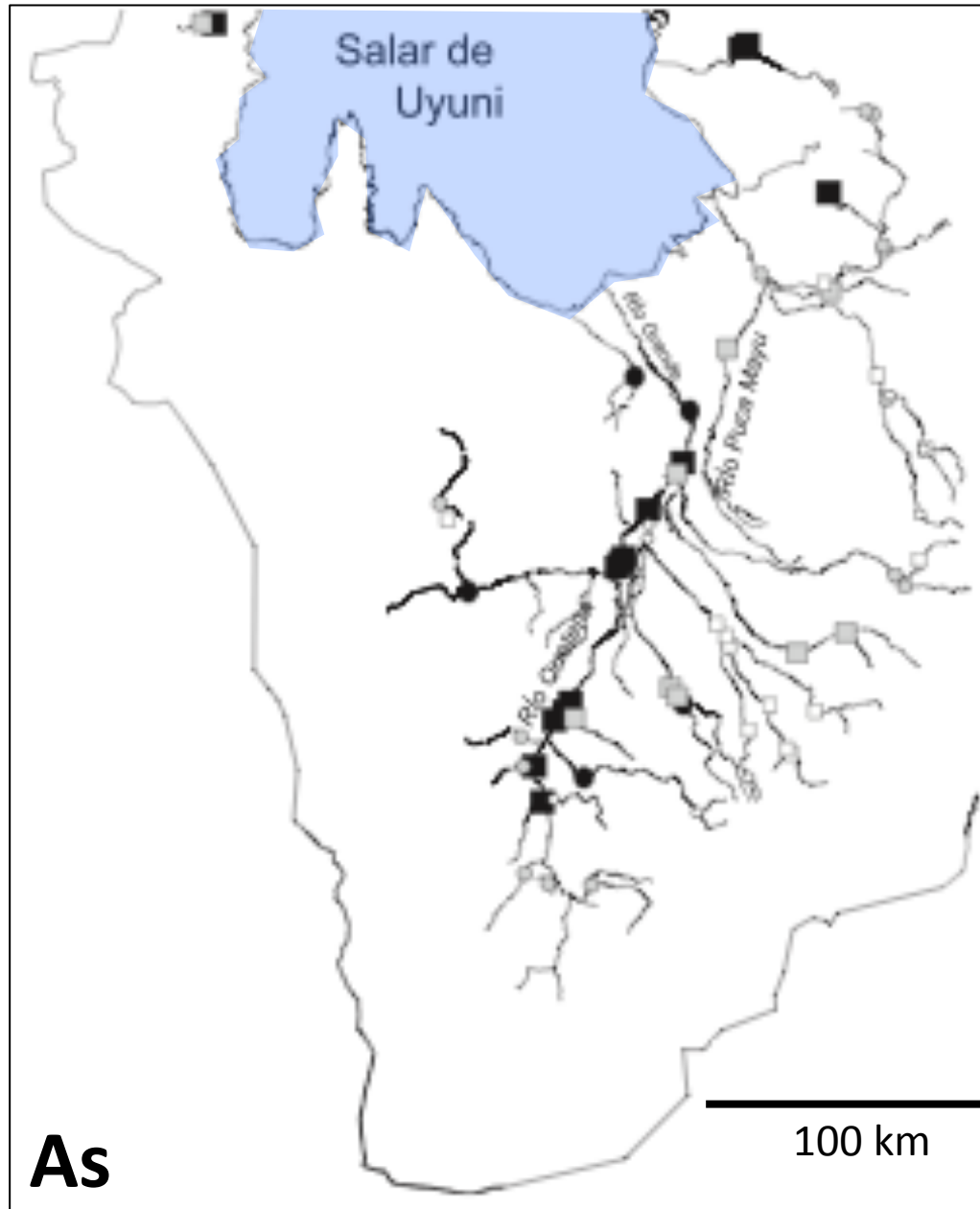
ARSÉNICO EN EL SISTEMA DE AGUAS SUPERFICIALES

SUBCUENCAS RÍO GRANDE DE LÍPEZ Y PUCU MAYU

Estación de lluvia
enero-febrero 2000



Valor guía OMS < $10\mu\text{g/L}$
Tóxico > $50\mu\text{g/L}$



YACIMIENTOS MINERALES EN LA REGIÓN DE UYUNI



COBRE

Foto 5.- Mina de cobre Cobrizos, piedemonte al sur del delta de río Grande



Foto 6.- Mina Cobrizos, excavación abandonada. Aguas muy salobres y alcalinas: EC=12,1 mS/cm , pH=9,45



CALIZAS

Foto 7.- Nivel de calizas erosionadas sobre antigua terraza lacustre a 3700 msnm al sur del delta



BORATOS

Foto 8.- Boratera en la localidad de río Grande, flanco izquierdo del delta. Aguas alcalinas pH=8,5-9,0

RIESGOS GEOQUÍMICOS EN LAS CUENCAS DE APORTE

- Liberación de elementos y especies químicas tóxicas relacionadas con la minería de gran escala en la parte alta de la cuenca del río Grande.
- La mayor parte de esta contaminación tiene que ver con el contenido químico de los diferentes tipos de roca, es decir, con la geología.
- Se han encontrado concentraciones elevadas de arsénico, cromo, mercurio, cadmio y zinc en los suelos del área de influencia.
- Estudios previos reportan antimonio, arsénico y cadmio en aguas subterráneas, en concentraciones elevadas.

RÍO GRANDE DE LÍPEZ, ÁPICE DEL DELTA



Agua turbia, salobre y alcalinas :
ARCILLAS Y ÓXIDOS DE HIERRO



Delta del río Grande de Lípez
Agua salobre pasa a salina

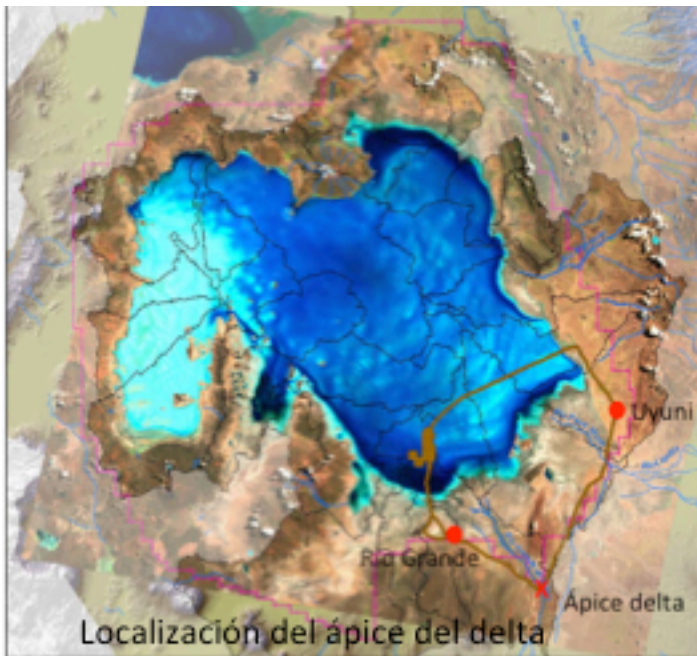


Figura 4.8. Sobreposición con imagen histórica del área de inundación



Caudal estimado en $3 \text{ m}^3/\text{s}$

RÍO GRANDE DE LÍPEZ, CENTRO DEL DELTA



Foto 12.- Centro del delta, zona susceptible a inundación



Agua clara, salada, y alcalina :
Floculación de materiales finos
Ambiente reductor Fe(II)



Sedimentos recuperados por sondeo en el delta.
Sedimentos de color verdoso por reducción del hierro

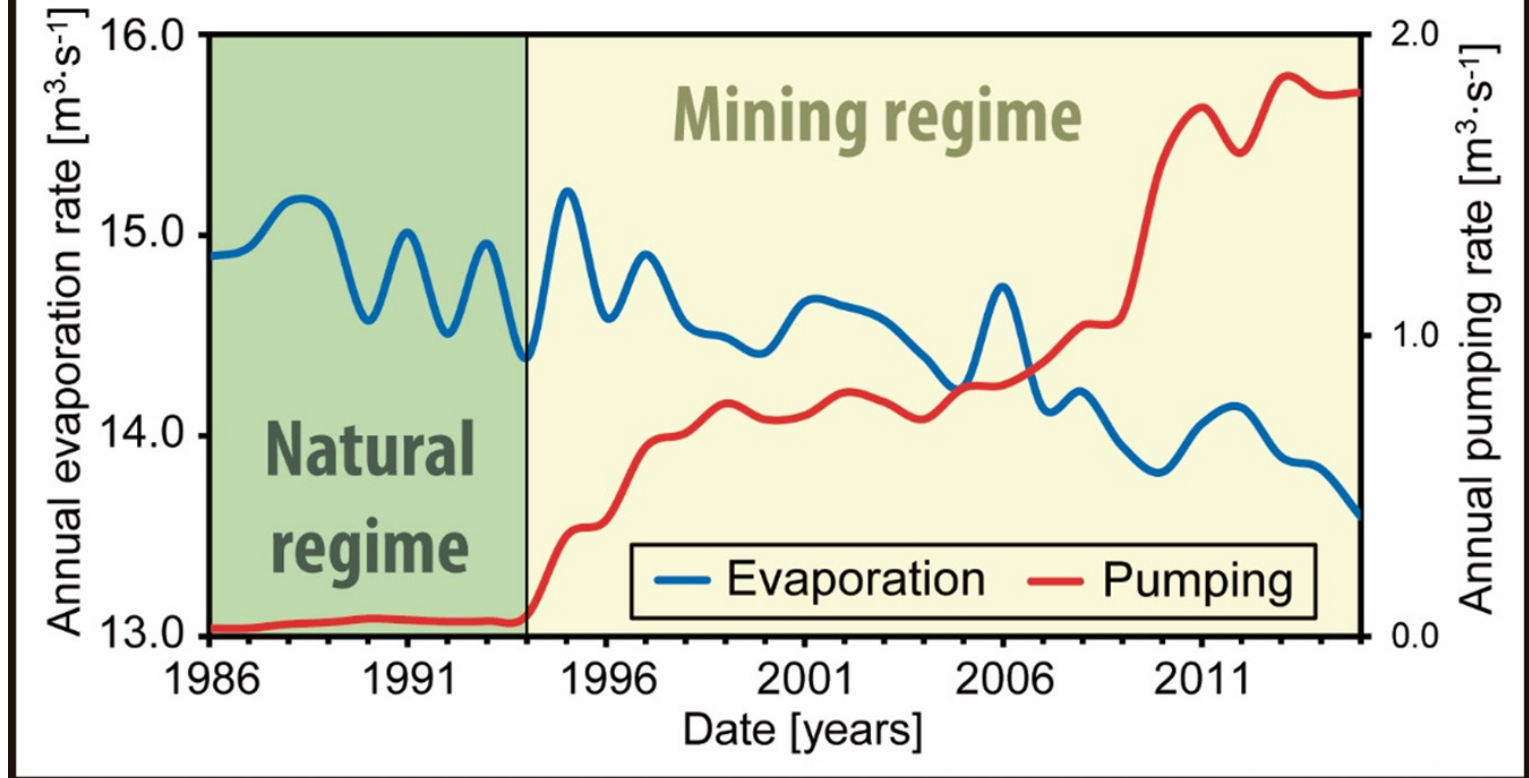


Foto 15.- Pruebas químicas de campo para aguas.

RIESGOS GEOQUÍMICOS EN DELTA Y SALAR

- Metales y semi-metales tóxicos pueden viajar por los ríos asociados con las arcillas y liberarse por cambios en ambiente redox en los deltas durante los ciclos de inundación y sequía.
- La materia prima afectada por aportes contaminantes naturales o mineros pueden acumularse en el proceso industrial, afectar la calidad de los productos y concentrarse en las salmueras y sales residuales.
- Las sales residuales de las plantas quedan acumuladas en las piscinas dentro del salar con posible presencia de contaminantes que van a constituir un pasivo ambiental.

IMPACTOS POR BOMBEO DE SALMUERA SALAR DE ATACAMA, CHILE



Descenso nivel salmuera entre 0,5 y 2 m

M.A.Marazuela, E.Vázquez-Suñé, C.Ayora, A.García-Gil, T.Palma, 2018. "The effect of brine pumping on the natural hydrodynamics of the Salar de Atacama: The damping capacity of salt flats". Science of The Total Environment, Volume 654, 1 March 2019, Pages 1118-1131

RIESGOS EN LA DISPONIBILIDAD DE AGUAS

- Simulación de pruebas de bombeo muestran una alta conexión del acuífero somero con la atmosfera, por tanto, depende de las aguas lluvia.
- Las aguas subterráneas pueden tener un aporte marcado en la precipitación por la emisión del vapor de agua en la cuenca producto de la evaporación.
- La extracción de litio es una minería de agua que puede ser un potente catalizador en el incremento de los eventos de sequía y escasez de agua existentes.
- Este efecto acumulativo, sumado a la variabilidad climática y a los impactos del cambio climático, plantea escenarios futuros de alarma para la disponibilidad de agua en la región.

GRACIAS !